



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

Programa de Doctorado en Ingeniería y Producción Industrial

TESIS DOCTORAL

ELABORACION DE UN MODELO MATEMATICO QUE PERMITA EL ANALISIS DE LA EFICACIA DE LA ÓSMOSIS INVERSA EN EL PROCESO DE ELIMINACIÓN DE PLOMO, HIERRO Y MANGANESO EN FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO EN LA ALTA CUENCA ALTA DEL RÍO GUADALQUIVIR EN BOLIVIA Y SU APORTE AL CRECIMIENTO DE LA OFERTA DE AGUA Y LA DISPONIBILIDAD SOSTENIBLE DE AGUA POTABLE A LARGO PLAZO

Presentada por:

Esteban Manuel Villena Martínez

Dirigida por:

Juan Ignacio Torregrosa Lopez

Vanesa Gladys Lo lacono Ferreira

Jaime Lora García

Alcoy, noviembre de 2022

Agradecimientos

Expresar un agradecimiento a mis directores de tesis, la Dra. Vanesa Lo lacono, al Dr. Jaime Lora y al Dr. Juan Ignacio Torregrosa. La paciencia, dedicación y tiempo que le dedicaron a guiar, aconsejar y revisar todas y cada una de las actividades de la investigación ha sido fundamental para llegar a la meta.

Un agradecimiento especial a todas las autoridades nacionales y de sede de la Universidad Católica Boliviana por haber confiado y apostado a este proyecto. El apoyo de la UCB ha sido vital en el logro de los objetivos no solamente en lo económico sino también en lo administrativo y académico. Al rector nacional Padre José Fuentes, exrector nacional Marco A. Fernández, al rector de sede Tarija José Loayza, al exrector de sede Tarija Enrique Farfán, a los directores del departamento de Ingeniería Lorena Sánchez y Jaime Villena, a los directores académicos y administrativos, Francisco Varas, Carolina Soto, Rodrigo Barja y Juan Pablo Querejazu.

Agradecer también a colegas profesores de la UCB y de la UPV quienes nos brindaron apoyo incondicional.

Dedicatoria

Este logro está dedicado a la razón de mi vida mis cuatro hijos, Nicolás, Rafaella, Catalina y Esteban Felipe. A mi esposa Adriana quien me apoyó en todo momento y alienta estas travesías, va dedicada a ella.

A mis padres cuyo ejemplo es el pilar más importante de mi vida, mi hermana y sobrinos.

Índice

INDICE GENERAL.....	i
INDICE DE FIGURAS.....	viii
INDICE DE TABLAS.....	xii
INDICE DE ANEXOS.....	xv
ABREVIACIONES.....	xviii
RESUMENES.....	xxiii
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Problemática ambiental en Tarija.....	2
1.1.1. Población en la zona de estudio.....	4
1.2. Disponibilidad de agua.....	4
1.2.1. Oferta de agua actual: Fuentes de abastecimiento de agua para potable y riego en la cuenca del Guadalquivir.....	5
1.2.1.1 Fuentes de abastecimiento de agua en el municipio de Tarija.....	5
1.2.1.2. Fuentes de abastecimiento de agua en el municipio de San Lorenzo.....	5
1.2.2. Demanda de agua.....	6
1.2.2.1. Demanda de agua potable.....	6
1.2.2.2. Demanda de agua para riego.....	7
1.2.3. La hidrológica e hidrografía de la cuenca del Guadalquivir.....	7
1.2.3.1. Hidrografía de Tarija.....	7
1.2.3.2. La Cuenca del Guadalquivir.....	9
1.2.3.3. La Alta cuenca del Guadalquivir.....	10
1.2.3.4. Información hidrometeorológica.....	11
1.2.3.5. Datos de uso de suelos en el balance hídrico.....	12
1.2.3.6. Balances hídricos en Bolivia y Tarija.....	13
1.3. La Calidad del agua en la cuenca del Guadalquivir.....	14
1.3.1. La contaminación por metales pesados en Bolivia.....	14
1.3.2. La contaminación por metales pesados en Tarija.....	15
1.3.3. La contaminación por metales pesados y su legislación.....	16
1.3.3.1 Legislación y control de calidad del agua de consumo humano.....	17
1.3.4. Tecnologías para la eliminación de los metales pesados en el agua.....	18
1.3.5. La eliminación de metales pesados con membranas.....	20
1.3.5.1. Ultrafiltración.....	21
1.3.5.2. Nanofiltración.....	21
1.3.6. Ósmosis Inversa.....	23
1.3.6.1. La Ósmosis Inversa para el tratamiento de metales pesados.....	23

1.3.7. La evaluación y modelación en la OI.....	24
1.3.7.1. La modelación matemática para el análisis y diseño eficiente del sistema de Osmosis Inversa.....	25
1.4. Las Partes interesadas en la gestión del agua	26
1.4.1 Análisis cualitativo.....	26
1.4.2 Análisis cuantitativo.....	31
1.4.3. Contexto Boliviano.....	31
CAPITULO II: OBJETIVOS E HIPÓTESIS	35
2.1. Objetivo general.....	35
2.2. Objetivos específicos	35
2.3. Hipótesis.....	36
CAPITULO III: MATERIALES Y METODOS.....	37
3.1. Área de Estudio.....	37
3.1.1. Descripción geográfica de las subcuencas del Guadalquivir.....	37
3.1.2. Principales fuentes de abastecimiento de agua	39
3.2. Teoría y metodología aplicada para la determinación de la disponibilidad de agua... 40	
3.2.1. Modelos hidrológicos.....	40
3.2.2. Modelo Témez - CHAC para la determinación del balance hídrico en la cuenca del Guadalquivir.....	41
3.2.3. Información hidrometeorológica.....	44
3.2.4. Análisis y procesamiento de la información hidrometeorológica.	45
3.2.4.1. Periodo de análisis, año hidrológico y crítica de datos hidrometeorológicos.45	
3.2.4.2. Completado de datos faltantes y prueba de homogeneidad	49
3.2.5. Evapotranspiración.....	49
3.2.6. Calibración y validación del modelo.....	50
3.2.7. Simulación	52
3.2.8. La medición de la infiltración en la cuenca del Guadalquivir	52
3.2.8.1. Áreas de investigación y puntos de trabajo	52
3.2.8.2. Equipos de medición de la infiltración y método de cálculo	54
3.2.8.2.1 Método de Green & Ampt.....	56
3.2.8.2.2. Método de Zang.....	56
3.2.8.2.3. Lectura y análisis de datos	58
3.2.9. Determinación del Número de Curva	58
3.3. Teoría y metodología utilizada para la determinación de la calidad de las aguas	59
3.3.1. Monitoreo.....	59
3.3.1.1. Instrumentos y equipos	62

3.3.1.2. Metodología	63
3.3.1.2.1. Periodo de muestreo.....	63
3.3.1.2.2. Área de estudio y puntos de muestreo.....	63
3.3.1.2.3. Parámetros de control	66
3.3.1.2.4. Muestreo, ensayos y rangos de evaluación y control	67
3.4. Teoría y metodología aplicada en el proceso de Osmosis Inversa	68
3.4.1. Diseño y Montaje de una planta experimental piloto de Ósmosis Inversa	69
3.4.1.1. Montaje y funcionamiento de la planta.....	71
3.4.1.1.1. Membrana	71
3.4.1.1.2. Bomba y accesorios de control manual	72
3.4.1.1.3. Sistematización del proceso experimental.....	73
3.4.1.2. Diseño de experimentos.....	73
3.4.1.2.1. Diseño factorial fraccional.....	74
3.4.1.2.2. Ortogonal Arrays	74
3.4.1.2.3. Determinación de variables	75
3.4.1.2.3.1. Variables y niveles de Control	75
3.4.1.2.3.2. Variables de respuesta	75
3.4.1.2.4. Número de experimentos	76
3.4.1.3. Pruebas iniciales de corrección y verificación de la membrana.....	76
3.4.1.3.1. Prueba de ajuste por temperatura.....	76
3.4.1.3.2. Verificación de permeabilidad bajo condiciones del proveedor.....	78
3.4.1.4. Aguas sintéticas, química y equipamiento.....	78
3.4.1.4.1 Cálculo de las soluciones de metal	79
3.4.1.4.1.1. Sales de metal:.....	79
3.4.1.4.1.2. Cloruro de sodio (NaCl):	79
3.4.1.5. Conversiones experimentales.	80
3.4.1.6. Verificación de la solubilidad de las sales de metal.....	80
3.4.1.6.1. Ensuciamiento.....	80
3.4.1.6.2. Ensuciamiento inorgánico o por incrustaciones/scaling	81
3.4.1.6.3. Equilibrio de solubilidad.	82
3.4.1.7. Limpieza de la membrana.	84
3.5. Teoría del modelo de Concentración-Polarización	85
3.5.1. La Concentración – Polarización	87
3.5.2. Modelo de Concentración – Polarización	88
3.6. Partes Interesadas: Gestión del Agua.....	92
3.6.1. Metodología.....	92

3.6.2. Recolección de datos	93
3.6.3. Análisis Cualitativo	93
3.6.3.1. Métodos y procedimiento de análisis	94
3.6.3.1.1. Identificación de los grupos de interés y análisis por mapeos.....	94
3.6.3.1.2. Identificación de problemas y escenarios	94
3.6.3.1.3. identificación y categorización de las partes interesadas	94
3.6.3.1.3.1. Identificación de las partes interesadas y sus intereses	97
3.6.3.1.3.2. Clasificación y diferenciación de las partes interesadas.....	98
3.6.3.1.3.3. Relación entre las partes interesada	100
3.6.4. Análisis Cuantitativo – Análisis de Redes Sociales.....	101
CAPITULO IV: RESULTADOS	102
4.1. La disponibilidad de agua en la cuenca	102
4.1.1. Parámetros morfológicos de la cuenca del Guadalquivir.....	102
4.1.2. Propiedades de Infiltración en los suelos en la cuenca	103
4.1.2.1. Caracterización de suelos.....	103
4.1.2.2. Propiedades hidráulicas de los suelos.....	104
4.1.2.3. Número de Curva de la cuenca del Guadalquivir.....	107
4.1.3. Parámetros de calibración	108
4.1.4. Calibración: caudales simulados vs caudales registrados	109
4.1.5. Simulación – balance hídrico	110
4.1.6. Análisis de la oferta y demanda de agua en la cuenca.....	112
4.2. La Calidad de agua en la cuenca	113
4.2.1. Monitoreo.....	113
4.2.1.1. Parámetros de control mínimos	114
4.2.1.2. Parámetros de básicos y complementarios	116
4.2.1.3. Metales	119
4.2.1.4. Monitoreo de lodos en los embalses de San Jacinto y Huacata.....	121
4.3. Diseño, montaje y puesta en marcha de la planta piloto	121
4.3.1. Protocolo de funcionamiento.....	122
4.3.1.1. Consideraciones importantes.....	123
4.3.2. Ajuste por temperatura.....	124
4.3.3. Verificación de la eficiencia de la membrana en condiciones del proveedor	124
4.3.4. Elaboración de las aguas sintéticas.....	125
4.3.4.1. Verificación de la precipitación de las sales	125
4.4. Análisis del comportamiento del sistema y validación del modelo CP	126
4.4.1. Análisis y evaluación del plomo.....	126

4.4.1.1. Comportamiento de la membrana respecto a la presión.....	126
4.4.1.2. Efecto del Flujo de alimento Q_f en el J_v	127
4.4.1.3. Evaluación de la remoción de sales mediante análisis de conductividad....	128
4.4.1.4. Evaluación del índice de remoción del Pb, mediante analítica química.	129
4.4.1.5. Efecto de la presión ΔP sobre el rechazo del soluto R_o	129
4.4.1.6. Efecto de concentración del soluto C_f sobre el Flux J_v y el rechazo R_o	130
4.4.1.7 Limpieza de las membranas luego de los experimentos con plomo.....	131
4.4.2. Análisis y evaluación del manganeso.....	132
4.4.2.1. Evaluación del comportamiento del Flux	132
4.4.2.2. Efecto del Flujo de alimento Q_f en el J_v	133
4.4.2.3. Evaluación de la remoción de sales mediante análisis de conductividad....	134
4.4.2.4. Evaluación del índice de remoción del Mn, mediante analítica química.....	135
4.4.2.5. Efecto de la presión ΔP sobre el rechazo del soluto R_o	136
4.4.2.6. Efecto de concentración del soluto C_f sobre el J_v y el R_o	137
4.4.2.7. Limpieza de las membranas luego de los experimentos con manganeso ..	138
4.4.3. Análisis y evaluación del hierro.....	138
4.4.3.1. Evaluación del comportamiento del Flux	138
4.4.3.2. Efecto del Flujo de alimento Q_f en el J_v	139
4.4.3.3. Evaluación de la remoción de sales mediante análisis de conductividad....	140
4.4.3.4. Evaluación del índice de remoción del Fe, mediante analítica química.....	141
4.4.3.5. Efecto de la presión ΔP sobre el rechazo del soluto R_o	141
4.4.3.6. Efecto de concentración del soluto C_f sobre el J_v y el rechazo R_o	142
4.4.3.7 Limpieza de las membranas luego de los experimentos con hierro	143
4.4.4. Validación del modelo CP	144
4.4.4.1. Características de la membrana y su operación	144
4.4.4.2. Alimentación del agua sintética.....	145
4.4.4.3. Cálculo de parámetros no lineales.....	145
4.4.4.4. Curvas de validación: comportamiento del flux experimental vs. Flux teórico	146
4.4.4.4.1. Validación del modelo para el plomo	146
4.4.4.4.2. Validación del modelo para el manganeso	147
4.4.4.4.2. Validación del modelo para el hierro	149
4.5. Análisis de las partes interesadas en la alta cuenca del Guadalquivir.....	150
4.5.1. Análisis Cualitativo	151
4.5.1.1. Identificación de los principales problemas en la cuenca y matriz de suposiciones	151

4.5.1.2. Identificación de grupos de interés	152
4.5.1.3. Identificación de las partes interesadas e involucradas en la gestión del agua en Tarija	153
4.5.1.4. Clasificación de las partes interesadas en la gestión del agua en Tarija.....	156
4.5.1.5. Relacionamiento entre las partes interesadas	159
4.5.1.6. Afectación	162
4.5.2. Análisis cuantitativo – Análisis de Redes Sociales.....	163
CAPITULO V: CONCLUSIONES	165
Referencias	168
ANEXOS	191
7.1. ANEXO 1: Planillas de cálculo del balance hídrico	191
7.2. ANEXO 2: Datos y planillas de cálculo en la osmosis inversa: calidad de agua	214
7.3. ANEXO 3: Tablas y bases teóricas del análisis de partes interesadas	267
7.4. ANEXO 4: Análisis de redes sociales	269
7.5 ANEXO 5: Publicaciones y contribuciones.....	272

Figura 1: Mapa Hidrográfico y Cuencas del Departamento de Tarija	9
Figura 2: Mapa hidrográfico de la alta cuenca de Guadalquivir	10
Figura 3: Mapa de la alta cuenca del río Guadalquivir	11
Figura 4: Esquema difusión de la solución en membranas	21
Figura 5: La Alta Cuenca del Guadalquivir del departamento de Tarija.....	37
Figura 6: Subcuencas del Guadalquivir	39
Figura 7: Modelo de Témez.....	41
Figura 8: Subcuencas de estudio de la infiltración	53
Figura 9: Puntos de trabajo - infiltración.....	53
Figura 10: Infiltrómetro Minidisc	54
Figura 11: Curva de infiltración y tiempo.....	58
Figura 12: Trabajo de medición de infiltración en campo	58
Figura 13: Puntos de muestreo: Embalse de San Jacinto.....	64
Figura 14: Puntos de muestreo: Embalse de Huacata	64
Figura 15: Punto de muestreo: Canasmoro	65
Figura 16: Punto de muestreo: Rincón de la Vittoria y trayecto río Guadalquivir	66
Figura 17: Esquema general de funcionamiento conceptual de la planta piloto.....	71
Figura 18: Membrana Semipermeable.....	72
Figura 19: Bomba centrífuga	72
Figura 20: Sensor de caudal en el permeado con escala de 0.5 a 5 l/min	73
Figura 21: Sensor de caudal en el concentrado con escala de 1 a 25 l/min.....	73
Figura 22: Curva empírica para determinar la cantidad NaCl	79
Figura 23: Mecanismo de selección del modelo	86
Figura 24: Esquema de concentración-polarización en osmosis inversa	89
Figura 25: Esquema metodológico de análisis de las partes interesadas	92
Figura 26: Esquema procedimental de análisis de partes interesadas en la cuenca del Guadalquivir.....	95
Figura 27: Matriz de clasificación de partes interesadas según influencia e importancia activa.....	96
Figura 28: Esquema de objetivos para identificar las partes interesadas y el grado de participación.....	96
Figura 29: Diagrama de arco iris para clasificar a las partes interesadas según el grado en que pueden verse afectadas	98
Figura 30: Curva hipsométrica de la cuenca del Guadalquivir	103
Figura 31: Caracterización de suelos con fines hidrológicos de las subcuencas de la Vittoria y quebrada del Monte	103

Figura 32: Caracterización de suelos con fines hidrológicos de las subcuencas de San Jacinto 1 (norte) y San Jacinto 2 (sur)	104
Figura 33: Caudales simulados Vs Registrados – Estación de Obrajes	109
Figura 34: Caudales simulados Vs Registrados – Estación de Tolomosa.....	110
Figura 35: Comportamiento temporal de los aportes en la cuenca del Guadalquivir	111
Figura 36: Comportamiento del pH	114
Figura 37: Comportamiento de la conductividad	114
Figura 38: Comportamiento de la turbiedad.....	115
Figura 39: Comportamiento de los Sólidos Disueltos Totales – SDT	115
Figura 40: Comportamiento de los Coliformes Totales	116
Figura 41: Comportamiento de la dureza.....	116
Figura 42: Comportamiento de los sulfatos	117
Figura 43: Comportamiento de los nitratos	117
Figura 44: Comportamiento de los nitritos	118
Figura 45: Comportamiento del Oxígeno Disuelto.....	118
Figura 46: Comportamiento del DBO ₅	119
Figura 47: Comportamiento del DQO.....	119
Figura 48: Comportamiento del plomo (Pb).....	120
Figura 49: Comportamiento del hierro (Fe).....	120
Figura 50: Comportamiento del manganeso (Mn)	121
Figura 51: Concentración de metales en lodos de los embalses de San Jacinto y Huacata	121
Figura 52: Esquema del diseño final de la Planta Piloto	122
Figura 53: Montaje final de la planta piloto instalada en laboratorios de la UCB Tarija.....	122
Figura 54: Ajuste por temperatura.....	124
Figura 55: Comportamiento del Jv respecto a la presión ΔP	126
Figura 56: Comportamiento del Jv respecto a la variación de Qf.....	127
Figura 57: Efecto de la presión ΔP sobre el índice de rechazo Ro.....	130
Figura 58: Efecto de la concentración Cf sobre el flux Jv.....	130
Figura 59: Efecto de la concentración Cf sobre el rechazo Ro	131
Figura 60: Limpieza membrana luego de experimentos del plomo.....	132
Figura 61: Comportamiento del Jv respecto a la presión ΔP	133
Figura 62: Comportamiento del Jv respecto a la variación de Qf.....	134
Figura 63: Efecto de la presión ΔP sobre el índice de rechazo Ro.....	136
Figura 64: Efecto de la concentración Cf sobre el Jv	137
Figura 65: Efecto de la concentración Cf sobre el rechazo Ro	137
Figura 66: Limpieza membrana luego de experimentos del manganeso.....	138

Figura 67: Comportamiento del J_v respecto a la presión ΔP	139
Figura 68: Comportamiento del J_v respecto a la variación de Q_f	139
Figura 69: Efecto de la presión ΔP sobre el índice de rechazo R_o	142
Figura 70: Efecto de la concentración C_f sobre el J_v	142
Figura 71: Efecto de la concentración C_f sobre el rechazo R_o	143
Figura 72: Limpieza membrana luego de experimentos del hierro	143
Figura 73: Flux Teórico vs Flux Experimental del Pb: concentración baja.....	146
Figura 74: Flux Teórico vs Flux Experimental del Pb: concentración media	146
Figura 75: Flux Teórico vs Flux Experimental del Pb: concentración alta.....	147
Figura 76: Flux Teórico vs Flux Experimental del Mn: concentración baja	148
Figura 77: Flux Teórico vs Flux Experimental del Mn: concentración media	148
Figura 78: Flux Teórico vs Flux Experimental del Mn: concentración alta	149
Figura 79: Flux Teórico vs Flux Experimental del Fe: concentración baja.....	149
Figura 80: Flux Teórico vs Flux Experimental del Fe: concentración media.....	149
Figura 81: Flux Teórico vs Flux Experimental del Fe: concentración alta.....	150
Figura 82: Árbol de suposiciones	152
Figura 83: Principales grupos de interés.....	153
Figura 84: Identificación de las partes interesadas mediante el enfoque de órbitas de participación.....	154
Figura 85: Identificación y clasificación de las partes interesadas por nivel de interés e influencia	157
Figura 86: Matriz de Clasificación por interés y poder de las partes interesadas.....	158
Figura 87: Diagrama de afectación	162
Figura 88: Red Social de las partes interesadas	164

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano en el Municipio de Tarija	5
Tabla 2: Fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano en el municipio de San Lorenzo	5
Tabla 3: Demanda de agua en el municipio de Tarija.....	6
Tabla 4: Demanda de agua en el municipio de San Lorenzo	6
Tabla 5: Demanda de agua para riego	7
Tabla 6: Puntos de muestreo realizados en el monitoreo de la calidad de agua	16
Tabla 7: Procesos de eliminación de metales pesados	18
Tabla 8: Tecnologías aplicables a algunos metales pesados.....	20
Tabla 9: Eficacia de los tipos de tratamiento con membrana en metales pesados	22
Tabla 10: Estaciones hidrológicas	44
Tabla 11: Inventario de Información - Precipitación	47
Tabla 12: Inventario de Información – Temperatura	47
Tabla 13: Inventario de Información - humedad relativa	48
Tabla 14: Inventario de Información - horas sol	48
Tabla 15: Inventario de Información – viento	48
Tabla 16: Estaciones de aforo – hidrométricas	51
Tabla 17: Clasificación de suelos – Green-Ampt	55
Tabla 18: Rangos máximos permisibles: Parámetros básicos y mínimos.....	68
Tabla 19: Rangos máximos permisibles: Metales pesados	68
Tabla 20: Variables y niveles de experimentación por metal.....	75
Tabla 21: Número de experimento e interacciones entre variables.....	76
Tabla 22: Conversiones y niveles de concentración de metales	80
Tabla 23: Tabla modelo: Clasificación de las partes mediante escalas de atributos	100
Tabla 24: Características morfométricas de la cuenca del Guadalquivir.....	102
Tabla 25: Conductividad Hidráulica subcuenca La Vittoria	104
Tabla 26: Conductividad Hidráulica quebrada del Monte	105
Tabla 27: Conductividad hidráulica San Jacinto 1	105
Tabla 28: Conductividad hidráulica San Jacinto 2	106
Tabla 29: Grupo de suelos subcuenca Rincón de la Vittoria y Quebrada del Monte.....	107
Tabla 30: Grupo de suelos subcuenca San Jacinto 1 y San Jacinto 2.....	107
Tabla 31: Determinación del Número de Curva para la cuenca del Guadalquivir	107
Tabla 32: Parámetros de calibración para la modelación del balance hídrico	108
Tabla 33: Parámetros de simulación obtenidos de la calibración del modelo.....	110

Tabla 34: Aportes medio mensual en la cuenca alta del Guadalquivir (m3/s)	112
Tabla 35: Oferta y demanda en la cuenca	112
Tabla 36: Estado actual de las fuentes superficiales	113
Tabla 37: Verificación de la eficiencia de la membrana en la remoción de NaCl.....	125
Tabla 38: Concentraciones de sal de metal y cloruro sódico.....	125
Tabla 39: Solubilidad de las sales	126
Tabla 40: Análisis del rechazo de sales por conductividad del plomo para la concentración baja.....	128
Tabla 41: Análisis del rechazo de sales por conductividad del plomo para la concentración media.....	128
Tabla 42: Análisis del rechazo de sales por conductividad del plomo para la concentración alta.....	128
Tabla 43: Analíticas del plomo	129
Tabla 44: Analíticas para el NaCl en combinación con el plomo.....	129
Tabla 45: Análisis del rechazo de sales por conductividad del manganeso para la concentración baja.....	134
Tabla 46: Análisis del rechazo de sales por conductividad del manganeso para la concentración media.....	135
Tabla 47: Análisis del rechazo de sales por conductividad del manganeso para la concentración alta.....	135
Tabla 48: Analíticas del manganeso.....	135
Tabla 49: Analíticas del NaCl en combinación con el manganeso	136
Tabla 50: Análisis del rechazo de sales por conductividad del hierro para la concentración baja.....	140
Tabla 51: Análisis del rechazo de sales por conductividad del hierro para la concentración media.....	140
Tabla 52: Análisis del rechazo de sales por conductividad del hierro para la concentración alta.....	140
Tabla 53: Analíticas del hierro	141
Tabla 54: Analíticas del NaCl en combinación con el hierro.....	141
Tabla 55: Características de la membrana.....	144
Tabla 56: Coeficiente de reflexión “ σ ”	145
Tabla 57: Parámetros no lineales del modelo	145
Tabla 58: Principales problemas y políticas en el área de estudio	151
Tabla 59: Clasificación de las partes interesadas a partir de atributos y escalas	158
Tabla 60: Interés-Influencia y relacionamiento entre partes interesadas	161
Tabla 61: Atributos	163

INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Planillas de cálculo del balance hídrico

ANEXO 1. 1: Series anuales de precipitación anual por estaciones luego del completado	191
ANEXO 1. 2: Series anuales de la temperatura media anual por estaciones luego del completado.....	195
ANEXO 1. 3: Series anuales de la humedad relativa anual por estaciones luego del completado.....	199
ANEXO 1. 4: Series anuales de la velocidad del viento media diaria mensual por estaciones luego del completado.....	201
ANEXO 1. 5: Series anuales de horas de sol (insolación) media anual por estaciones luego del completado.....	203
ANEXO 1. 6: Curvas de doble acumulación – obtenidas por el CHAC	205
ANEXO 1. 7: Evapotranspiración Potencial calcula por el método de Penman – obtenida por el CHAC	207
ANEXO 1. 8: Planilla de trabajo de campo (modelo general) – Infiltración	208
ANEXO 1. 9: Curvas de infiltración	209
ANEXO 1. 10: Caudales Simulados vs. Registrados subcuencas del Guadalquivir	210
ANEXO 1. 11: Precipitación areal mensual por subcuenca de estudio	211
ANEXO 1. 12: Evapotranspiración Potencial areal mensual por subcuenca de estudio.....	211
ANEXO 1. 13: Caudales de aportes temporales en las subcuencas de estudio.....	212
<u>ANEXO 2: Datos y planillas de cálculo en la osmosis inversa: calidad de agua</u>	
ANEXO 2. 1: Parámetros básicos del monitoreo	214
ANEXO 2. 2: Concentración de metales junio/2018.....	220
ANEXO 2. 3: Concentraciones en lodos 2019.....	233
ANEXO 2. 4: Ajuste por temperaturas - permeabilidad de la membrana a diferentes temperaturas	234
ANEXO 2. 5: Cálculos del reactivo limitante.....	236
ANEXO 2. 6: Cálculo de las cantidades a producir debido a la mezcla de las sales	239
ANEXO 2. 7: Cálculo de reactivo en exceso que queda en el medio tras la mezcla de las sales	242
ANEXO 2. 8: Análisis de la solubilidad de las tres especies que queda en el sistema.....	245
ANEXO 2. 9: Cálculo de la constante de equilibrio de solubilidad (Kps) para la concentración Baja C1.....	246
ANEXO 2. 10: Cálculo de la constante de equilibrio de solubilidad (Kps) para la concentración Baja C2.....	248
ANEXO 2. 11: Cálculo de la constante de equilibrio de solubilidad (Kps) para la concentración Baja C3.....	250
ANEXO 2. 12: Comportamiento del Flux en la eliminación del plomo	253

ANEXO 2. 13: Comportamiento del Flux en la eliminación del manganeso	253
ANEXO 2. 14: Comportamiento del Flux en la eliminación del hierro.....	253
ANEXO 2. 15: Analíticas en muestras experimentales para el Pb, Mn, He y NaCl	254
ANEXO 2. 16: Ficha técnica de la membrana	257
ANEXO 2. 17: Script de cálculo en Matlab de parámetros Lp y K, Jv teórico, para la concentración baja del plomo	258
ANEXO 2. 18: Script de cálculo en Matlab de parámetros Lp y K, Jv teórico, para la concentración media del plomo	259
ANEXO 2. 19: Script de cálculo en Matlab de parámetros Lp y K, Jv teórico, para la concentración alta del plomo	260
ANEXO 2. 20: Script de cálculo en Matlab de parámetros Lp y K, Jv teórico, para la concentración baja del manganeso.....	261
ANEXO 2. 21: Script de cálculo en Matlab de parámetros Lp y K, Jv teórico, para la concentración media del manganeso.....	262
ANEXO 2. 22: Script de cálculo en Matlab de parámetros Lp y K, Jv teórico, para la concentración alta del manganeso.....	263
ANEXO 2. 23: Script de cálculo en Matlab de parámetros Lp y K, Jv teórico, para la concentración baja del hierro	264
ANEXO 2. 24: Script de cálculo en Matlab de parámetros Lp y K, Jv teórico, para la concentración baja del Hierro	265
ANEXO 2. 25: Script de cálculo en Matlab de parámetros Lp y K, Jv teórico, para la concentración baja del Hierro	266
<u>ANEXO 3:</u> <u>Tablas y bases teóricas del análisis de partes interesadas</u>	
ANEXO 3. 1: Metodología de análisis de las partes interesadas.....	267
<u>ANEXO 4:</u> <u>Análisis de redes sociales</u>	
ANEXO 4. 1: Matriz de redes sociales.....	269
ANEXO 4. 2: Estadísticas	270
<u>ANEXO 5:</u> <u>Publicaciones y contribuciones</u>	
ANEXO 5. 1: Artículos en revistas	272
ANEXO 5. 2: Artículos publicados y participación en congreso internacionales	273

ABREVIACIONES

AAPS	Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico
ABIS	Asociación Boliviana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental
AC	Acetato de Celulosa
Adm. SL	Administradora San Lorenzo
Ad	Adsorción
AO	Arreglo Ortogonal
ALN	Asamblea Legislativa Plurinacional
ALD	Asamblea Legislativa Departamental
ASPNC	Apoyo Sectorial al Plan Nacional de Cuencas
CE	Comisión Europea
Cf	Concentración de Ingreso
CM	Concejos Municipales
CADECO	Cámara Departamental de la Construcción
CAINCOTAR	Cámara de Industria y Comercio de Tarija
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas de España
CENAVIT	Centro Nacional Vitivinícola de Tarija
CHAC	Calculo Hidrológico de Aportaciones y Crecidas
COSAALT	Cooperativa de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario de Tarija
CONAPHI	Comité Nacional para el Programa de Hidrología
CICT	Colegio de ingenieros Civiles de Tarija
CP	Concentración Polarización
Cp	Concentración en el Permeado
CPE	Constitución Política del Estado
CL	Cloración
CG	Coagulación
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno 5
DMA	Directiva Marco del Agua

DQO	Demanda Química de Oxígeno
DCV	Destilación por Compresión de Vapor
EC	European Commission
UE	Unión Europea
ED	Electrodiálisis
EMAGUA	Entidad Ejecutora del Medio Ambiente y Agua
ETP	Evapotranspiración Potencial
ETr	Evapotranspiración Real
FAO	Organización de la Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura
FEDJUVE	Federación Departamental de Juntas Vecinales
GAD	Gobierno Autónomo Departamental
GAM	Gobierno Autónomo Municipal
GAMT	Gobierno Autónomo Municipal de Tarija
GAMSL	Gobierno Autónomo Municipal de San Lorenzo
Hmáx	Humedad Máxima
HRU	Unidad de Respuesta Hidrológica
INE	Instituto Nacional de Estadística
IHH/UMSA	Instituto de Hidrología e Hidráulica/Universidad Mayor de San Andrés
Imax	Infiltración Máxima
ISO/IEC	Organización Internacional de Normalización/ Comisión Electrotécnica Internacional
LIDEMA	Liga del Medio Ambiente
li	Intercambio iónico
LTDA	Limitada
MMayA	Ministerio de Medio Ambiente y Agua
MEUF	Micellar Enhanced Ultrafiltration
MSFD	Destilación flash multietapa (Multistage flash destillation)
MSR	Modelo de Superficie de Respuesta

MED	Destilación de múltiple efecto (Multiefect destillation)
MON	Materia Orgánica Natural
msnm	Metros sobre el nivel del mar
NF	Nanofiltración
NB512	Norma Boliviana 512 – calidad de agua de consumo humano
NC	Número de Curva
NB-496	Norma Básica 496 - para muestreo de agua superficial
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ODA	Overseas Development Administration
OTNPB	Oficina Técnica Nacional de los Ríos Pilcomayo y Bermejo
OI	Osmosis Inversa
OINT	Organismos Internacionales
O/A	Ozonización/Aireación
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONG´s	Organismos No Gubernamentales
ONU	Organización de las Naciones Unidas
ORSTOM	Office de la recherche scientifique et technique d'outre-mer
PA	Poliámidas Aromáticas
PEA	Programa Estratégico de Acción
PEUF	Polymer Enhanced Ultrafiltration
PHI/UNESCO	Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO
PMIVCT	Plan Maestro Integral de Agua y Saneamiento del Valle Central de Tarija
PNUD	Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo
ppm	parte por millón
PSA	Plan de seguridad del agua
Pr	Precipitación
RD	Real Decreto

Ro	Índice de Rechazo
SEDEGIA	Servicio Departamental de la Gestión Integral del Agua
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
SENARI	Servicio Nacional de Riego
SERNAP	Servicio Nacional de Áreas Protegidas
SIB	Sociedad de Ingenieros de Bolivia
UAJMS	Universidad Autónoma Juan Misael Saracho
UCB	Universidad Católica Boliviana
UCP - PAAP	Unidad Coordinadora del Programa de Agua y Alcantarillado Periurbano
US EPA	Unit States Environmental Protection Agency
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
USSCS	U.S. Service Conservation Soil, Servicios de Conservación de suelos de los Estados Unidos
TI	Termodinámica Irreversible
UE	Unión Europea
UF	Ultrafiltración
ULP	Presión Ultra Baja
VAPSB	Viceministerio de Agua Potable y Servicios Básicos
VMABCCGDF	Viceministerio de Medio Ambiente, Biodiversidad, Cambios Climáticos y Gestión y Desarrollo Forestal
VRHR	Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego
WGF	Water Governance Facility
WHO	World Health Organization

RESUMEN

ELABORACION DE UN MODELO MATEMATICO QUE PERMITA EL ANALISIS DE LA EFICACIA DE LA ÓSMOSIS INVERSA EN EL PROCESO DE ELIMINACIÓN DE PLOMO, HIERRO Y MANGANESO EN FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO EN LA ALTA CUENCA ALTA DEL RÍO GUADALQUIVIR EN BOLIVIA Y SU APORTE AL CRECIMIENTO DE LA OFERTA DE AGUA Y LA DISPONIBILIDAD SOSTENIBLE DE AGUA POTABLE A LARGO PLAZO

La alta cuenca del río Guadalquivir ubicada en el departamento de Tarija, Bolivia, alberga al municipio de la ciudad capital de Tarija; siendo la zona urbana más poblada del departamento. Durante las últimas décadas el departamento ha tenido grandes ingresos económicos, producto de la explotación hidrocarburífera, trayendo consigo un crecimiento poblacional e inmobiliario desproporcionado; originando un proceso de contaminación y degradación ambiental, producto de actividades antrópicas como la disposición de aguas residuales con poco o nulo proceso de tratamiento, desechos sólidos en las orillas del río, y sobreexplotación de áridos. En consecuencia, varias fuentes de abastecimiento de agua se encuentran paralizadas.

Durante los últimos años, la problemática ambiental e hídrica ha sido objeto de un permanente debate, sin encontrar soluciones sostenibles en el corto plazo, ocasionando que la degradación ambiental permanezca activa con altos riesgos para la salud pública.

Siendo necesario conocer el estado actual de los recursos hídricos en la cuenca, se realizaron dos trabajos iniciales; se modeló el balance hídrico de la cuenca para establecer la disponibilidad de agua. Para este proceso se realizó una investigación de apoyo destinada a clasificar y determinar las propiedades de los suelos en la cuenca para lograr una menor incertidumbre en los resultados de la modelación hidrológica. Los resultados determinaron que existe un déficit de agua, principalmente en las épocas de estiaje. Un segundo estudio ha sido destinado a conocer la calidad del agua mediante un monitoreo de las principales fuentes de abastecimiento de agua potable.

La investigación a las fuentes primarias de agua en la cuenca de estudio identificó la presencia de metales pesados tóxicos para la salud que exceden los límites permisibles para el agua potable. Se identificó plomo, manganeso y hierro presente en los embalses de San Jacinto y Huacata; mientras que el Pb excede en un 50% de lo establecido en la Normativa, el Mn y el Fe superan hasta 800% la norma actual.

El trabajo estudia la ósmosis inversa (OI) para eliminar el Pb, Mn y Fe en distintas concentraciones. La principal contribución de esta investigación es el desarrollo y construcción de un modelo matemático novedoso basado en el modelo de concentración de polarización de Spiegler-Kedem. El modelo ha sido desarrollado utilizando diferentes

concentraciones de Pb, Mn y Fe. La selección de las concentraciones se basa en construir un modelo que permita el diseño de instalaciones con alta conversión (>80%). Con ello será posible optimizar el proceso desde el punto de vista de eficiencia energética en futuros trabajos. El modelo incluye, además, un factor de ajuste de temperatura tipo Arrhenius que permite una predicción precisa del rendimiento del proceso.

La experimentación se llevó a cabo en una planta piloto de OI utilizando una membrana compuesta de poliamida de configuración en espiral tipo ULP 2540 Marca Keensen de procedencia China. La validación del modelo se ajusta correctamente con un error relativo máximo entre los flujos experimental y teórico de 5,4%, 18% y 7.6% para el Pb, Mn y Fe respectivamente.

Entre los principales beneficios del estudio, permite garantizar el rechazo de metales superior al 99%, incluso a bajas presiones, garantizando agua segura a la población de Tarija. Como un aporte final se propone un análisis de las partes interesadas en la cuenca, logrando identificar, clasificar y relacionar los diferentes actores con poder e interés en el proyecto.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL THAT ALLOWS THE ANALYSIS OF THE EFFICACY OF REVERSE OSMOSIS IN THE PROCESS OF ELIMINATION OF LEAD, IRON AND MANGANESE IN SOURCES OF WATER SUPPLY FOR HUMAN CONSUMPTION IN THE UPPER BASIN OF THE GUADALQUIVIR RIVER IN BOLIVIA AND ITS CONTRIBUTION TO THE GROWTH OF THE WATER SUPPLY AND THE LONG-TERM SUSTAINABLE AVAILABILITY OF DRINKING WATER

The upper basin of the Guadalquivir River located in the department of Tarija, Bolivia, houses the municipality of the capital city of Tarija; being the most populated urban area of the department. During the last decades the department has had great economic income, as a result of hydrocarbon exploitation, bringing with it a disproportionate population and real estate growth, originating a process of contamination and environmental degradation, product of anthropic activities such as the disposal of wastewater with little or no treatment process, solid waste on the banks of the river, and overexploitation of aggregates. Consequently, various sources of water supply are paralyzed.

In recent years, environmental and water problems have been the subject of permanent debate, without finding sustainable solutions in the short term, causing environmental degradation to remain active with high risks to public health.

Being necessary to know the current state of the water resources in the basin, two initial works were carried out; the water balance of the basin was modeled to establish the availability of water. For this process, a support investigation was carried out to classify and determine the properties of the soils in the basin to achieve less uncertainty in the results of the hydrological modeling. The results determined that there is a water deficit, mainly in the dry season. A second study has been designed to determine the quality of the water by monitoring the main sources of drinking water supply.

The investigation of the primary water sources in the study basin identified the presence of toxic heavy metals for health that exceed the permissible limits for drinking water. Lead, manganese, and iron present in the San Jacinto and Huacata reservoirs were identified; while Pb exceeds by 50% what is established in the Regulation, Mn and Fe exceed up to 800% the current standard.

The work studies reverse osmosis (RO) to eliminate Pb, Mn and Fe in different concentrations. The main contribution of this research is the development and construction of a novel mathematical model based on the Spiegler-Kedem concentration polarization model. The model has been developed using different concentrations of Pb, Mn and Fe. The selection of the concentrations is based on building a model that allows the design of installations with high conversion (>80%). With this it will be possible to optimize the process from the point of

view of energy efficiency in future works. The model also includes an Arrhenius-type temperature adjustment factor that allows accurate prediction of process performance.

The experimentation was carried out in a RO pilot plant using a ULP 2540 Keensen brand spiral configuration polyamide composite membrane from China. The model validation fits correctly with a maximum relative error between the experimental and theoretical fluxes of 5.4%, 18% and 7.6% for Pb, Mn and Fe respectively.

Among the main benefits of the study, it allows to guarantee the rejection of metals higher than 99%, even at low pressures, guaranteeing safe water to the population of Tarija. As a final contribution, an analysis of the interested parties in the basin is proposed, managing to identify, classify and relate the different actors with power and interest in the project.

RESUM

ELABORACIÓ D'UN MODEL MATEMÀTIC QUE PERMETA L'ANÀLISI DE L'EFICÀCIA DE L'OSMOSI INVERSA EN EL PROCÉS D'ELIMINACIÓ DE PLOM, HIERRO I MANGANÉS EN FONTS D'ABASTIMENT D'AIGUA PER A CONSUM HUMÀ EN L'ALTA CONCA ALTA DEL RIU GUADALQUIVIR A BOLÍVIA I EL SEU APORTACIÓ AL CREIXEMENT DE L'OFERTA D'AIGUA I LA DISPONIBILITAT SOSTENIBLE D'AIGUA POTABLE A LLARG TERMINI

L'alta conca del riu Guadalquivir ubicada en el departament de Tarija, Bolívia, alberga al municipi de la ciutat capital de Tarija; sent la zona urbana més poblada del departament. Durant les últimes dècades el departament ha tingut grans ingressos econòmics, producte de l'explotació hidrocarburífera, comportant un creixement poblacional i immobiliari desproporcionat; originant un procés de contaminació i degradació ambiental, producte d'activitats antròpiques com la disposició d'aigües residuals amb poc o nul procés de tractament, rebutjos sòlids a la vora del riu, i sobreexplotació d'àrids. En conseqüència, unes quantes fonts d'abastiment d'aigua es troben paralizades.

Durant els últims anys, la problemàtica ambiental i hídrica ha sigut objecte d'un permanent debat, sense trobar solucions sostenibles en el curt termini, ocasionant que la degradació ambiental romanga activa amb alts riscos per a la salut pública.

Sent necessari conèixer l'estat actual dels recursos hídrics en la conca, es van realitzar dos treballs inicials; es va modelar el balanç hídric de la conca per a establir la disponibilitat d'aigua. Per a este procés es va realitzar una investigació de suport destinada a classificar i determinar les propietats dels sòls en la conca per a aconseguir una menor incertesa en els resultats de la modelació hidrològica. Els resultats van determinar que hi ha un dèficit d'aigua, principalment en les èpoques d'estiatge. Un segon estudi ha sigut destinat a conèixer la qualitat de l'aigua per mitjà d'un monitoreo de les principals fonts d'abastiment d'aigua potable.

La investigació a les fonts primàries d'aigua en la conca d'estudi va identificar la presència de metalls pesants tòxics per a la salut que excedixen els límits permissibles per a l'aigua potable. Es va identificar plom, manganés i ferro present en els embassaments de Sant Jacinto i Huacata; mentres que el Pb excedix en un 50% del que estableix la Normativa, el Mn i el Fe superen fins a 800% la norma actual.

El treball estudia l'osmosi inversa (OI) per a eliminar el Pb, Mn i Fe en distintes concentracions. La principal contribució d'esta investigació és el desenrotllament i construcció d'un model matemàtic nou basat en el model de concentració de polarització de Spiegler-Kedem. El model ha sigut desenrotllat utilitzant diferents concentracions de Pb, Mn i Fe. La selecció de les concentracions es basa a construir un model que permeta el disseny d'instal·lacions amb alta conversió (>80%). Amb això serà possible optimitzar el procés des del punt de vista d'eficiència energètica en futurs treballs. El model inclou, a més, un factor

d'ajust de temperatura tipus Arrhenius que permet una predicció precisa del rendiment del procés.

L'experimentació es va dur a terme en una planta pilot de OI utilitzant una membrana composta de poliamida de configuració en espiral tipus ULP 2540 Marca Keensen de procedència Xina. La validació del model s'ajusta correctament amb un error relatiu màxim entre els fluxos experimental i teòric de 5,4%, 18% i 7.6% per al Pb, Mn i Fe respectivament.

Entre els principals beneficis de l'estudi, permet garantir el rebuig de metalls superior al 99%, inclús a baixes pressions, garantint aigua segura a la població de Tarija. Com una aportació final es proposa una anàlisi de les parts interessades en la conca, aconseguint identificar, classificar i relacionar els diferents actors de poder i interès en el projecte.

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

La problemática ambiental y la gestión de los recursos hídricos son temas de interés mundial que se debaten continuamente y evolucionan con el tiempo. Los Objetivos de Desarrollo Sostenibles [ODS] establecen como prioridad, entre otros, el agua limpia y saneamiento (6) y la salud y bienestar (3) (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2021). Asimismo, señalan que el acceso sostenible a servicios básicos y saneamiento tienen una estrecha relación con la gestión de los recursos hídricos en las políticas públicas y proyectos ligados al uso y explotación del agua.

El agua potable está estrechamente vinculada a la salud pública. Esto ha sido corroborado por numerosos estudios de salud a nivel mundial. La calidad del agua para el consumo humano es un factor fundamental en el desarrollo sostenible de las diferentes naciones. Teniendo en cuenta que los recursos hídricos superficiales no son infinitos, mantener la calidad del agua es una necesidad para la supervivencia de los seres vivos (Alvizuri, et al. 2022).

Cuando la gestión de los recursos hídricos es realizada por organismos estatales con cierta independencia política, las actuaciones resultan más eficientes que en los casos donde los ciclos políticos interfieren sistemáticamente. Este tipo de gestión tiene, por lo general, un enfoque basado en las propias cuencas donde se establece el territorio como un espacio de planificación entre las instituciones y la sociedad. Se evidencian las ventajas de institucionalizar las acciones de la gestión del agua y los recursos naturales a nivel de cuenca (Dourojeanni, 2002).

La cuenca es reconocida hoy en día como la unidad territorial más adecuada para la gestión eficiente de los recursos hídricos, sin embargo, los límites políticos/administrativos no siempre coinciden con los límites territoriales de las cuencas. Esto, hace difícil el proceso de aprovechamiento del ciclo hidrológico, y particularmente el agua, donde los habitantes no consideran la interrelación que se requiere para un proceso integral de aprovechamiento y gestión del agua (Dourojeanni, 2002).

Cargas contaminantes tóxicas, presentes en agua de consumo y difíciles de tratar hace que las tecnologías no convencionales sean consideradas como una alternativa eficaz y sostenible para garantizar agua segura en países en desarrollo. La eliminación de metales pesados en cuerpos de agua ha llevado a la publicación de una gran cantidad de artículos e informes sobre métodos de eliminación de metales pesados de las aguas superficiales y subterráneas (Hashim et al., 2011).

Para Intaraburt et al., 2022, la escasez de agua es reconocida como una amenaza presente y futura para el ser humano, como consecuencia, la nueva tendencia es recuperar agua de las aguas residuales o del mar a través de tecnologías apropiadas como la filtración por membranas. Sin embargo, la viabilidad financiera suele ser una preocupación en los proyectos de recuperación de agua.

Varios autores como Chung et al., 2012, Khulbe y Matsuura, 2018 y Ray et al., 2018b coinciden de que la Osmosis Inversa (OI) es la tecnología más avanzada utilizada para la desalinización de agua en el mundo, debido a su alta eficiencia, flexibilidad y facilidad de operación. Sin embargo, Saravanan et al., 2021 y Sablani et al., 2001 señalan que La OI se ha convertido en una herramienta con aplicaciones industriales y actualmente se profundiza en su investigación con el objetivo de orientar este proceso hacia la sostenibilidad. Conduciendo, a la mejora de la eficiencia energética y económica con avances en los materiales. Para una adecuada evaluación de la OI es necesario aplicar modelos idóneos que permitan interpretar el comportamiento del sistema y verificar la eficiencia y eficacia de las membranas en el rechazo de los contaminantes (Villena, et al. 2022).

Palé et al. (2021) señalan que la gestión sostenible de los recursos naturales en un mundo cada vez más poblado es un desafío, más aún cuando las asimetrías de información y los conflictos de intereses exacerbaban las tensiones entre las partes interesadas. También indican que, al reducir las asimetrías de información, los sistemas mejoran el abastecimiento y distribución de agua y mitigan los conflictos relacionados con este recurso. En otra investigación, Ogada et al., 2014 afirma que las interacciones en una cuenca están guiadas por el interés y ámbito de influencia de los actores, quienes han promovido la participación en la implementación de un marco de gobernanza colaborativa del agua.

1.1. Problemática ambiental en Tarija

La problemática ambiental de los últimos años gira en torno a los recursos hídricos de la cuenca del río Guadalquivir centrados en temas fundamentales que son importantes puntualizarlos (Copa y Villena, 2016).

- Balance Hídrico actualizado, utilizando modelos hidrológicos idóneos a la zona y que permita analizar escenarios hídricos, sociales y ambientales futuros para los próximos años.
- Disminución de la carga contaminante del río Guadalquivir y sus principales afluentes, orientados a lograr un abastecimiento de agua sostenible, responsable y sin riesgos para la salud.

- Lograr que el río Guadalquivir pueda mostrar nuevamente niveles de agua y caudales ecológicos estables en su ciclo hidrológico con fines de preservación y conservación ambiental, turismo, recreación y ocio.
- Falta de consensos y trabajo conjunto entre instituciones y sociedad para concretar soluciones a la demanda y realidad económica de la población tarijeña. Propuestas de lineamientos estratégicos con enfoque en desarrollo sostenible para afrontar los efectos del cambio climático.
- La implementación de proyectos y tecnologías eficientes para el tratamiento de agua de consumo. Disminución de carga contaminante y aumento de caudales en el sistema de abastecimiento de agua potable.

Durante estos últimos años se ha abierto un debate social y político en el departamento de Tarija sobre la forma más adecuada de mitigar y disminuir el constante proceso de degradación y contaminación de sus acuíferos, así como la mejor manera de superar las dificultades en el acceso al agua potable.

Muchos ciudadanos sufren problemas de abastecimiento en la ciudad de Tarija. Como consecuencia, en épocas de sequía se explotan nuevos acuíferos, pero sin la correcta monitorización ni evaluación de su sostenibilidad. La falta de recursos hídricos se agrava con diversas actuaciones como son la sobreexplotación de áridos, la disposición de residuos sólidos en las márgenes del río o el tratamiento ineficiente de aguas residuales urbanas.

Aunque la ciudad de Tarija dispone de un sistema de alcantarillado público, no se tiene constancia ni del caudal ni del grado de contaminación de los vertidos de aguas residuales urbanas y su impacto en el entorno. Las obras hidráulicas realizadas en el pasado para la recogida, embalsamiento y potabilización de agua en la represa de San Jacinto no se han mostrado eficaces debido a la sospecha de contaminación de metales pesados.

La nueva infraestructura de almacenamiento de agua en la represa de Huacata no dispone en estos momentos de un sistema de distribución del agua a las zonas de mayor densidad urbana de la cuenca del río Guadalquivir. Además, existen dudas sobre la calidad del agua almacenada debido a la posible presencia de metales pesados en la subcuenca donde se ha realizado la obra.

Asimismo, los datos sobre la calidad de las aguas naturales en toda la cuenca son muy escasos. Tampoco existen datos fiables sobre las fuentes naturales o antropogénicas de contaminación en la cuenca.

Por otra parte, la información sobre las características de los suelos, pluviometría o sobre caudales circulantes es muy escasa. Ello impide realizar con menor incertidumbre los balances hídricos en la zona de estudio.

Existen diversos informes procedentes sobre la gravedad de la situación ambiental en Bolivia. Su contenido plantea tres grandes problemas:

- 1) El impacto del cambio climático sobre la agricultura y los reservorios de agua.
- 2) La contaminación producida por la actividad minera, agrícola e hidrocarburífera.
- 3) La expansión de las zonas agropecuarias.

Estos problemas tienen un efecto directo sobre el acceso a los alimentos y los servicios básicos de suministro de agua potable (LIDEMA, 2014).

El "Informe Final de Preparación del Perfil Ambiental de Bolivia" desarrollado por la delegación de la Unión Europea en Bolivia en el 2011 (UE, 2011), identifica las regiones petroleras del sur como zonas con grave daño ambiental. Estas zonas han tenido además un fuerte crecimiento poblacional en los últimos años producto de la migración. Esto, originó un fuerte incremento de la presión sobre los acuíferos debido al aumento de las zonas urbanas, la generación de aguas residuales, la explotación de los recursos hídricos y minerales (agregados). Son focos de contaminación hídrica y ambiental que han afectado especialmente la cuenca alta del río Guadalquivir en el departamento de Tarija.

1.1.1. Población en la zona de estudio

Según el censo de población y vivienda celebrado en Bolivia el año 2012 por el Instituto Nacional de Estadística [INE], 2012, el departamento de Tarija cuenta con una población total de 483.518 habitantes distribuida entre sus 5 provincias y 11 municipios.

La provincia Cercado, y en especial, el Municipio de Tarija circunscrito dentro la Cuenca del Guadalquivir cuenta con 205.375 habitantes, de los cuales 179.561 están en el área urbana y 25.814 en la zona rural. San Lorenzo, perteneciente a la provincia Méndez tiene 23.863 habitantes, de los cuales sólo 3.401 viven en el área urbana y 20.462 en el área rural (INE, 2012).

1.2. Disponibilidad de agua

El análisis y definición de la oferta y demanda actual del agua para uso de abastecimiento de agua de consumo humano y para riego en la cuenca de estudio, se realiza en función a las fuentes actuales con las que se cuenta en los municipios y el estado de operación de estas.

1.2.1. Oferta de agua actual: Fuentes de abastecimiento de agua para potable y riego en la cuenca del Guadalquivir

El Plan Departamental del Agua de Tarija, (2013), el Plan Maestro Integral de Agua y Saneamiento del Valle Central de Tarija, (2015) y el informe de la Memoria Anual (2016) de la Cooperativa de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado de Tarija, COSALTT, 2016, establecen las siguientes fuentes abastecimiento de agua para consumo humano y riego dentro la cuenca del Guadalquivir.

1.2.1.1 Fuentes de abastecimiento de agua en el municipio de Tarija

La tabla 1 detalla las fuentes de agua que actualmente se disponen para el abastecimiento a la población del Municipio de Tarija, así como los caudales de oferta.

Tabla 1: Fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano en el Municipio de Tarija

Fuente	Tipo	Lugar	Producción	Observaciones
Rincón de la Vittoria	Superficial	Río La Vittoria	241.3 l/s (máximo), 90 l/s (estiaje)	Presa derivadora y galería filtrante
Las Tipas	Superficial	Río Guadalquivir	75.56 l/s	Bombeo desde el río
Erquis	Superficial	Río Erquis	28.78 l/s	Galería filtrante
San Jacinto	Superficial	Presa San Jacinto	260 l/s	Bombeo: Actualmente no se utiliza por contaminación
Huacata	Superficial	Presa de Huacata	260 l/s	Actualmente no se utiliza por contaminación y falta de obras complementarias
Pozos	Subterránea	Varios barrios del Municipio	192.47 l/s	Funcionan parcialmente dependiendo de la época de estiaje

Fuente: Elaboración propia en base a datos de COSALTT, 2016.

1.2.1.2. Fuentes de abastecimiento de agua en el municipio de San Lorenzo

En la tabla 2 se detallan las fuentes y caudales de abastecimiento del municipio de San Lorenzo.

Tabla 2: Fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano en el municipio de San Lorenzo

Fuente	Tipo	Lugar	Producción	Observaciones
La Queñua 1	Superficial	San Lorenzo	3.79 l/s	Toma directa de río
La Queñua 2	Superficial	San Lorenzo	3.79 l/s	Toma directa de río

Fuente	Tipo	Lugar	Producción	Observaciones
Pajchani	Subsuperficial	San Lorenzo	135.76 l/s	Galería filtrante
Vertiente Justo Avila	Superficial	San Lorenzo	0.37 l/s	

Fuente: Elaboración propia en base al informe de COSALTT, 2016.

1.2.2. Demanda de agua.

El presente proyecto considera como demanda principal la requerida para agua potable y riego en la cuenca de estudio.

1.2.2.1. Demanda de agua potable

La tabla 3 y tabla 4 muestran la demanda de agua proyectada hasta el 2036, elaborada por el Ministerio de Medio Ambiente y Aguas dentro de lo que es el Plan Maestro Integral de Agua y Saneamiento del Valle Central de Tarija, (2015).

Tabla 3: Demanda de agua en el municipio de Tarija

Año	Usuarios *	Hab/con	Población servida (hab)**	consumo (m ³ /mes*C)	LPPD	consumo (m ³ /año*hab)	Observación
2007	26018	5.94	154547	24.34	134.72	49.17	Histórico
2008	27281	5.94	162049	25.29	139.98	51.09	
2009	28618	5.94	169991	26.53	146.84	53.60	
2010	29977	5.94	178063	25.57	141.52	51.66	
2011	31282	5.94	185815	24.44	135.27	49.37	
2012	31702	5.94	188310	23.67	131.01	47.82	
2016	33108	5.94	196659	40.7	225.00	82.13	Proyectado
2021	42315	5.94	251348	37.0	205.00	74.83	
2026	55230	5.94	328069	34.9	193.00	70.45	
2031	70918	5.94	421255	32.7	181.00	66.07	
2036	75716	5.94	449752	31.6	175.00	63.88	

Fuente: Plan Maestro Integral de Agua y Saneamiento del Valle Central de Tarija, (2015).

Tabla 4: Demanda de agua en el municipio de San Lorenzo

Año	Usuarios (conex)*	Hab/con	Población servida (hab)**	consumo (m ³ /mes*conex)	LPPD	consumo (m ³ /año*hab)	Observación
2012	473	5.94	2812	17.2	95.00	34.68	Proyectado
2016	574	5.94	3407	18.2	101.00	36.87	
2021	686	5.94	4074	19.5	108.00	39.42	
2026	818	5.94	4859	21.1	117.00	42.71	
2031	927	5.94	5505	22.8	126.00	45.99	
2036	1050	5.94	6237	24.4	135.00	49.28	

Fuente: Plan Maestro Integral de Agua y Saneamiento del Valle Central de Tarija, (2015)

* conex = conexión, se considera como usuario a las conexiones en predios de consumo, es decir 1 usuario 1 conexión.

** hab = habitante

1.2.2.2. Demanda de agua para riego

La tabla 5 detalla la estimación de la demanda de agua para riego para las subcuencas correspondientes a la alta cuenca del Guadalquivir (MMAyA, 2018).

Tabla 5: Demanda de agua para riego

Subcuenca	Área cultivo (Km ²)	Demanda de riego (m ³ /año)
Canasmoro	5.3	1.970.000
Sella Quebrada	2.6	1.395.000
Tarija Ciudad	77	23.950.000
Obrajes	36	13.960.000
Tolomosa	45	5.335.000
San Jacinto 1	5	1.880.000
San Jacinto 2	5	1.795.000

Fuente: Elaboración propia, en base al Balance Hídrico del Guadalquivir (MMAyA, 2018)

1.2.3. La hidrológica e hidrografía de la cuenca del Guadalquivir

Cualquier estudio hidrológico requiere de una adecuada interpretación y medición de las variables que conforman el ciclo hidrológico y su interrelación entre los diferentes procesos (Villón, 2002). Sin embargo, existen variables hidrológicas que son complejas de medir e interpretar. Ejemplo de ello son las abstracciones hidrológicas que dependen del proceso de medición, información y recolección de datos físicos y geomorfológicos de la cuenca. En este contexto, los modelos hidrológicos representan las herramientas más eficientes para analizar, conocer y medir el comportamiento del ciclo hidrológico y las abstracciones, bajo estas circunstancias (Villena et al., 2018, Villena et al., 2021).

La modelación hidrológica es fundamental para cualquier diseño y operación de estructuras hidráulicas, abastecimiento de agua, tratamiento y disposición de aguas residuales, irrigación, drenaje, generación hidroeléctrica, control de inundaciones, navegación, erosión y control de sedimentos (Chow et al., 1994). Por otro lado, el control de salinidad, disminución de la contaminación, uso recreacional del agua y protección de la vida terrestre y acuática son también temas de interés en la hidrología.

1.2.3.1. Hidrografía de Tarija

El Departamento de Tarija pertenece a la cuenca del Plata siendo esta la segunda más importante del continente americano que están tributadas por Brasil, Bolivia, Argentina, Uruguay y Paraguay cuyas aguas llegan al océano Atlántico. Tarija conforma al mismo tiempo dos subcuencas muy importantes, la cuenca del río Pilcomayo y la del Bermejo (Millarez, 2012).

La subcuenca del río Pilcomayo es una vertiente que se origina en las elevadas montañas de la cordillera de Los Andes, y que a través de una extensa zona de montañas, valles y

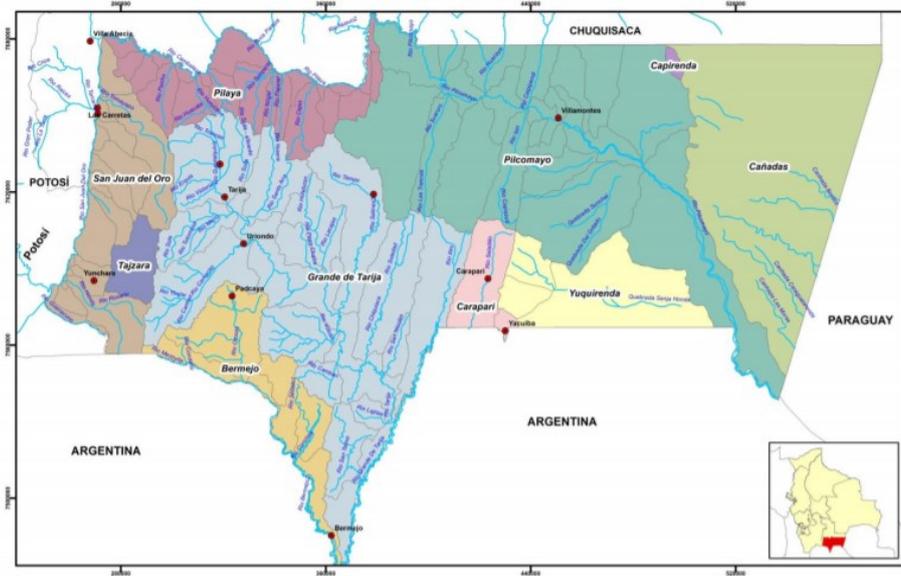
serranías desemboca en la llanura chaqueña constituyéndose en el caudal más importante de esta región (Millarez, 2012).

El río Pilcomayo termina su recorrido por el sub andino en la región aledaña a Villamontes, para recorrer el extremo sur del Chaco en el departamento de Tarija, y finalmente abandonar el territorio de Bolivia en el punto tripartito Bolivia Argentina y Paraguay. La importancia económica del río Pilcomayo, está basada en la pesca del sábalo, que constituye una importante actividad en la región (Millarez, 2012).

Por su parte, la subcuenca del Bermejo se encuentra situada en la región de los valles del sur, principalmente en el departamento de Tarija. Su extensión territorial es relativamente pequeña y su recorrido en territorio boliviano es en su mayor parte fronterizo con la república de Argentina. Tiene dos grandes afluentes, una a través de importantes tributarios desde el valle de Padcaya y la frontera argentina, como los ríos Orosas, Condado, Yerba Buena y Salado, formando con estos el caudal que recorre el extremo oriental de la cuña territorial al sur del departamento de Tarija.

Por otra parte, un importante número de tributarios nacen de la cordillera de Sama y las serranías hacia el Chaco, desde el valle de Tarija. El río Guadalquivir recibe numerosos tributarios menores para luego constituirse en el río Grande de Tarija. En su recorrido, atraviesa las serranías recibiendo a su vez tributarios como Salinas, Chiquiacá, San Nicolás San Telmo, y desde la llanura chaqueña formando frontera con la Argentina el río Itau. Finalmente, el río Grande de Tarija confluye en el Bermejo en el extremo sur denominado Juntas de San Antonio, desde donde se interna a territorio argentino, para aguas abajo, hacia el sur junto al río Teuco, unirse al río Paraguay (Millarez, 2012). La figura 1 muestra las subcuencas e hidrografía del departamento de Tarija.

Figura 1: Mapa Hidrográfico y Cuencas del Departamento de Tarija



Fuente: Plan Departamental de Agua de Tarija, 2013

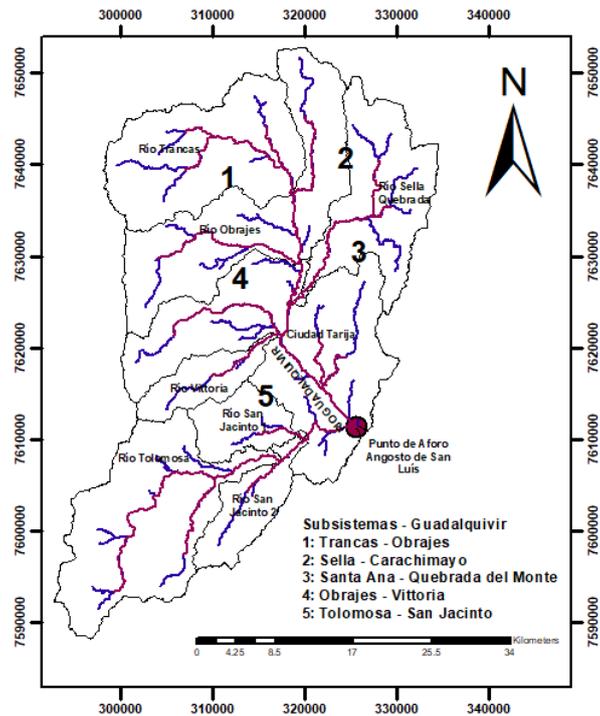
1.2.3.2. La Cuenca del Guadalquivir

La cuenca del río Guadalquivir, tiene como centro poblacional la ciudad de Tarija, esta se encuentra conformada por las siguientes subcuencas (Organización de los Estados Americanos [OEA], 1997).

- San Lorenzo – Victoria
- Sella – Carachimayo
- Santa Ana - Del Norte
- Tolomosa
- Uriondo (Concepción)

La cuenca del Guadalquivir es conocida también como la cuenca del valle central de Tarija y abarca los municipios de San Lorenzo, Cercado, Padcaya y Uriondo. El río Guadalquivir tiene una longitud de 70 Km (aproximadamente) que nace en la parte alta de la serranía de Sama, río Trancas, hasta el angosto de San Luis, la figura 2 muestra el mapa hidrográfico de la alta cuenca del Guadalquivir.

Figura 2: Mapa hidrográfico de la alta cuenca de Guadalquivir

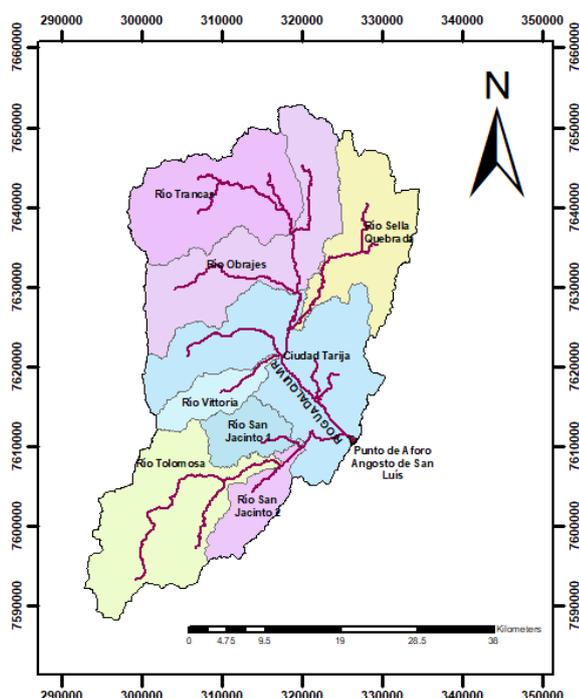


1.2.3.3. La Alta cuenca del Guadalquivir

Siendo ésta la cuenca de estudio del presente proyecto se ubica al noroeste del Valle central de Tarija, y está conformada por los ríos Calama, Erquis, Victoria y Pajchani, teniendo como centros poblacionales de estudio a San Lorenzo y Tarija, (Programa Estratégico de Acción – [PEA], 1999). La figura 3 muestra el mapa y los tramos del río de la alta cuenca del Guadalquivir.

- Trancas – Canasmoro
- Canasmoro – San Lorenzo
- San Lorenzo – Tomatitas
- Tomatitas – Obrajes
- Obrajes – San Pedro
- San Pedro – Torrecillas
- Torrecillas – Angosto de San Luís

Figura 3: Mapa de la alta cuenca del río Guadalquivir



1.2.3.4. Información hidrometeorológica

El manejo de la información hidrológica e hidrométrica requiere de una asistencia permanente y especializada para la recolección y procesamiento de la información. El riesgo de las obras de ingeniería proyectadas a partir del estudio hidrológico está relacionado con la consistencia de la información y el manejo oportuno de la misma (Villena et al., 2018a y Villena et al., 2018b).

La información hidrológica se utiliza para entender mejor estos procesos y como información de entrada en modelos de simulación hidrológica para diseño, análisis y toma de decisiones. (Chow et al., 1994).

El manejo integral del agua en cuencas hidrológicas requiere parámetros confiables, históricos y recientes para realizar una buena gestión de los recursos hídricos. Ante la escasez de información específica, los estudios de hidrología y edafología experimental son útiles para cuantificar de manera confiable los recursos hídricos de una cuenca (Gonzales et al., 2007).

La Ingeniería está asociada a la necesidad de la predicción de variables hidrológicas y que numerosas técnicas de predicción podrían perder su validez rápidamente dado que, no podrían predecir correctamente bajo las nuevas condiciones hidrológicas asociadas con el “calentamiento global”, (Dawdy, 2007).

Si mencionamos el comportamiento de las precipitaciones en la zona altiplánica de Bolivia en los últimos 50 años, se observa una disminución del 50% en la temporada de agosto y un aumento en la temporada de lluvias en un 37%. En las tierras bajas por el contrario se observa una disminución de hasta un 39% de la precipitación en épocas lluviosas. (Agrobolivia, 2011).

El Chaco Boliviano presenta una fuerte disminución en la época de estiaje y un leve aumento en la época de lluvias, mientras que en los valles en la época de lluvias se incrementa en mayor proporción (Agrobolivia, 2011).

Bolivia, cuenta con 1014 estaciones meteorológicas abiertas, pero solamente 226 permanecen en actividad de acuerdo con el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia [SENAMHI], 2019. En el valle central de Tarija se cuentan 27 estaciones hidrológicas de las cuales sólo 16 estaciones se encuentran dentro de la cuenca del Guadalquivir y 11 fuera de la misma.

1.2.3.5. Datos de uso de suelos en el balance hídrico

Alvarado, (2017) y la UNESCO, (1981), señalan que los estudios del balance hídrico en cuencas hidrográficas se basan en la aplicación del principio de balance de masa. Establecen que para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier período de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada y las variables que influyen en el balance hídrico con las siguientes.

- Meteorológicas: precipitación, temperatura, radiación solar, viento, etc.
- Geofísicas: cubierta vegetal, pendiente, textura e infiltración del suelo, etc.

La estructura de los suelos puede describir la disposición de la parte sólida y los espacios o poros entre ellos (Marshall, 1979). Los espacios o poros vacíos entre los granos del suelo permiten que el agua fluya a través de ellos, lo que permite determinar la cantidad de agua infiltrada entre ellos (Das, 2004). La infiltración es un proceso clave en la hidrología, ingeniería agrícola y civil, diseño de riego y conservación de suelos y aguas. Es complejo, dependiendo de las propiedades de caída del suelo y las condiciones iniciales y de contorno dentro del dominio de flujo (Assouline, 2013). Horton, (1940) define la capacidad de infiltración como la tasa máxima a la cual un suelo, bajo ciertas condiciones, absorbe la lluvia que cae y varía con el tiempo, especialmente durante el período inicial de la lluvia. También señala que la tasa de infiltración depende de las condiciones de la superficie del suelo, mientras que otros autores como Parr y Bertrand, (1960) indican que la infiltración depende de la masa del suelo, independientemente de las condiciones de la superficie.

El conocimiento de los mecanismos de movimiento del agua en los horizontes superficiales del suelo ocupa un lugar dominante en muchas áreas de investigación, como la agronomía,

la ingeniería civil, la hidrología y las ciencias ambientales (Filgueira et al., 2006). Sihag et al., (2017), indican que una de las tareas de la gestión del agua es calcularla y controlarla. En consecuencia, estos procesos dependen de la conductividad hidráulica del suelo que se determinará en el campo o en el laboratorio.

Mientras que Lakzian et al., (2010), Emami et al., (2012), Kaikhajesh et al., (2012) y Fereshte, (2014) indica que la medición directa de la conductividad hidráulica del suelo es difícil, costosa y que también requiere mucho trabajo y tiempo. Kargas et al., (2018) señala que los infiltrómetros de disco, entre otros aparatos experimentales utilizados in situ, se han utilizado ampliamente en las últimas décadas y permiten conocer el comportamiento hidráulico del suelo y la capacidad de absorción de las capas superiores como factores esenciales en el modelado hidrológico.

La tasa de infiltración expresada en pulgadas por hora o centímetros por hora es la tasa a la que el agua ingresa al suelo en la superficie. Si el agua se inunda en la superficie, la infiltración ocurre a la tasa de infiltración potencial, por ejemplo, la infiltración de lluvia es menor que la tasa de infiltración potencial, entonces la tasa de infiltración real también será menor que la tasa potencial (Chow et al., 1994).

La información hidrológica en la cuenca del Guadalquivir con respecto a las características y uso de los suelos es muy escasa. Esto, genera mayor incertidumbre en la modelación del balance hídrico.

Parte importante de la presente tesis doctoral ha sido la investigación de las propiedades de los suelos. Ha permitido obtener parámetros de infiltración que mejora considerablemente la modelación del balance hídrico, reduciendo el grado de incertidumbre. (Villena et al., 2019a, Villena et al., 2019b y Villena et al., 2019c). Los resultados se muestran más adelante.

1.2.3.6. Balances hídricos en Bolivia y Tarija

En 1992 se publicó el estudio del balance hídricos superficial de Bolivia realizado en el marco de los acuerdos establecidos entre el Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación [ORSTOM], el Instituto de Hidráulica e Hidrología de la Universidad Mayor de San Andrés [IHH/UMSA] y el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de Bolivia (Roche et al., 1992).

El 2012, el Ministerio de Medio Ambiente y Agua a través del Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego de Bolivia presentó el Balance Hídrico Superficial de Bolivia. Ha sido elaborado por la empresa consultora española INYPSA como parte del Contrato de Asistencia Internacional de la Delegación de la Unión Europea en Bolivia al Programa de Apoyo Sectorial

al Plan Nacional de Cuencas [ASPNC] (Ministerio de Medio Ambiente y Aguas, 2012). La simulación ha sido realizada con el modelo de Témez y el software CHAC.

El 2018, El Ministerio de Medio ambiente y Agua de Bolivia presentó el balance hídrico superficial de la cuenca del Guadalquivir (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2018) en el marco del programa nacional de cuencas a través de la empresa consultora HELVETAS Swiss Intercooperation cuyo proceso de modelación utilizó el modelo semidistribuido del WEAP.

1.3. La Calidad del agua en la cuenca del Guadalquivir

El aumento de la contaminación proveniente de diferentes actividades antropogénicas ha causado que la calidad del agua para consumo sea cada vez más escasa en diferentes partes del mundo (Chen et al., 2021; Mora et al., 2021; Runkel et al., 2021). Bolivia, ha tenido un importante crecimiento poblacional y un desarrollo poco organizado que ha originado un proceso creciente y sostenido de contaminación hídrica en varias zonas del País (Garrido et al., 2017; Quaghebeur et al., 2019).

Algunos metales pesados como el cobre, zinc, manganeso, hierro y cobalto juegan un papel importante en los procesos bioquímicos del cuerpo humano. Sin embargo, la exposición excesiva a estos iones metálicos puede provocar impactos peligrosos. Otros metales pesados como el arsénico, cadmio, plomo, mercurio y cromo son tóxicos, incluso a niveles traza porque no son biodegradables y pueden bioacumularse en los principales sistemas del cuerpo humano (Zak, 2012). Aparte del riesgo que los contaminantes metálicos tóxicos presentan a la salud pública, también son un desafío actual para el desarrollo e implementación de diferentes tratamientos de agua avanzados (Abdullah et al., 2019).

1.3.1. La contaminación por metales pesados en Bolivia

Bolivia se encuentra entre los países con mayor disponibilidad de agua dulce a nivel mundial. Sin embargo, muchas de sus fuentes naturales se ven afectadas por actividades antropogénicas, como la minería. El agua está íntimamente vinculada a la salud pública y es fundamental para lograr el desarrollo sostenible. Es necesario preservar los recursos hídricos diseñando y validando programas de monitoreo que ayuden a controlar la calidad de las fuentes que abastecen importantes núcleos de población (Alvizurí, et al. 2022).

El "Informe Nacional sobre la Gestión del Agua en Bolivia" (Mattos, 2000) señala que la mayor parte de la actividad minera en Bolivia se desarrolla en las vertientes endorreicas y áreas superiores del río de la Plata, ya que casi todos los yacimientos mineros explotados están ubicados en esta cuenca. Los depósitos de estaño existen en forma de casiterita o en forma de minerales de sulfuro de estaño, relacionados con otros metales como el zinc, manganeso,

plomo y plata. Esto, genera contaminación a los ríos por descargas de las aguas empleadas en la extracción y procesamiento o por erosión y disolución de las escorias de las minas. Algunas de estas minas se ubican en los confines del Altiplano cerca a la divisoria continental de aguas, vertiendo éstas a la cuenca del río Amazonas y a la del río de La Plata. Además, la información sobre el flujo de aguas subterráneas afectadas es escaso. También, conviene resaltar que no se dispone de información precisa de los vertidos en las aguas superficiales por la minería de socavón o por el drenaje ácido de la minería a tajo abierto.

En Bolivia, la falta de información sobre las fuentes naturales y antropogénicas de contaminación por metales pesados y, las dudas sobre el grado de presencia de estos compuestos en los cuerpos de agua han supuesto la clausura de diversas fuentes y reservorios de agua. Si bien es sabido que la minería en Bolivia puede estar causando la contaminación de sus fuentes de agua con metales pesados existen muy pocos estudios al respecto.

Se han publicado algunos resultados relacionados con la contaminación por metales pesados provenientes de fuentes naturales o de las aguas de escorrentía de la minería. Se ha estudiado la eliminación de metales pesados de las aguas de arrastre de lluvia procedentes de minería del Cerro de Potosí utilizando lechos de arcillas (Strosnider, 2010). En la cuenca del lago Poopó, una de las cuencas bolivianas más afectadas por el estrés hídrico se estudiaron las fuentes de contaminación de metales pesados procedentes de la minería (Ramos Ramos et al., 2012). Previamente, un trabajo diferente proponía una metodología para la evaluación de la contaminación minera en el río Pilcomayo que fue publicada en la Biblioteca Virtual de Salud Pública (Medina, 2005).

1.3.2. La contaminación por metales pesados en Tarija

En la cuenca alta del río Guadalquivir se han realizado muy pocos estudios sobre la presencia de metales pesados o sobre la calidad de sus aguas. Investigadores de Bolivia y de la Universidad de Sevilla publicaron en la Biblioteca Virtual de Salud Pública un análisis de la calidad del agua de la Presa de San Jacinto en Tarija en base a informes preliminares de los cuales no queda constancia de su publicación (Medina et al., 2006). Dicho análisis pone de manifiesto la falta de información veraz sobre el estado y calidad de los cuerpos de agua potable en el entorno.

La falta de instalaciones apropiadas para la potabilización de las aguas provenientes de los acuíferos más importantes en la región ha llevado en algunos casos al desabastecimiento de las poblaciones o al uso de fuentes de dudosa calidad.

Siendo un objetivo fundamental de la presente tesis doctoral, entre mayo del 2018 y septiembre del 2019 en colaboración con la Universidad Católica Boliviana y la Universidad Politécnica de Valencia se realizó el monitoreo de distintas fuentes de agua en la cuenca. Se realizaron las analíticas químicas para determinar los parámetros básicos de la calidad del agua y la presencia de metales pesados en muestras tomadas en la cuenca alta del río Guadalquivir. La tabla 6 detalla los puntos de muestreo ejecutados en el proyecto. En los anexos se detallan los resultados obtenidos.

Tabla 6: Puntos de muestreo realizados en el monitoreo de la calidad de agua

Nro.	Lugar	Nro.	Lugar
1	Angosto de San Luís	9	Embalse San Jacinto: Punto 4
2	Río Guadalquivir: salida quebrada San Pedro	10	Embalse San Jacinto: Punto 5
3	Rincón de la Vittoria: Obra de toma	11	Embalse Huacata: Punto 1
4	Río Guadalquivir: Toma de agua Las Tipas	12	Embalse Huacata: Punto 2
5	Río Guadalquivir: cruce con río Corana	13	Embalse Huacata: Punto 3
6	Embalse San Jacinto: Punto1	14	Embalse Huacata: Punto 4
7	Embalse San Jacinto: Punto 2	15	Embalse Huacata: Punto 5
8	Embalse San Jacinto: Punto 3		

Fuente: Elaboración propia

1.3.3. La contaminación por metales pesados y su legislación

En general se considera la presencia de metales pesados en las aguas como asunto de salud pública que requiere de atención y tratamiento. El término "metal pesado" se aplica al grupo de metales y metaloides con densidad atómica mayor que 4000 kg.m^{-3} , siendo componentes naturales de la corteza terrestre. Aunque algunos de ellos actúan como micronutrientes esenciales para los seres vivos, en concentraciones altas pueden provocar graves intoxicaciones (Srivastava, 2008). Debido a su movilidad en los ecosistemas acuáticos y su toxicidad para las formas de vida superiores, los metales pesados en los suministros de aguas superficiales y subterráneas han sido priorizado como contaminantes inorgánicos principales en el medio ambiente (Thayer, 1982).

Los metales pesados son considerados tóxicos o peligrosos para la salud humana en función de su concentración (Durube et al., 2007). La intoxicación por metales pesados puede deberse a la contaminación del agua potable, por ejemplo, tuberías de Pb, desechos de la industria y del consumidor, o, por la ingesta a través de la cadena alimentaria o altas concentraciones en el medio atmosférico en las proximidades de un medio emisor.

Durube et al., (2007) señala que las aguas subterráneas pueden contaminarse con metales pesados procedentes de aguas residuales, lixiviados de vertederos y de relaves de minas. Indica también que la eliminación de desechos líquidos en pozos profundos, las filtraciones de lagunas de desechos industriales, derrames y fugas industriales son factores de

contaminación. Por su parte, Boyd, (2010) asegura que la presencia de metales pesados en el agua puede alterar profundamente el equilibrio químico ambiental con importantes efectos nocivos en los hábitats naturales.

Aunque la intoxicación por metales pesados podría diagnosticarse clínicamente y tratada médicamente, la mejor opción es prevenir la contaminación por metales y el consiguiente envenenamiento humano. (Duruibe et al., 2007).

Muchos países en desarrollo se enfrentan al desafío de reducir la exposición humana a metales pesados, principalmente debido a sus limitadas capacidades económicas para usar tecnologías avanzadas en su eliminación. En estas regiones, las fuentes de polución se relacionan con el uso de fuentes contaminadas (bien por causas naturales o antropogénicas), a los inadecuados sistemas de tratamiento o a los materiales con el que están hechas las redes de suministro. Normalmente, el origen de la contaminación de los acuíferos suele ser geogénico (como es el caso del As), bien por vertidos industriales industriales y domésticos (como es el caso del Zn, As, Pb, Cd, Ni, Cu o Cr) o por la realización de actividades mineras (como es el caso del As, Pb, Cu, Cd o Hg) (Chowdhury et al., 2016).

En países con alta reutilización de aguas residuales destinadas a consumo humano se ha apreciado también una alta concentración de metales pesados debido al efecto de acumulación propia de la reutilización (Al-Musharafi et al., 2012).

1.3.3.1 Legislación y control de calidad del agua de consumo humano

La Water-Pollution Organization, 2020, señala que la contaminación del agua producida por la actividad humana (hogares domésticos), industrial y agrícola, es una de las más importantes. Los desechos producidos ingresan al río contaminando y descargan no sólo desechos domésticos sino también metales pesados, toxinas orgánicas, nutrientes y sólidos oleosos, siendo muchas de estas materias tóxicas e incluso cancerígena. Además, estos contaminantes aumentan la concentración de sólidos en suspensión (turbidez), crecimiento de bacterias y virus, lo que conduce a fuertes impactos en la salud.

La Organización Mundial de Salud [OMS], (2011), indica claramente que los requisitos básicos para garantizar la seguridad del agua de consumo humano son un “marco” para la seguridad del agua y su protección. Deben ser establecidas por una autoridad independiente y competente en materia de salud. Asimismo, señala que las normas sobre el agua de consumo humano pueden diferir, en naturaleza y forma, entre los países y regiones, no existiendo un método único que pueda aplicarse de forma universal. La elaboración y aplicación de normas, debe tomar en cuenta las leyes vigentes relativas al agua, a la salud de cada gobierno local, así como evaluar la capacidad de cada país para desarrollar y aplicar sus reglamentos.

La seguridad del agua de consumo humano se garantiza mediante la aplicación de planes de seguridad del agua PSA. Incluyen monitoreos y verificaciones finales mediante el uso de métodos, procedimientos y pruebas que permiten evaluar la calidad del agua (OMS, 2011).

La Norma Boliviana NB 512 (2010), el Reglamento Nacional para el Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano de la NB-512, (2010) y la Norma Boliviana NB-496, (2010) para la toma de muestras en el control de agua potable, establecen los requisitos y procedimientos mínimos que se debe cumplir en la verificación y monitoreo de control de calidad en todo el estado boliviano.

El presente trabajo utiliza la normativa boliviana para la evaluación de los parámetros de calidad encontrados durante el trabajo de monitoreo. Asimismo, y con el objeto de poder obtener un marco comparativo de los distintos valores obtenidos se consideraron los reglamentos de la OMS en el World Health Organization [WHO], 2006, los reglamentos específicos establecidos por el Real Decreto [RD] 817, 2015 de España, y el de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norte América (EPA, 2006).

1.3.4. Tecnologías para la eliminación de los metales pesados en el agua

La preocupación generalizada por eliminar los metales pesados de los vertidos, los cuerpos de agua y los suelos, ha llevado a la publicación de una gran cantidad de artículos e informes sobre métodos de eliminación de metales pesados de las aguas superficiales y subterráneas (Hashim et al., 2011), residuales (Fu, 2011) y la remediación de suelos de la U.S. Environmental Protection Agency (EPA, 2017).

Algunas de las tecnologías de remediación de metales pesados en aguas de consumo más estudiadas se recogen en la tabla 7.

Tabla 7: Procesos de eliminación de metales pesados

Procesos	Ventajas	Desventajas
Precipitación química	Bien conocida Simple de aplicar	Genera fangos Puede generar subproductos peligrosos Se utilizan reactivos peligrosos
Intercambio iónico	Muy efectiva con algunos metales pesados	Costes de operación
Adsorción	Coste reducido en algunos casos Diversos tipos de adsorbentes Puede ser combinado con otros métodos	No es tan efectivo como la ósmosis inversa
Bioadsorción	Bajo costo Fácil operación Adsorción rápida	La efectividad depende de los materiales adsorbentes. Generación de biomasa con metales pesados.

Procesos	Ventajas	Desventajas
		Dificultad para separar disolventes y metales pesados.
Humedales	Costos bajos de operación y mantenimiento Requiere grandes áreas	Requiere de altos costos iniciales de construcción dependiendo de las condiciones de crecimiento de las plantas Genera biomasa con metales pesados Largo tiempo de remediación
Coagulación y floculación	Se puede tratar varios metales pesados	Requiere de otras técnicas adicionales de tratamiento para completar la eficiencia
Flotación	Tiempos de retención más cortos Alta selectividad de metales pesados	Altos costos iniciales, de operación y mantenimiento. Metodología que todavía está en desarrollo y estudios
Filtración con membranas (UF, NF y OI)	Muy efectivo Pueden recuperarse metales Reduce la concentración de otros contaminantes	Membranas caras Altos costes de operación
Fitorremediación	Bajo coste Tecnología sencilla Se pueden tratar diversos metales pesados	Depende de las condiciones de crecimiento de las plantas Los contaminantes quedan en las plantas Tiempo largo de remediación
Biorremediación	Bajo coste Tecnología sencilla Se puede combinar con otras técnicas	No es aplicable a todo tipo de metales Tiempo largo de remediación Dependen de las condiciones ambientales
Tratamiento electroquímico	Bajos costos de operación	Altos costos de inversión Alto consumo de energía
Oxidación avanzada	Sistemas con cloro, ozono, fotocátalisis	Mayor aplicación a aguas residuales

Fuente: Elaboración propia a partir de Gaikwad, (2008), Fu, (2011), Akpor, (2010), Chowdhury et al., (2016), Simate y Ndlovu, (2014), Yadav y Rajesh, (2011), Zhao et al., (2016) y Kefeni, et al. (2017). Andreozzi et al., (1999)

En la tabla 8 se detalla la eficacia en la eliminación de algunos metales pesados en aguas de consumo en función de la tecnología aplicada. La adsorción, ósmosis inversa e intercambio iónico son las que mejores resultados presentan, siendo la OI la tecnología más selectiva de todas ellas, ya que seleccionando la membrana apropiada se pueden obtener rechazos cercanos al 100%.

Tabla 8: Tecnologías aplicables a algunos metales pesados

Metales	Tecnologías						
	CL	O/A	CG	li	Pr	Ad	OI
Mn	+++	+++	++				+++
Fe		+++	++				+++
Sb*			+++	+++	+++		+++
Hg			+++		+++	+++	+++
Pb			+++		++	+++	+++

Fuentes: Elaboración propia a partir de (WHO, 2006), (Chowdhury et al., 2016) y (Ungureanu et al., 2015).

++ 50% o superior eliminación +++ 80% o superior eliminación

(*) Se consideran como aplicables las habituales para el As, aunque están mucho menos estudiadas.

Cl: Cloración

O/A: Ozonización/Aireación

CG: Coagulación

li: Intercambio iónico

Pr: Precipitación

Ad: Adsorción

1.3.5. La eliminación de metales pesados con membranas

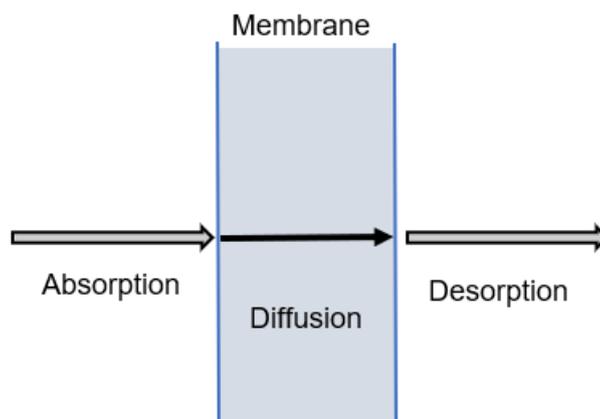
La filtración por membrana es uno de los métodos más utilizados para la eliminación de contaminantes emergentes en aguas (Judd y Bruce, 2003) y (Kim et al., 2018), incluyendo entre ellos los metales pesados (Fu, 2011).

La filtración por membrana es un proceso de separación por presión (Zhao et al., 2016). Esta tecnología es ampliamente aceptada como un medio para producir diversas calidades de agua a partir de agua superficial, agua de pozo, agua salobre, agua de mar y aguas residuales. La elección del proceso de membrana adecuado depende del tamaño de los contaminantes y aditivos eliminados del agua (Bodzek et al., 2011).

En el caso de la filtración por membranas cuya fuerza impulsora es la presión, destacan las tecnologías de ultrafiltración [UF], la nanofiltración [NF] y la ósmosis inversa [OI] (Fu, 2011).

Ismail, et al., (2019), describe el modelo de difusión de solución a través de membranas (soluto y disolvente) que ocurre en tres pasos: absorción a la membrana, difusión a través de membrana y desorción de la membrana, la figura 4 ilustra el esquema difusión de la solución.

Figura 4: Esquema difusión de la solución en membranas



Fuente: Ismail, et al., 2019

1.3.5.1. Ultrafiltración

Sobre la base del tamaño de poro (del rango de 2–50 nm) y el peso molecular de los compuestos de separación (1000–100,000 Da), la UF, es un proceso poco intensivo en energía, trabaja a bajas presiones transmembrana (1 – 10 Bar) para la eliminación de los compuestos disueltos y materiales coloidales (Zhao et al., 2016). Las partículas disueltas que son más grandes que el tamaño de poro de las membranas UF son rechazadas, mientras que los iones metálicos disueltos (en forma de iones hidratados o complejos de bajo peso molecular) pasan fácilmente (Vijayalakshmi et al., 2008).

Para obtener una alta eficiencia de eliminación de iones metálicos, se han propuesto procesos de ultrafiltración mejorada micelar [MEUF] y ultrafiltración mejorada con polímeros [PEUF] (Fu, 2011). En el proceso PEUF, los polímeros solubles en agua forman complejos con iones metálicos y forman macromoléculas con pesos moleculares más altos, que luego se retienen cuando se bombean a través de una membrana UF (Landaburu-Aguirre et al., 2009).

1.3.5.2. Nanofiltración

La NF que opera entre 10 y 70 Bar de presión, es el proceso intermedio entre UF y OI (Fu, 2011). En este proceso, los pesos moleculares de los compuestos de separación varían entre 200 y 1000 Da, con diámetros de poro que varían de 0,5 nm a 2 nm (Khedr, 2008). La aplicación de procesos de NF para el tratamiento de aguas recientemente ha llamado la atención debido a su alta capacidad de retención de sales y metales (Kefeni et al., 2017).

En la tabla 9 se resumen las eficiencias en la eliminación de metales pesados en aguas residuales usando UF, OI y NF. Se puede observar que, salvo en el caso del Cr y el As, los

porcentajes de eliminación de metales pesados reportados por los investigadores superan en todos los casos el 90%.

Tabla 9: Eficacia de los tipos de tratamiento con membrana en metales pesados

Metal	Tipo de tecnología	Eficiencia eliminación %
Pb ²⁺	MEUF	> 99
As(VII)	MEUF	19
As(V)	OI	91-99
As(III)	OI	20-55
Cd ²⁺	MEUF	92-98
Zn ²⁺	MEUF	92-99
	OI	99.3
Ni ²⁺	MEUF	98.6
	PEUF	99.1
	OI	99.3
Cu ²⁺	PEUF	94-99.5
	NF	47-66
	OI + NF	95-99
Cr(III)	PEUF	82-100
Cr(VI)	PEUF	82-100
	NF	99.5
Cd ²⁺	PEUF	99

MEUF: Micellar Enhanced Ultrafiltration

PEUF: Polymer Enhanced Ultrafiltration

Las membranas se han mostrado muy eficaces para la eliminación o reducción de concentración de metales pesados como es el caso del As, (Singh et al., 2015). El problema es que a su vez también produce grandes volúmenes de aguas residuales, y es más cara que otras tecnologías de tratamiento. En las membranas utilizadas en microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa, la separación del As depende del tamaño de los poros de la membrana. Para las membranas de micro y ultrafiltración, el tamizado mecánico es responsable de la separación, mientras que para las membranas nanofiltración y ósmosis inversa, la separación se logra a través del flujo capilar o por difusión de la disolución.

Para otros metales como el zinc, hierro y manganeso aún no se han investigado exhaustivamente en términos de su eliminación mediante tecnologías de membrana. En los últimos años, han aparecido procesos híbridos, que junto con las tecnologías de filtración por membrana han optimizado los resultados en la eliminación de metales pesados, es el caso de los Biorreactores de Membranas (MBRs) que se integran con OI en el tratamiento de aguas residuales. Los MBRs no permiten que los sólidos en suspensión penetren al final de los efluentes y, por lo tanto, los metales unidos a los flóculos de lodo son rechazados de manera efectiva (Malamis et al., 2012 y Mulyati, 2018). Por supuesto, estos sistemas híbridos aún no

se han difundido ampliamente debido a los altos costos económicos y energéticos que afectan directamente su eficiencia.

1.3.6. Ósmosis Inversa

Estudios recientes denotan que la tecnología de filtración por membrana comprende procesos prometedores para el tratamiento y la recuperación de agua para consumo (Atab et al., 2018; Kim et al., 2018; Ray et al., 2018a; Chenghan et al., 2019). Un proceso de filtración por membrana que ha atraído especial atención durante los últimos años es la OI (Chung et al., 2012; Khulbe et al., 2018; Ray et al., 2018b). La OI se ha convertido en una herramienta con aplicaciones industriales y, actualmente se profundiza su investigación con el objetivo de orientar este proceso hacia la sostenibilidad, es un proceso que opera con presiones entre 10-100 Bar (Saravanan et al., 2021).

1.3.6.1. La Ósmosis Inversa para el tratamiento de metales pesados

La OI, involucra membranas con un tamaño de poro <2 nm, funciona según el principio de exclusión de tamaño y difusión de la disolución a través de una membrana semipermeable (Greenlee et al., 2009). Una ventaja significativa de OI sobre otras tecnologías de tratamiento de agua tradicionales es la capacidad de reducir las concentraciones de otros contaminantes iónicos, así como los compuestos orgánicos disueltos (Fu, 2011). Dentro de las tecnologías de membrana, la ósmosis inversa es la tecnología más selectiva de todas, ya que al seleccionar la membrana apropiada se puede obtener cerca del 100% de rechazo para la mayoría de los cationes metálicos (Akpor y Muchie, 2010; Fu y Wang, 2011).

El uso de la OI en la eliminación de metales pesados se ha centrado en la eliminación de cationes tales como Cu^{2+} y Ni^{2+} (Mohsen-Nia et al., 2007), Cu^{2+} (Zhang et al., 2009), As (Chan y Dudeney, 2008), Ni^{2+} y Zn^{2+} (Ipek, 2005) o Zn^{2+} y Cu^{2+} (Ujang y Anderson, 1996) entre otros.

Hay pocos estudios realizados con OI con cationes como Fe, Pb y Mn. Se ha utilizado OI en la eliminación de Hg en aguas de refinerías (Urgun-Demirtas et al., 2012). Para el caso del Sb, se ha estudiado el efecto del pH en la eliminación en aguas de consumo utilizando OI con buenos resultados (Kang et al., 2000). También se ha utilizado la OI junto con un tratamiento de coagulación para reducir la concentración de As y Sb en aguas subterráneas procedentes de antiguas minas de plata (Pawlak et al. 2010). En el caso del Fe, se ha constatado con éxito la reducción de su concentración en aguas residuales procedentes de la industria de la aceituna (Ochando-Pulido et al., 2012). En combinación con otros tratamientos (humedales y ultrafiltración), la OI ha sido eficaz en la eliminación de Fe y Mn presentes en aguas de proceso en la industria de producción de acero (Huang et al., 2011).

Uno de los inconvenientes en el tratamiento de aguas ricas en Fe y Mn con OI es que la oxidación de dichas especies puede provocar óxidos insolubles que ensucien las membranas, y, por tanto, les hagan perder eficacia. Normalmente, la presencia de estos metales es baja en las aguas naturales, pero en las aguas procedentes de minería la alta concentración de estos cationes puede provocar problemas de ensuciamiento (Kucera, 2010).

Las mejoras significativas en la tecnología y el diseño de la ósmosis inversa, la disponibilidad de fuentes de energía alternativas, la posibilidad de pretratamiento y los materiales aplicados han hecho que el proceso se convierta en una fuente de agua dulce respetuosa con el medio ambiente en muchas regiones del mundo, particularmente en aquellas donde sus fuentes son limitadas (Meschke et al., 2019).

1.3.7. La evaluación y modelación en la OI.

Para comprender la separación en un proceso de membranas, es necesario construir y aplicar modelos idóneos que describan el comportamiento del sistema y las variables operativas que gobiernan el funcionamiento (Villena et al., 2022). En este ámbito, los modelos matemáticos son útiles para describir el comportamiento físico del sistema mientras que los modelos estadísticos permiten una mejor planificación y programación operativa (Villena et al., 2022).

Subramanni y Panda (2014) afirman que los modelos estadísticos de estado estacionario en RO se construyen utilizando datos de flujo, concentración y pH durante un período de tiempo. Esto indica que los modelos estadísticos son útiles para formular estrategias de control operacional en tiempo real en la planta. Por otro lado, las plantas piloto a escala de laboratorio son útiles para entender el mecanismo de separación de solutos en agua en un proceso de RO. Los modelos matemáticos del proceso integrado pueden ser útiles en el diseño y operación de plantas en varios niveles. También se observa que los modelos fenomenológicos derivados de datos de plantas en tiempo real son útiles para calcular las características de permeado y rechazo que también incorporan polarización de concentración Subramanni y Panda (2014).

Las variables de los modelos son discutidas por diferentes autores, buscando llegar a una comprensión exacta del proceso. Por ejemplo, Sherwood et al., (1967) definen los coeficientes en los modelos de difusión de solución y de solución-difusión-imperfección como funciones tanto de la presión como de la concentración. Mientras que, los coeficientes en el modelo de Kedem y Katchalsky, (1958) son relativamente insensibles a la presión y la concentración. Por otro lado, Abbas, (2016), especifica dos variables clave que deben ser monitoreadas y controladas para el correcto desempeño del sistema de OI. Uno es el caudal del producto y el segundo es la conductividad (una medida de calidad). Pero hay muchas otras variables que necesitan ser monitoreadas y/o controladas, incluyendo la velocidad de

alimentación, la temperatura de operación, la presión del permeado y la concentración de soluto.

El presente trabajo se basó en la modelación matemática como estrategia de evaluación del comportamiento físico del sistema a objeto de poder entender las variables operativas que permitirían una mejora eficiencia energética y económica para un escalamiento futuro (Villena et al., 2022).

1.3.7.1. La modelación matemática para el análisis y diseño eficiente del sistema de Osmosis Inversa.

La ósmosis inversa OI es utilizada ampliamente para la purificación y recuperación de agua, sin embargo, el fenómeno de la polarización por concentración CP sigue siendo un desafío que genera problemas en el proceso de funcionamiento como aumentos en la presión de alimentación, disminución del permeado, aumento en el consumo de energía y ensuciamiento de la membrana (Wei et al., 2021; Fritzmann et al., 2007; Qasim et al., 2019).

Chenghan y Han, 2019; Atab et al., 2018; Chung, et al., 2012; Ray et al., 2018a y Ray et al., 2018b, señalan que con el aumento de la industria y de la contaminación, la escasez del agua ha ido empeorando y, que el reciclaje del agua puede paliar este problema de forma eficaz, contribuyendo de esta manera a la sostenibilidad del desarrollo. Asimismo, indican que la tecnología de membranas es un método prometedor para el tratamiento del agua.

El desarrollo de un modelo matemático que exprese adecuadamente el rendimiento del proceso de OI es imprescindible para que el diseño final del sistema a implantar sea óptimo y eficiente. Esto, permite una reducción de costos durante su implementación Sundaramoorthy et al., (2011). En este sentido, varios modelos matemáticos han sido propuestos para describir la transferencia de masa y la permeabilidad hidrodinámica en los sistemas de OI Chenghany Han, (2019). En estos procesos de separación el transporte de agua se rige principalmente por la transferencia de masa en la membrana interna y externa que se explica con el modelo de Concentración-Difusión propuesto por Lonsdale et al., (1965), el modelo será desarrollado más adelante.

En este trabajo se estudió el proceso de concentración por polarización que sucede durante la separación de solutos por medio de una membrana de OI en aguas sintéticas con distintas concentraciones de plomo, manganeso y hierro combinadas con cloruro de sodio. Este último soluto permite una simulación de las aguas naturales en las áreas de estudio. Se desarrollará un modelo matemático, considerando las características específicas de la experimentación y la estructura de la membrana a emplear, aplicando el modelo de Spiegler y Kedem, (1966) de polarización por concentración que describe la transferencia de masa interna de la membrana. El modelo será ajustado a los efectos de la temperatura para evaluar la

variabilidad de la permeabilidad y será validado utilizando los resultados experimentales obtenidos de la planta piloto de OI montada en el campus de la Universidad Católica Boliviana San Pablo, sede Tarija.

1.4. Las Partes interesadas en la gestión del agua

Como se explicó en los puntos anteriores, actualmente la cuenca de estudio está atravesando por un proceso continuo y creciente de contaminación de las principales fuentes de abastecimiento de agua por la presencia de metales pesados. Esto, hace difícil y poco eficaz su tratamiento con métodos convencionales y reduciendo drásticamente la disponibilidad de agua potable. Ante este problema se plantea la utilización de la osmosis inversa para la remoción de estos contaminantes permitiendo la dotación eficiente y sostenida para las próximas décadas. Sin embargo, y ante la evidencia de los conflictos sociales y políticos que se suscitaron en Bolivia en los últimos años se hace necesario el análisis de las instancias que intervienen en los procesos de gestión y ejecución de obras relacionadas a los servicios básicos.

Bolivia tiene una amplia experiencia en conflictos por el manejo y gestión de los recursos hídricos, en especial el agua destinada a consumo. La ejecución de proyectos y políticas destinadas a la gestión del agua requiere de procesos y análisis previos para minimizar posibles escenarios de conflictos. En la presente investigación se describen y clasifican a los principales actores, como una propuesta inicial de modelo de gestión de partes interesadas, para lo cual se realiza un análisis cualitativo y cuantitativo.

1.4.1 Análisis cualitativo.

Pahl-Wostl, (2007), señala que la gestión integrada de recursos ambientales es una actividad útil que permite mantener y mejorar el estado de un recurso ambiental afectado por actividades humanas que están en conflicto. Indica claramente que la gestión de los recursos debe abordarse desde una perspectiva amplia, teniendo en cuenta todas las posibles compensaciones y diferentes escalas en el espacio y el tiempo.

Pahl-Wostl, (2007) indica también que la gestión integrada de los recursos hídricos se utiliza como ejemplo para proporcionar evidencia de la necesidad de implementar enfoques de gestión participativa y adaptativa. Deben ser capaces de hacer frente a la creciente incertidumbre derivada de los cambios rápidos de las condiciones socioeconómicas, cambio global y climático. La administración gubernamental debe garantizar los servicios prestados por el recurso (por ejemplo, agua para riego, pesquerías) y evitar daños (por ejemplo, inundaciones). Mantener el estado del recurso para uso de las generaciones futuras (por ejemplo, preservar los recursos de agua subterránea) pero también respetar el mantenimiento

de la integridad de los ecosistemas como un objetivo en sí mismo (por ejemplo, mantenimiento de un bien estado ecológico de los ríos).

Roger y Hall, (2003), definen a la gobernabilidad del agua o gobernanza como "el conjunto de sistemas políticos, sociales, económicos y administrativos que existen para desarrollar y gestionar los recursos hídricos y, la prestación de los servicios del agua en los distintos niveles de la sociedad.

El Programa de las Naciones Unidas (PNUD) a través del Water Governance Facility [WGF], (2020), se refiere a la gobernanza del agua como a los sistemas políticos, sociales, económicos y administrativos que influyen en el uso y la gestión del agua. Esencialmente, quienes obtiene el agua, cuándo y cómo. Además de establecer el derecho al agua, los servicios relacionados y sus beneficios. Señala que la representación y participación de diversos interesados en la toma de decisiones relacionadas con el agua y el papel del poder y la política son componentes importantes para tener en cuenta al analizar la dinámica de la gobernanza.

En otra definición la WGF, 2020, indica que la gestión del agua incluye la formulación, el establecimiento y la implementación de políticas, legislación e instituciones sobre el agua. Aclara, además, las funciones y responsabilidades del gobierno, la sociedad civil y el sector privado en relación con los recursos y servicios hídricos. Los resultados dependen de cómo actúen los interesados en relación con las reglas y los roles que se les han asignado.

Por su lado, Dourojeanni, (2001), expone cinco factores dominantes que impulsan el debate y los cambios en la gestión del agua:

- 1ro. refiere a fomentar el desarrollo sustentable que implica conciliar por lo menos metas de crecimiento económico, de equidad, y de sustentabilidad ambiental.
- 2do. es una generalizada dispersión y descoordinación institucional y legal entre múltiples organismos del estado, organismos no gubernamentales, gobiernos locales, universidades, organismos de cooperación multilateral y bilateral, y organismos internacionales que intervienen en la gestión del agua.
- 3ro. hace referencia a una abierta competencia entre usuarios del agua y de los recursos naturales de las cuencas.
- 4to. hace énfasis en privilegiar instrumentos o medios predeterminados para lograr la gestión integrada del agua.
- 5to. se observa una escasa percepción de las necesidades y alternativas de gobernabilidad para lograr la gestión integrada del agua.

Estas situaciones confirman que la gestión del agua es gestión de conflictos y los conflictos sólo pueden resolverse con sistemas estables y confiables, con reglas claras y con buenos

sistemas de información y participación para tomar decisiones adecuadas. Esto, en constante coordinación y gestión con las partes interesadas.

Freeman, (1984), define a las partes interesadas como a “Cualquier grupo o individuo que puede afectar, o ser afectado por la consecución de los objetivos de un proyecto”

Jacobs y Buijs, (2011), indican que los administradores de los recursos hídricos necesitan cada vez más tener en cuenta las opiniones de las partes interesadas. Las intervenciones deben ser planificadas considerando el manejo del agua, los lugares y las actitudes hacia las intervenciones propuestas. Asimismo, en su investigación sobre las actitudes de las partes interesadas hacia las intervenciones de gestión del agua sugiere cinco categorías de significados de lugares.

- 1ro. belleza (juicios estéticos).
- 2do. funcionalidad (formas de uso).
- 3ro. apego (sentimientos de pertenencia).
- 4to. biodiversidad (significados pertenecientes a la naturaleza).
- 5to. riesgo (preocupaciones sobre eventos actuales o futuros).

Estas categorías reflejan las dimensiones básicas del sentido y significado del lugar.

La gestión del agua es cada vez más un problema social complejo de tratar con las opiniones a menudo divergentes de las partes interesadas locales. Además, la implementación de esta estrategia política a menudo abarca intervenciones espaciales drásticas a nivel local y, por lo tanto, afecta la forma en que los habitantes locales experimentan su entorno físico Jacobs y Buijs, (2011).

En otro punto Jacobs y Buijs, (2011) señala, por ejemplo, si una agencia (institución/empresa) de agua comunica una intervención propuesta a nivel local, las partes interesadas formarán una actitud hacia esa intervención basada en sus creencias sobre las posibles consecuencias de la intervención. Donde, las actitudes y creencias constitutivas sobre las intervenciones propuestas están firmemente arraigadas en los significados que las partes interesadas asignan a los lugares en cuestión. Por lo que el conocimiento de los significados de las partes interesadas puede contribuir en gran medida a la comprensión de las actitudes de las partes interesadas. Esto va más allá de una evaluación relativamente superficial de las actitudes, siendo el apoyo local un factor crítico para una planificación espacial exitosa.

En este contexto, Jacobs y Buijs, (2011) afirman que el conocimiento de los significados de las partes interesadas puede ayudar a las agencias de agua a encontrar soluciones aceptables a nivel local y hacer frente a las actitudes públicas.

Mayers, (2005), define claramente que las partes interesadas son las personas que importan en un sistema y que el análisis del poder de estas es una herramienta que ayuda al entendimiento de cómo las personas afectan a las políticas e instituciones. Además, cómo las políticas e instituciones afectan a las personas, resultando útil para la identificación de ganadores y perdedores. Afirma que los enfoques para el análisis de las partes interesadas son.

- Desarrollo del propósito y procedimientos del análisis y un entendimiento inicial del sistema.
- Identificación de las partes interesadas claves.
- Investigar los intereses, características y circunstancias de las partes interesadas.
- Identificación de los patrones y contextos de interacción entre las partes interesadas.
- Evaluar el poder y los roles potenciales de las partes interesadas.
- Evaluar opciones y hacer uso de los hallazgos para hacer progresos.

Yang et al., (2016), proponen un análisis de las partes interesadas para delinear los principios fundamentales que subyacen en la asignación de agua en una cuenca. Trawick, (2003) utiliza un método de análisis de las partes interesadas basado en los niveles de interés e influencia en la gestión de los recursos hídricos. Los clasifica en cuatro categorías: jugadores clave, creadores de contexto, temas y multitud.

En el trabajo de Yang et al., (2016), el análisis de las partes interesadas se utiliza para apoyar el uso racional del agua en la cuenca, considerando su relevancia para la asignación del agua, el control de la contaminación, la protección del medio ambiente y el desarrollo económico.

Reed et al., (2009), detalla el cómo y por qué se debe realizar un análisis de partes interesadas para el manejo participativo de los recursos naturales. Señala que esto se logra revisando y analizando el desarrollo de los interesados en la gestión empresarial y el desarrollo y la gestión de los recursos naturales. Propone una metodología basada en la teoría, normas e instrumentos de análisis de las partes interesadas, esta metodología consiste en.

- identificar partes interesadas,
- diferenciar y clasificar a las partes interesadas e,
- investigar las relaciones entre las partes interesadas.

Lupo, (2010), a través de la definición indicada por la Overseas Development Administration [ODA] (1995a), indica que las partes interesadas son aquellas que pueden influir significativamente o son importantes para el éxito de un determinado proyecto.

En otra clasificación importante, la ODA, (1995a) y Lupo, (2010) hacen una distinción entre las partes interesadas primarias y secundarias. Las primarias son aquellas instancias que finalmente tienen una afectación positiva como los beneficiarios directos o negativa como los reasentados involuntariamente. Las secundarias son los intermediarios en el proceso de la entrega o gestión de la ayuda. Clarkson et al., (1994) categoriza a las partes interesadas de una manera diferente, señalan que las primeras corresponden a aquellas esenciales para la supervivencia y bienestar de una organización y las secundarias son las que interactúan con la organización, pero no son esenciales para la supervivencia o bienestar de esta.

Grimble y Wellard, (1997), las clasifica entre las partes activas y pasivas, siendo las primeras las que afectan a partir de una decisión o acción, mientras que las pasivas son las partes afectadas por dicha acción o decisión ya sea positiva o negativamente.

Por su parte Mitchel et al., (1997), ofrece una forma diferente y muy utilizada en la clasificación de las partes interesadas, basada en una posesión o posesión atribuida en dos o tres de los siguientes atributos.

- **El Poder** (de influir en la organización).
- **Legitimidad** (de una relación entre las partes interesadas y la organización).
- **Urgencia** (de un reclamo).

La clasificación propuesta ofrece tres clases cualitativas, la de baja relevancia que solo posee uno de los atributos y se lo denomina parte interesada latente, la clase moderadamente sobresaliente que posee dos de los atributos y los denomina como futuros interesados y, la clase más destacada que posee todos los atributos y son denominados las partes interesadas definitivas.

Lupo, (2010) indica que los atributos de poder, legitimidad y urgencia desarrollados por Mitchell et al., (1997) son claros y bien definidos que toman en cuenta la gestión y vida de la organización más que un campo netamente empresarial. Los atributos son una parte de la vida diaria y, por lo tanto, afectan la relación entre los diversos actores en casi todas las situaciones y problemas de la sociedad moderna.

Asimismo, Lupo, (2010) indica que la Directiva Marco del Agua [Directiva 2000/60 / EC, DMA] adopta esta nueva idea de participación de las partes interesadas (en lugar de una simple participación pública). La Comisión Europea [European Commission] (2003) afirma que la participación de las partes interesadas es un elemento clave para la implementación exitosa

de esta nueva e innovadora regulación para la gestión sostenible del agua. Sin embargo, la CE (2003) subraya que, para mejorar los procesos de toma de decisiones, la participación de las partes interesadas debe estar bien organizada. Mostert, (2003), afirma que, si lo anterior no se cumple, puede resultar en una respuesta limitada y poco representativa del público, el resultado puede generar menos confianza en el gobierno, menos aceptación pública, más problemas de implementación y menos aprendizaje social.

1.4.2 Análisis cuantitativo.

La selección de actores es crítica para asegurar la viabilidad, legitimidad y éxito del proceso participativo, ya que es fundamental para lograr resultados respaldados por un amplio consenso (León, 2021). En este ámbito, el acuerdo exige la participación ciudadana, entendida como acciones públicas donde los ciudadanos participan en los asuntos públicos o de interés general (Ramírez, 2013 y León, 2021).

León, (2021) e Hirschia, (2010), señalan que una forma de identificar, clasificar y caracterizar a los actores es a través de enfoques de mapeo, sin embargo, este enfoque no considera la interconexión entre actores. También recomiendan utilizar un método de interconectividad entre los actores colectivos en los procesos de planificación social, como el Análisis de Redes Sociales [ARS], que permite analizar el flujo comunicativo entre las partes interesadas. De esta forma, un estudio cualitativo como el mapeo se complementa con uno cuantitativo como el ARS.

Una forma de completar la investigación de las partes, (León, 2021), señala que un análisis de necesidades donde se aborde el desarrollo sostenible puede ser muy innovador en un contexto ambiental.

1.4.3. Contexto Boliviano.

En el contexto boliviano, los Art. 16, 20 y 373 de la Constitución Política del Estado [CPE], establece que el agua es un derecho fundamental para la vida, en el marco de la soberanía del pueblo. Indica que el estado es el encargado de proteger y garantizar el uso prioritario del agua para la vida, y es su deber gestionar, regular, proteger y planificar el uso adecuado y sustentable de los recursos hídricos, con participación social.

Mediante Decreto Supremo N° 29894 (DS 29894, 2009), se establecen las funciones del Ministerio de Medio Ambiente y Agua del estado boliviano como la institución referente de la planificación en el manejo del agua. En el Plan Nacional de Cuencas y el Plan Nacional de Saneamiento Básico se indica que MMAyA debe “formular, ejecutar, evaluar y fiscalizar las políticas y planes de agua potable y saneamiento básico, riego y manejo integral de cuencas y rehabilitación forestal de cuencas y áreas degradadas, así como el aprovechamiento

sustentable del agua en todos sus estados, sean estos superficiales o subterráneos, aguas fósiles, glaciales, humedales, minerales, medicinales”.

En el ámbito subnacional, la Ley No. 031 Marco de Autonomías y Descentralización “Andrés Báñez” (Ley 031, 2010) dispone la asignación competencial en materia de cuencas y Gestión Integral de Recursos Hídricos en su Artículo 87 (recursos naturales). Se distribuyen las competencias de la siguiente manera.

- Gobiernos departamentales autónomos: Ejecutar la política general de conservación y protección de cuencas, suelos, recursos forestales y bosques.
- Gobiernos municipales autónomos.
 - a) Ejecutar la política general de conservación de suelos, recursos forestales y bosques.
 - b) Implementar las acciones y mecanismos necesarios para la ejecución de la política general de suelos, en coordinación con el gobierno departamental autónomo” (Art.87-IV).

Con respecto a las competencias en gestión de recursos hídricos y riego, se asigna al nivel central del estado la siguiente competencia exclusiva.

- Establecer mediante ley, el régimen de recursos hídricos y sus servicios, que comprende la regulación de la gestión integral de cuencas, la inversión, los recursos hídricos y sus usos (Art.89-I).
- De manera concurrente, coordinada con las entidades territoriales autónomas, la de “elaborar, financiar y ejecutar proyectos de riego” (Art.89-II).
- La definición de planes y programas relativos de recursos hídricos y sus servicios (Art.89-III).

El Plan Departamental del Agua del departamento de Tarija aprobado con decreto departamental 09/2013 (DD 09, 2013), busca articular los diferentes niveles de decisión política administrativa coincidentes en el territorio de Tarija, ya que se observa que falta todavía una mejor articulación entre los diferentes niveles autonómicos, con el nivel central del estado (Gobernación del Departamento de Tarija, 2013). Se identifican los siguientes actores fundamentales que forman parte de la administración del agua.

El Plan Departamental del Agua desde lo local, tiene que articularse con el nivel nacional con el Órgano Ejecutivo Nacional, expresado principalmente en las entidades que tienen que ver con el agua. El servicios nacional de riego [SENARI], la entidad ejecutora del medio ambiente y agua [EMAGUA], programa “Mi Agua”, La Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico – [AAPS] y La Oficina Técnica Nacional de los ríos Pilcomayo y Bermejo (OTN-PB) con sede en Tarija.

La articulación departamental fue desarrollada desde el proceso de construcción del Plan Departamental del Agua. La participación de los actores locales públicos, privados y la sociedad civil.

En las secciones municipales es donde se concentra la ejecución de los proyectos de agua, ya sea por el gobierno municipal, las Subgubernaciones y/o por algún otro tipo de entidad.

Las entidades publico/privadas que juegan un rol fundamental en la planificación y articulación de los planes de agua están las empresas prestadoras de servicios públicos como la Cooperativa de Servicios de Agua y Alcantarillado de Tarija – COSAALT, en el caso del Municipio de San Lorenzo el sistema de agua y alcantarillado es administrado por el propio Municipio.

Oros actores importantes en la planificación del agua son las Juntas Vecinales, los Organismos No Gubernamentales – [ONG] que funcionan en el departamento, el Comité Cívico departamental y provincial, los Comités de agua y organizaciones sociales y campesinas.

El Plan Maestro Integral de Agua y Saneamiento del Valle Central de Tarija – (PMIVCT, 2015) establece claramente los actores involucrados en el desarrollo del plan integral del agua y la necesidad de una adecuada articulación entre los mismos para lograr el cumplimiento de los objetivos trazados. En este caso se identifican las siguientes partes interesadas.

- Nivel Nacional: Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA), Unidad Coordinadora del Programa de Agua y Alcantarillado Periurbano [UCP – PAAP], Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico (AAPS).
- Nivel departamental: Gobierno Autónomo Departamental de Tarija [GAD]
- Nivel municipal: Gobiernos Autónomos Municipales de Tarija y San Lorenzo [GAM]
- Nivel Local: Principales Operadores de los señalados Municipios siendo el mayor COSAALT, del Municipio de Tarija y los Operadores pequeños que atienden a más de 100 familias y brindan su servicio en barrios periurbanos de la ciudad de Tarija. También se encuentran Operadores en forma de Comités de Agua y Alcantarillado en San Lorenzo.

También participaron del proceso de elaboración del PMIVCT los representantes de los Comités de Vigilancia, hoy denominados de Control Social.

En la presente tesis doctoral se realizó la identificación y análisis de las partes interesadas y cómo este proceso puede coadyuvar en la gestión eficiente y uso adecuado del agua en la cuenca del río Guadalquivir. Se puede generar un escenario de convergencia para la concreción del proyecto, con resultados orientados al uso y asignación racionales del agua

en la cuenca, el control de la contaminación y la protección del medio ambiente (Villena, et al. 2021b).

CAPITULO II: OBJETIVOS E HIPÓTESIS

En este capítulo se detallan los objetivos y la hipótesis de la investigación.

2.1. Objetivo general

Elaborar un modelo matemático que permita analizar y evaluar el comportamiento físico del sistema de osmosis inversa a partir del modelo concentración por polarización en el proceso, utilizando para el efecto, una planta experimental piloto diseñada y montada para eliminar metales pesados presentes en las principales fuentes de agua para consumo humano dentro la alta cuenca del río Guadalquivir y, como este sistema no convencional contribuye a una adecuada gobernanza del agua y al crecimiento de la disponibilidad sostenible de agua potable en la cuenca.

2.2. Objetivos específicos

La consecución de este objetivo requiere de los siguientes objetivos específicos.

- Conocer la disponibilidad actual de agua en la cuenca a través de la elaboración del balance hídrico.
- Conocer la calidad actual de las principales fuentes de abastecimiento de agua superficiales en la cuenca alta del río Guadalquivir, a través del monitoreo realizado en 1 ciclo hidrológico (1 año).
- Seleccionar con criterios de presencia y toxicidad los metales pesados con los que se va a realizar el estudio.
- Diseñar y montar una planta piloto de osmosis inversa en Tarija-Bolivia para el proceso de investigación experimental.
- Diseñar y generar aguas sintéticas para la experimentación, a partir de la combinación de sales de metal y cloruro de sodio que permitirá simular la calidad del agua natural.
- Realizar el diseño de experimentos para el proceso de osmosis inversa, definiendo las variables de control y de respuesta.
- Evaluar el comportamiento de la membrana en el proceso de separación de los metales.
- Elaborar un modelo matemático para evaluar el comportamiento físico del sistema.
- Analizar cualitativa y cuantitativamente las partes interesadas en la alta cuenca del Guadalquivir y su relevancia en la gestión eficiente e integral del agua y su impacto en el proyecto.

2.3. Hipótesis

La elaboración de un modelo matemático que analice el comportamiento físico de un sistema de Osmosis Inversa permite validar que el rechazo de plomo, hierro y manganeso en aguas de consumo es, eficiente a bajas presiones operativas.

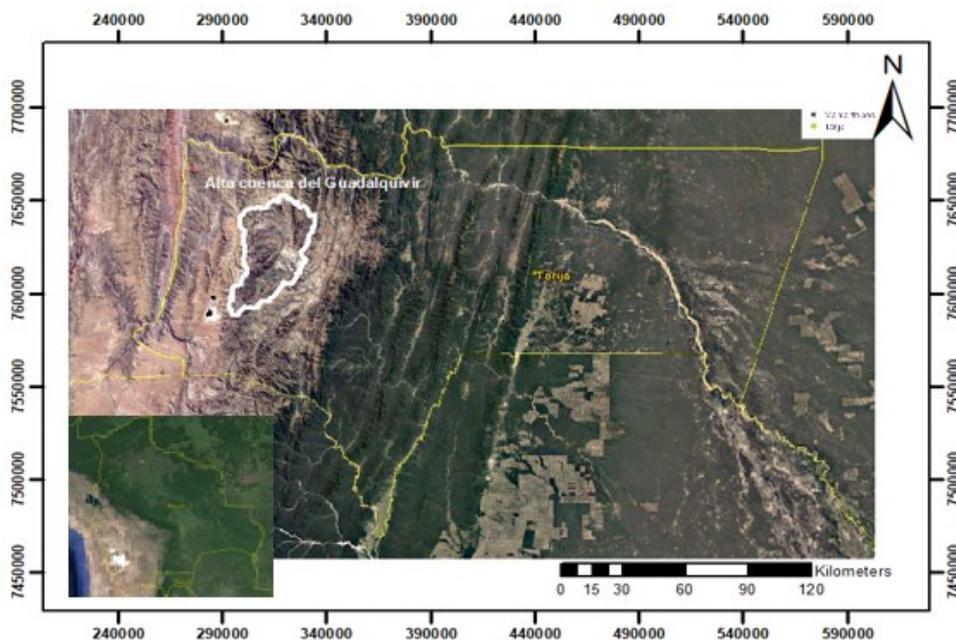
CAPITULO III: MATERIALES Y METODOS

En los siguientes apartados, se describe la zona de estudio, los fundamentos teóricos aplicados para el cálculo de la disponibilidad de agua, monitoreo de las fuentes, proceso experimental, elaboración del modelo CP. Se describe la base conceptual para el análisis de las partes interesadas. Asimismo, se describen los materiales y equipos utilizados para cada proceso.

3.1. Área de Estudio

El área de estudio se ubica en la cuenca del Guadalquivir en Tarija, Bolivia, circunscribe el área urbana del municipio de Cercado, y representa la población más grande del departamento. El río Guadalquivir es una de las fuentes superficiales más importantes para la población (Copa y Villena, 2016). La figura 5 muestra la ubicación de la cuenca del Guadalquivir del departamento de Tarija-Bolivia.

Figura 5: La Alta Cuenca del Guadalquivir del departamento de Tarija



3.1.1. Descripción geográfica de las subcuencas del Guadalquivir

La cuenca de estudio tiene una extensión aproximada de 1541 km² y está formada por 8 subcuencas correspondientes a los principales afluentes del río Guadalquivir, las principales características de cada una se detalla a continuación. (Villena et al., 2018b y Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2018).

a) Subcuenca Canasmoro

La subcuenca de Canasmoro tiene un área aproximada de 241 Km² con una cobertura vegetal variable y una topografía con derrumbes o deslizamientos erosivos o cárcavas. Presenta bosques o montes ralo andino montano semiárido, bosque ralo andino montano bajo subhúmedo y vegetación dispersa vivaz en pedregales puna altoandina semiárida.

b) Subcuenca Obrajes

La subcuenca de Obrajes con área aproximada de 270 Km² se ubica entre las alturas de 1994 y 3522 msnm, presenta un relieve montañoso conveniente geológicamente al periodo cuaternario (depósitos aluviales, fluvio lacustres, fluvioglaciales, coluviales, lacustres, morrenas y dunas) y Ordovícico (areniscas, limolitas, cuarcitas, pizarras, lutitas y lavas almohadilladas).

c) Subcuenca Sella Quebrada

La subcuenca de Sella Quebrada tiene un área aproximada de 185 Km² y se caracteriza por tener una cobertura cambiante conformada por bosque o monte ralo andino montano semiárido cuyo uso es productivo agropecuario y extractivo forestal.

d) Subcuenca Vittoria

La subcuenca del rincón de la Vittria con 61 Km² presenta valles secos mesotérmicos (monte espinoso microfoliado y restos de bosque seco). Se encuentra conformada por montañas medias con disección ligera, y montañas altas con disección moderada, se encuentra ubicada entre las alturas de 2224 y 3952 msnm, con pendientes entre el 10 y 80%. Geológicamente pertenece a los periodos Cámbrico (Limolitas, lutitas, areniscas y ortocuarcitas) y Ordovícico (Areniscas, limolitas, cuarcitas, pizarras, lutitas y lavas almohadilladas).

e) Subcuenca Tarija Ciudad

La subcuenca de la ciudad de Tarija tiene un área de 366 Km². Se encuentra conformada por montañas medias con disección ligera, montañas altas con disección moderada, llanura fluvio lacustre con disección moderada y fuerte, llanuras de piedemonte con disección moderada y fuerte.

f) Subcuenca San Jacinto 1

Con un área de 66 Km², presenta una cobertura conformada por agricultura múltiple cuyo uso es productivo (alimentos de consumo), bosque denso andino montano subhúmedo el uso que se realiza es productivo agropecuario, extractivo forestal y petróleo, y cuerpos y cursos de agua (lagos lagunas, etc.).

g) Subcuenca Tolomosa

Con 279 Km² de extensión aproximada, presenta una vegetación formada por matorrales secundarios xeromórficos bajos a medios, con pastizales formando los denominados

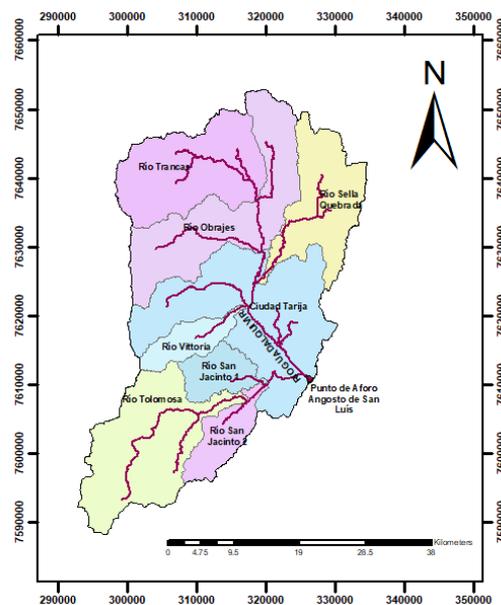
taquillares y churquiales con pastizales, donde la cobertura es variable, desde dispersa a semidensa.

h) Subcuenca San Jacinto 2

Tiene un área aproximada de 73 Km², geológicamente corresponde a los periodos cuaternario (depósitos aluviales, fluvio lacustres, fluvioglaciales, coluviales, lacustres, morrenas y dunas), silúrico (lutitas, limolitas, cuarcitas y diamictitas), y, ordovícico (areniscas, limolitas, cuarcitas, pizarras, lutitas y lavas almohadilladas). Presenta valles secos Mesotérmicos (Monte Espinoso Microfoliado y Restos de Bosque seco).

La figura 6, ilustra las 8 subcuencas de estudio, correspondientes a la cuenca del Guadalquivir.

Figura 6: Subcuencas del Guadalquivir



3.1.2. Principales fuentes de abastecimiento de agua

El abastecimiento de agua potable para el valle central de Tarija se realiza principalmente por fuentes superficiales, sin embargo, existen pozos distribuidos en diferentes puntos de la ciudad.

Sobre el río Guadalquivir existe una toma de agua en la zona de las tipas de la subcuenca de Obrajes. Una obra de toma en la subcuenca de la Vittoria y una galería filtrante en la subcuenca de Sella Quebrada.

El lago San Jacinto es una fuente de agua ubicada en la subcuenca de San Jacinto.

3.2. Teoría y metodología aplicada para la determinación de la disponibilidad de agua

Para la determinación de la disponibilidad de agua se utilizó la información climática e hidrológica proporcionada por el SENAMHI. El procesamiento y modelación de los caudales se realizó con el software “Cálculo Hidrológico de aportaciones y Crecidas” [CHAC], diseñado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas de España (CEDEX, 2019). Los datos de uso de suelos, necesarios para la calibración y simulación han sido obtenidos del proyecto de investigación realizado con la Universidad Católica Boliviana San Pablo - Regional Tarija.

3.2.1. Modelos hidrológicos

La representación espacial, temporal y la disponibilidad de información en una cuenca permite clasificar los modelos de simulación y modelación hidrológica. La idoneidad de un modelo recae en la cantidad de información que se disponga y la adecuada interpretación de esta, siempre en aras de buscar una menor incertidumbre en los resultados (Villena et al., 2018b).

Un modelo hidrológico, busca representar los diferentes procesos involucrados en la distribución de la lluvia y la generación de caudales en una determinada cuenca. En la actualidad se dispone de una amplia variedad de modelos, los cuales han sido planteados bajo ciertas hipótesis cuyo claro entendimiento garantiza su correcta utilización (Jorquera, et al., 2012). Para el presente trabajo se utilizó un modelo semidistribuido.

Los modelos semi-distribuidos se utilizan cuando las cuencas no pueden ser consideradas pequeñas y muchos de los parámetros no pueden ser asumidos como homogéneos. Así, el enfoque básico del proceso agrupado puede ser modificado para analizar de forma independiente regiones de comportamiento hidrológico similar y luego combinar las respuestas individuales.

También se desarrollaron los modelos semi-distribuidos para evitar los problemas de los modelos distribuidos. En este tipo de modelo, la cuenca se divide en sub-cuencas más grandes que las rejillas de los modelos distribuidos y son tratadas como una sola unidad cuando se combinan. Esto permite una mejor base física que los modelos agregados y requiere menos datos de entrada que el enfoque distribuido (Tellez et al., 2016). Ejemplos de estos modelos son, el Témez (Jodar et al., 2017), WEAP (Centro de Cambio Global Universidad de Chile, 2009), SACRAMENTO (Lujano et al., 2016), CHAC (CEDEX, 2019) o el HIDROBYD (BID, 2019). Para la modelación del balance hídrico en el presente proyecto se utilizó el modelo de Témez representado por el software CHAC, cuyos resultados se detallan más adelante.

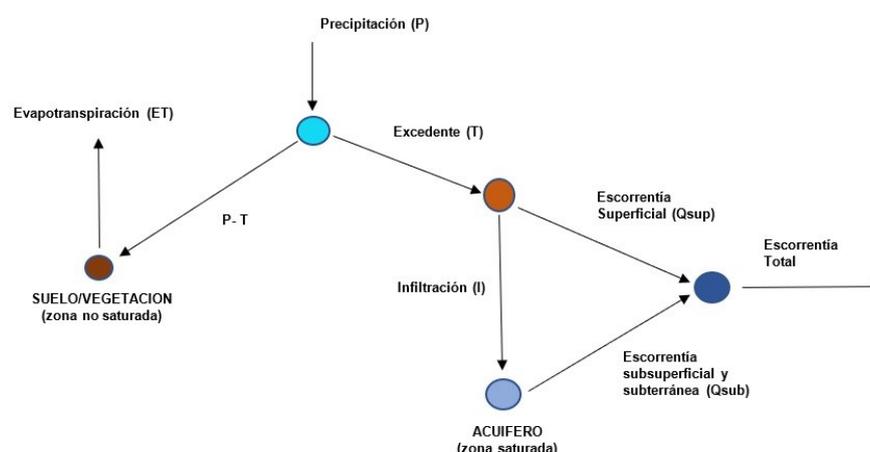
La guía metodológica para la elaboración de balances hídricos superficiales de Bolivia desarrollada por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (2017), sugiere el uso de modelos semidistribuidos por su flexibilidad en cuanto a las escalas espaciales, temporales y disponibilidad de información de la cuenca. Sin embargo, Kebede et al., (2014) señalan que la incertidumbre causada por el uso de diferentes entradas (datos) del modelo es mayor que la incertidumbre causada por el uso del propio modelo.

Una estructura intermedia como son los modelos semidistribuidos modelan adecuadamente el comportamiento y la respuesta hídrica de la cuenca a través de sistemas agregados conectados entre sí a un sistema global (Collick et al., 2009).

3.2.2. Modelo Témez - CHAC para la determinación del balance hídrico en la cuenca del Guadalquivir

El modelo de Témez, (1977) es un modelo semidistribuido de simulación continua de pocos parámetros y de paso mensual que simula los principales procesos de transferencia de agua en el ciclo hidrológico considerando dos almacenamientos, suelo y acuífero (Estrela, 1993). Opera realizando balances de humedad entre los distintos procesos que tienen lugar en un sistema hidrológico desde instante en que comienza a llover hasta el momento en que se genera escorrentía y la posterior descarga de los acuíferos a los ríos. El modelo realiza una valoración global, ya que no considera la distribución espacial de las variables y parámetros que intervienen en los cálculos que se sustituyen por un valor medio. La figura 7 muestra el esquema conceptual del modelo de Témez.

Figura 7: Modelo de Témez



El desarrollo teórico del modelo de Témez es de índole general, por lo que en principio se puede aplicar cualquier intervalo de tiempo (horario, diario, semanal, mensual, anual), aunque se debe verificar que los periodos temporales que se utilicen proporcionen una respuesta

coherente con la realidad física del sistema hidrológico en estudio. El intervalo temporal más utilizado es el mensual (Murillo y Navarro, 2011).

La ventaja de este modelo es que cuenta con plataformas informáticas integradas de acceso libre y gratuito para la simulación, ejemplo de esto se tiene es el software CHAC, anteriormente señalado. El modelo Témez es muy utilizado en España y extendiendo su uso en varios países de Sudamérica.

Las principales entradas del modelo es la precipitación y evapotranspiración mensual, siendo la principal salida las aportaciones del río en los periodos analizados, la teoría del modelo se basa en las siguientes ecuaciones.

El umbral de escorrentía, expresado en mm, ecuación (1)

$$P_o = C (H_{max} - H_{i-1}) \quad (1)$$

Donde:

P_o = umbral de escorrentía

C = Coeficiente de escorrentía.

H_{max} = Humedad máxima del suelo

H_{i-1} = Humedad antecedente; mes (i-1) (mm)

Excedente T_i , ecuaciones (2), (3) y (4):

$$\text{Cuando} \quad T_i = 0 \quad \rightarrow \quad P_i \leq P_o \quad (2)$$

$$T_i = \frac{(P_i - P_o)^2}{P_i + \delta - 2P_o} \quad \rightarrow \quad P_i > P_o \quad (3)$$

$$\delta = ETP + H_{max} - H_{i-1} \quad (4)$$

Donde:

T_i = Excedente; mes (i) (mm).

ETP: Evapotranspiración Potencial

P_i = Precipitación; mes (i) (mm).

Infiltración, I_i , ecuación (5):

$$I = I_{max} \frac{T_i}{T_i + I_{max}} \quad (5)$$

Donde:

I = Infiltración

I_{max} = Parámetro de infiltración máxima (mm/mes).

T_i = Excedente; mes (i) (mm).

Balance de agua en el suelo, H_i , ecuación (6):

$$H_i = \text{Max} (0, H_{i-1} + P_i - T_i - EP_i) \quad (6)$$

Evapotranspiración real, ER_i ecuación (7):

$$ER_i = \text{min} (H_{i-1} + P_i - T - EP_i) \quad (7)$$

Donde:

EP_i = Evapotranspiración potencial, afectada por el coeficiente de usos de suelo; mes (i) (mm).

Aportación superficial A_{sup_i} , ecuación (8):

$$A_{\text{sup}_j} = T_i - I_i \quad (8)$$

Donde:

I_i = Infiltración; mes (i) (mm).

Caudal drenado por el acuífero, Q_i , se expresa con las ecuaciones (9) y (10):

$$Q_i = \alpha V_i \quad (9)$$

$$Q_i = Q(i-1) * e^{-\alpha t} + \alpha R_i e^{-\alpha \left(\frac{t}{2}\right)} \quad (10)$$

Donde:

α = Parámetro coeficiente de descarga del acuífero. Días^{-1}

V_i = Volumen almacenado; mes (i) (mm)

Q_i : Caudal subterráneo; mes (i) (m^3/s).

Aportación subterránea A_{sub_i} , ecuación (11):

$$A_{\text{sub}_j} = V_{i-1} - V_i + R_i * t \quad (11)$$

Aportación total, A_{TOT_i} , ecuación (12):

$$A_{\text{TOT}_j} = A_{\text{sup}_i} + A_{\text{sub}_i} \quad (12)$$

Donde:

A_{SUP_i} = Escorrentía superficial; mes (i) (mm).

A_{SUB_i} = Escorrentía subterránea; mes (i) (mm).

A_{TOT_i} = Escorrentía total; mes (i) (mm)

Las variantes del modelo son:

Dos ramas de descarga del acuífero:

α_1 : Coeficiente de descarga del acuífero. días-1

α_2 : Coeficiente de descarga del acuífero. días-1

Parámetro de reparto de recarga: tanto por uno

En el caso de Bolivia, el modelo de Témez ha sido utilizado para la determinación del balance Hídrico del periodo 1998-2011, con una cobertura total y homogénea en todo el país (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2012).

3.2.3. Información hidrometeorológica

La información hidrometeorológica ha sido recopilada del SENAMHI, (2019). Para el área de estudio se cuenta con 27 estaciones pluviométricas de las cuales 16 están dentro la cuenca y 11 fuera.

La tabla 10 detalla las características de las estaciones:

Tabla 10: Estaciones hidrológicas

No	Estación	Lat._S	Long_W	Alt.	Periodo de datos (años)	Variable
1	LA MERCED	22° 01' 29"	64° 40' 36"	1546	15	P, T
2	CAÑAS	21° 54' 08"	64° 51' 03"	2078	34	P, T
3	JUNTAS	21° 48' 37'	64° 47' 51"	1882	34	P, T
4	CHOCLOCA	21° 44' 53"	64° 43' 46"	1795	30	P, T, E, HS
5	PINOS SUD	21° 44' 00"	64° 53' 00"	2100	34	P
6	CE.NA.VIT.	21° 41' 31"	64° 39' 29"	1730	25	P, T, E, HS
7	SAN ANDRÉS	21° 37' 24"	64° 48' 54"	1987	34	P, T, E, HS
8	SAN JACINTO SUD	21° 36' 37"	64° 43' 12"	1820	34	P
9	SAN LUIS DE PALQUI	21° 33' 28"	65° 08' 06"	3221	9	P
10	TURUMAYO	21° 33' 24"	64° 46' 42"	1978	15	P
11	AEROPUERTO	21° 32' 48"	64° 42' 39"	1854	34	P, T, HS, V
12	EL TEJAR	21° 32' 35"	64° 43' 16"	1859	32	
13	CAMPANARIO	21° 30' 45"	64° 58' 32"	3460	24	P, T, E, HS
14	COIMATA	21° 29' 57"	64° 47' 20"	2027	34	P, T, E, HS, R
15	YESERAS SUR	21° 28' 02"	64° 33' 30"	2092	12	
16	TUCUMILLAS	21° 27' 40"	64° 49' 52"	2557	34	P, T
17	NARVAEZ	21° 24' 23"	64° 17' 06"	1755	34	P
18	SELLA QDAS.	21° 23' 11"	64° 40' 52"	2145	34	P, T
19	YESERA NORTE	21° 22' 20"	64° 33' 03"	2277	34	P, T, HR
20	TRANCAS	21° 18' 29"	64° 48' 57"	2198	30	P, T
21	ALTO CAJAS	21° 18' 22"	64° 28' 06"	2422	34	P
22	TOMAYAPO PUEBLO	21° 16' 06"	65° 02' 42"	2734	33	P, T

No	Estación	Lat._S	Long_W	Alt.	Periodo de datos (años)	Variable
23	HUACATA	21° 14' 19"	64° 50' 43"	2858	7	
24	LEON CANCHA	21° 11' 00"	64° 43' 00"	2600	31	
25	QDA. CAJAS	21° 09' 38"	64° 24' 12"	1072	4	P
26	SAN JOSECITO	21° 09' 38"	64° 24' 12"	1072	34	P
27	PAICHO CENTRO	21° 08' 43"	64° 57' 16"	2570	9	P

P=Precipitación T=Temperatura E=Evaporación HS=Horas Sol HR=Humedad Relativa V=Viento

3.2.4. Análisis y procesamiento de la información hidrometeorológica.

Se describe el periodo de análisis y la crítica de los datos hidrológicos obtenidos.

3.2.4.1. Periodo de análisis, año hidrológico y crítica de datos hidrometeorológicos

Se ha definido la utilización de 36 años de datos continuos con un periodo desde 1980 hasta 2016, con serie datos nivel mensual. El año hidrológico ha sido definido de enero a diciembre.

La información de la base de datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia SENAMHI, (2019), detalla las estaciones utilizadas en la modelación para cada variable hidrológica.

- Precipitación: Chocloca, Pinos sud, San Andrés, San Jacinto Sud, Turumayo, Tarija Aeropuerto, El Tejar, Campanario, Coimata, Tucumillas, Sella quebrada, Yesera norte, Trancas, Tomayapo Pueblo y León Cancha. La tabla 11 detalla el inventario de información de estaciones para la precipitación.
- Temperatura: Chocloca, San Andrés, San Jacinto Sud, Turumayo, Tarija Aeropuerto, El Tejar, Campanario, Coimata, Tucumillas, Sella quebrada, Yesera norte, Trancas y Tomayapo Pueblo. La tabla 12 detalla el inventario de información de estaciones para la temperatura.
- Humedad relativa: Chocloca, San Andrés, San Jacinto Sud, Turumayo, Tarija Aeropuerto, El Tejar, Campanario y Coimata. La tabla 13 detalla el inventario de información de estaciones para la humedad relativa.
- Horas de sol: Chocloca, San Andrés, San Jacinto Sud, Tarija Aeropuerto, El Tejar, Campanario y Coimata. La tabla 14 detalla el inventario de información de estaciones para las horas de sol.
- Velocidad del viento: Chocloca, San Andrés, San Jacinto Sud, Turumayo, Tarija Aeropuerto, El Tejar, Campanario y Coimata. La tabla 15 detalla el inventario de información de estaciones para el viento

Las tablas evidencian que los registros presentan discontinuidades que pueden ser originadas por diferentes causas, esto, conlleva a que algunas estaciones sean desechadas

y otras requieran de un proceso de complementación de datos faltantes. Las estaciones Paicho Centro, Yesera sud, San Luis de Palqui y Quebrada Cajas cuentan con periodos de registros muy cortos y una correlación muy baja por lo que se definió no utilizarlas. Asimismo, La Merced, Juntas, Cañas y CENAVIT, no han sido consideradas por estar a distancias muy alejadas de la cuenca.

3.2.4.2. Completado de datos faltantes y prueba de homogeneidad

La complementación de datos faltantes y prueba de homogeneidad se realizó con el CHAC, (CEDEX, 2019). El software utiliza un modelo de regresión bivariado con estacionarización previa mensual de las series de datos. En los Anexos 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 y 1.5 se detallan las series anuales completas de las variables climatológicas de precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento e insolación.

El análisis de la curva de doble acumulación es una técnica para valorar la consistencia de una serie temporal en función de otra serie de referencia. Para su aplicación se toman las dos series de datos durante el periodo común de registro y se comparan en un diagrama x-y sus series acumuladas. Si la relación entre las dos series se ha mantenido estable, la representación mostrará una tendencia lineal, en caso contrario, la presencia de quiebres y saltos indica cambios en la relación entre las series de datos, y, por tanto, posibles errores (CEDEX, 2019). En el Anexo 1.6 se muestran las curvas doble masa calculadas.

Las curvas muestran tendencias lineales con series estables lo que permite establecer consistencia de las series temporales utilizadas para la modelación.

3.2.5. Evapotranspiración

La evapotranspiración potencial o del cultivo de referencia es la tasa máxima a la que se podría evapotranspirar agua bajo condiciones óptimas de suministro con el suelo existente (CEDEX, 2019). El CHAC permite el cálculo de la evapotranspiración potencial utilizando el método de Penman Monteith (FAO, 1990). Tiene como base conceptual de cálculo la utilización de la fórmula que relacionan la Evapotranspiración Potencial (ETP) con factores climáticos como la precipitación, temperatura, velocidad del viento, horas de sol y la humedad relativa. La base teórica de la ETP se detalla en las siguientes ecuaciones.

$$ETPr = \frac{\Delta(Rn-G) + \rho_a c_p \left(\frac{e_s - e_a}{r_a}\right)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (13)$$

Donde:

R_n = Radiación neta

G = Flujo del calor en el suelo

$e_s - e_a$ = déficit de presión de vapor del aire

ρ_a = densidad media del aire a presión constante

c_p = calor específico del aire

Δ = pendiente de la curva de presión de vapor de saturación

γ = constante psicrométrica

r_s y r_a = resistencias superficiales (total) y aerodinámica

$$r_a = \frac{280}{u_2} \quad (14)$$

Donde:

u_2 = velocidad del viento a 2 metros (ms^{-1})

$$r_s = \frac{200}{IAF} \quad (15)$$

$$IAF = 24 * h \quad (16)$$

Donde:

IAF = índice de área foliar (adimensional)

h = altura de cultivo (m), el CHAC asume 12 cm.

Teniendo que.

$$IAF = 24 * 0.12 = 2.88$$

$$r_s = 200/2.88 = 69$$

$$ETP_c = K_c * ETP_r \quad (17)$$

$$G = 0.38 (T_{\text{día},n} - T_{\text{día},n-1}) \quad (18)$$

$$G = 0.07 (T_{\text{mes},n} - T_{\text{mes},n-1}) \quad (19)$$

En el Anexo 1.7 se detalla los datos de evapotranspiración potencial por estación calculada en el CHAC.

3.2.6. Calibración y validación del modelo

Para calibrar el modelo de Témez, es necesario utilizar parámetros que representen el comportamiento físico de la cuenca. Los parámetros $H_{\text{máx}}$, C , $I_{\text{máx}}$ y α , representan las características de infiltración, humedad del suelo y escorrentía. El CHAC ajusta el modelo, apoyándose en evaluación de errores y en la comparación visual de los hidrogramas registrados y simulados. Para este trabajo, el CHAC permite llevar a cabo dos procesos básicos en el cálculo de aportaciones.

- Calibración: Ajuste de los parámetros del modelo durante un periodo por comparación entre valores simulados y los caudales reales medidos en estaciones de aforo. Comprobación de la capacidad descriptiva del modelo

- Validación: Comprobación de la capacidad predictiva del modelo aplicando los parámetros de la calibración durante un periodo no empleado para ésta.

Para la calibración del modelo, se utilizaron las estaciones de aforo en la cuenca, detalladas en la tabla 16.

Tabla 16: Estaciones de aforo – hidrométricas

Estación	Número de años – serie histórica	Caudal medio mensual (m³/seg)
Canasmoro	11 (1976-1986)	4.71
Obrajes	17 (1978-1994)	10.06
San Nicolas	3 (1981-1983)	5.27
Sella Quebrada	16 (1979-1994)	7.67
Tolomosa	7 (1978-1984)	22.44

Fuente: elaboración propia en base a datos del SENAMHI, 2019 y MMAyA, 2018 (Balance Hídrico Guadalquivir)

El CHAC utiliza para la calibración las precipitaciones y evapotranspiración (areales) ponderadas en la cuenca. Además, se requiere el periodo de calibración (validación), la superficie de la cuenca, el número de días de lluvia por mes y el número de ramas de descarga.

El modelo hidrológico ha sido calibrado utilizando las estaciones hidrométricas de Canasmoro, Obrajes y Tolomosa, por tener la mayor extensión en datos y ser más representativas de la cuenca de estudio. La estación de Canasmoro se ubica en la zona norte, la de Obrajes en la zona intermedia o central y la de Tolomosa en la zona sur o baja de la cuenca.

En términos de validación espacial de la calibración, la estación de Canasmoro se considera como representativa de las HRU de la zona Norte, la de Obrajes de la zona central, mientras que Tolomosa de las HRU del Sur de la cuenca.

Un parámetro fundamental para la calibración ha sido la infiltración máxima de la cuenca, cuyo valor se determinó a partir del estudio e investigación realizado en la cuenca que será detallado en el siguiente acápite del presente proyecto.

Las características básicas de calibración son:

- Superficie de la cuenca que coincide con la superficie de la unidad o unidades hidrográficas que vierten al punto de aforo.
- Resultados de los parámetros de calibración: Hmax, lmax, α y C.

Datos estadísticos correspondientes a:

- Error Medio Relativo $((\text{sim-his})/\text{his})$ -EMR- Q_{medios} : correspondiente a un índice de ajuste para volúmenes medios de caudal simulado.
- Error Cuadrático Estándar Medio Relativizado-ECEMR- Q_{bajos} : corresponde a un índice de ajuste de caudales bajos simulados.
- Error Cuadrático Estándar Medio Relativo- ECEMR- Q_{altos} : Como índice indicativo de ajuste de caudales altos simulados.

Gráfico comparativo de los caudales simulados con respecto a los caudales registrados.

3.2.7. Simulación

Una vez calibrado el modelo, el CHAC realiza la simulación con los parámetros ajustados que nos permite encontrar y cuantificar el balance hídrico, cuyos resultados serán detallados en el capítulo 4 del presente proyecto.

3.2.8. La medición de la infiltración en la cuenca del Guadalquivir

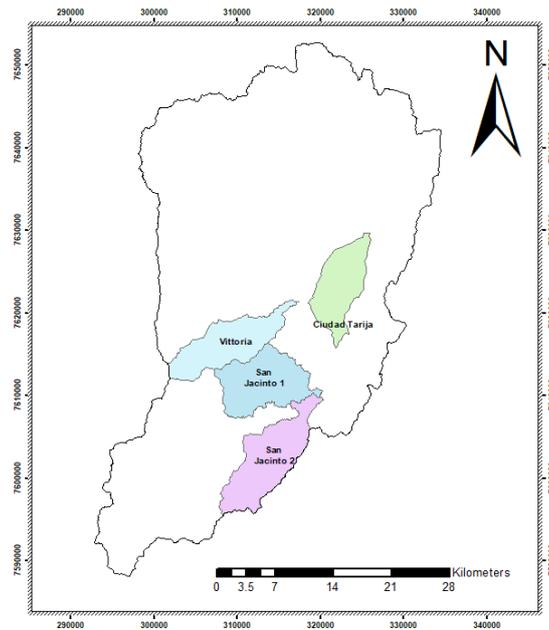
El balance hídrico por lo general considera y asume datos de infiltración para su cálculo, generando una mayor incertidumbre en su resultado. Para mitigar la incertidumbre y generar un mejor análisis, evaluación y comportamiento del agua en la cuenca, se realizó una investigación para la obtención de datos de infiltración. Esta investigación se realizó con el apoyo de la Universidad Católica Boliviana Regional Tarija durante el 2018-2019-2022 (Villena, et al. 2019a)

Las características del proyecto de investigación efectuado para determinar los datos de infiltración se detallan en los siguientes acápite.

3.2.8.1. Áreas de investigación y puntos de trabajo

El proyecto se realizó en las subcuencas más importantes, la subcuenca de Rincón de la Vittoria que tiene una extensión aproximada de 6.115 ha ubicada dentro de la reserva de Sama (Servicio Nacional de Áreas Protegidas –[SERNAP], 2019). Esta se encuentra en la zona donde se extrae agua para la ciudad de Tarija. La subcuenca de la Quebrada del Monte con una extensión aproxima de 4,383 ha, representa una de las áreas de expansión más importantes del Valle Central de la ciudad de Tarija. San Jacinto 1 y San Jacinto 2 con un área de 7329.25 ha y 6580 ha respectivamente donde se encuentra la ciudad de Tarija. La figura 8 muestra la ubicación de las subcuencas de estudio.

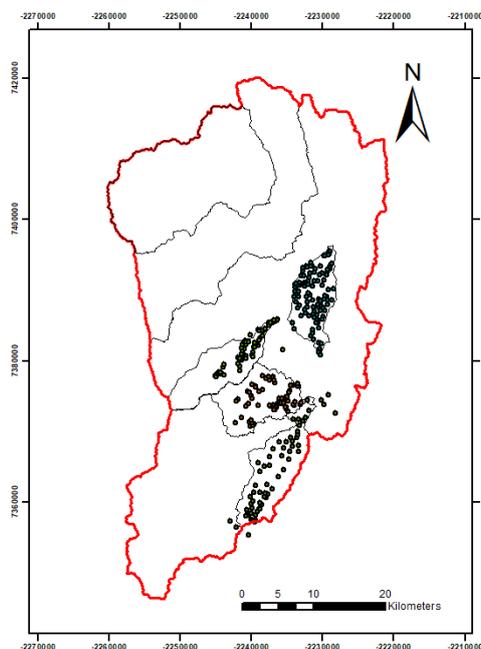
Figura 8: Subcuencas de estudio de la infiltración



Fuente: Villena, et al. 2018a

Para la subcuenca del Rincón de la Vittoria se exploraron 62 puntos en áreas accesibles. En la subcuenca de la Quebrada del Monte se exploraron 111 puntos distribuidos en toda la subcuenca (Villena, et al. 2018a). Mientras que en la Subcuenca de San Jacinto 1 se realizaron 70 puntos y en San Jacinto 2, 57 puntos de muestreo (Villena et al. 2019b). La figura 9 detalla la distribución de los puntos de análisis en las áreas de estudio.

Figura 9: Puntos de trabajo - infiltración



Fuente: Villena, et al. 2018a

3.2.8.2. Equipos de medición de la infiltración y método de cálculo

Para las pruebas de campo se utilizaron 3 infiltrómetros mini-disco marca (Decagon Devices, Inc., 2016). Ankeny et al., (1991) señala que este método simple de medición en el campo de la conductividad hidráulica es muy valioso debido a su rapidez y menos perjudicial para la continuidad de los poros que otras técnicas de infiltración de campo.

El infiltrómetro mini-disco es ideal para el trabajo de campo por su tamaño compacto y por la poca cantidad de agua que se requiere para su funcionamiento. Permite un fácil transporte además de ser un equipo que funciona correctamente en suelos no saturados (Decagon Devices, Inc., 2016).

El procedimiento recomendado por el proveedor del equipo y detallado también por Matula et al., (2015), sugiere un buen contacto hidráulico entre la membrana del dispositivo de medición y el suelo. Esto, debido a que la parte inferior del infiltrómetro tiene un disco poroso de acero inoxidable sinterizado que no permite que el agua escape al aire libre. El pequeño diámetro del disco permite mediciones sin molestias en superficies de suelo relativamente niveladas.

Debido al tipo de suelos que predominan en las áreas de estudio y las características del infiltrómetro, la conductividad hidráulica se ha calculado utilizando el método de Zhang, (1997a). Este método es simple y adecuado para suelos secos - insaturados. La figura 10 muestra el equipo Minidisc utilizado en esta investigación.

Figura 10: Infiltrómetro Minidisc



Fuente: Villena, et al. 2018a

Para la implementación del equipo de minidisco, se procedió a nivelar la superficie de contacto entre el disco y suelo para evitar perturbaciones durante las mediciones. El agua comienza a salir de la cámara inferior y se infiltra en una cierta velocidad según las propiedades hidráulicas del suelo. A medida que baja el nivel del agua, el volumen se registra

a intervalos de tiempo específicos. Para el cálculo de la conductividad hidráulica, los datos obtenidos se trazan en una hoja de cálculo excel que proporciona Decagon Devices, Inc. (2016). Se utilizó el método de Zhang, (1997a) para calcular la conductividad hidráulica, siendo este el más aconsejable para suelos insaturados que sigue además la metodología propuesta por el proveedor del equipo.

Para la clasificación de los suelos se utilizó los parámetros de infiltración de Green y Ampt (1911) detallados en la tabla 17.

Tabla 17: Clasificación de suelos – Green-Ampt

Soil texture class	porosity η	Effective porosity θ_c	Soil suction head on the wet from Ψ (cm)	Hydraulic conductivity K (cm/h)
Sand	0.437	0.417	4.95	11.78
Loamy sand	0.437	0.401	6.13	2.99
Sandy loam	0.453	0.412	11.01	1.09
Loam	0.463	0.434	8.89	0.34
Silt loam	0.501	0.486	16.68	0.65
Sandy clay loam	0.398	0.330	21.85	0.15
Clay Loam	0.464	0.309	20.88	0.10
Silty clay loam	0.471	0.432	27.30	0.10
Sandy clay	0.430	0.321	23.90	0.06
Silty clay	0.479	0.423	29.22	0.05
Clay	0.475	0.385	31.63	0.03

Fuente: Green y Ampt (1911)

Las ecuaciones de infiltración describen la tasa potencial. La infiltración acumulada F es la profundidad acumulada del agua infiltrada dentro de un período dado y es igual a la integral de la tasa de infiltración durante ese período (Chow et al. 1994). Con la ecuación (20) se calcula la infiltración.

$$F(t) = \int_0^t f(\tau) d(\tau) \quad (20)$$

Donde:

$T = t$ variable de tiempo

Por el contrario, la tasa de infiltración es la derivada temporal de la infiltración acumulada (Chow et al. 1994), ecuación (21):

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (21)$$

Las ecuaciones de infiltración de Horton (1933), Eagleson, (1970) y Raudkivi, (1979) mostraron que estas pueden derivarse de la ecuación de Richard (1931) en condiciones

menos restrictivas. Se ha desarrollado una alternativa a partir de teorías físicas con mejores aproximaciones y con soluciones analíticas más precisas (Chow et al., 1994). Hay varios métodos disponibles para determinar la conductividad hidráulica del suelo a partir de los datos de infiltración (Fatehnia, et al. 2014), un ejemplo del cual tenemos es el de Green y Ampt (1911) y el de Zhang (1997a); Zhang, (1997b); Zhang,(1998).

3.2.8.2.1 Método de Green & Ampt

Entre las diferentes ecuaciones de infiltración, la ecuación de Green y Ampt (1911) basada en leyes físicas muestra soluciones más precisas. Al aplicar la ley de Darcy, la tasa de infiltración en el modelo Green y Ampt bajo una superficie constante puede describirse como, la ecuación (22) que detalla el modelo de Bouwer, (1969).

$$\frac{dI}{dt} = K \frac{H+z-\psi_f}{z} \quad (22)$$

Donde:

dI/dt = tasa de infiltración (cm/min)

t = Tiempo (min)

K = Conductividad hidráulica detrás del frente de humectación (cm/min)

H = Cabeza de agua superficial (cm)

z = Distancia vertical desde la superficie del suelo hasta el frente de humectación (cm)

Ψ_f = Cabeza de succión húmeda delantera (cm)

Chow et al., (1994), muestran valores promedio de los parámetros de Green y Ampt para diferentes tipos de suelos que analizaron Rawls et al., (1983) a partir del método presentado por Brakensiek et al., (1981) usando la ecuación de Brooks y Corey, (1964).

3.2.8.2.2. Método de Zang

El método inicial propuesto por Zhang (1997b) se basa en el modelo de infiltración del infiltrómetro de disco, de acuerdo con la siguiente ecuación (23):

$$I = C_1 t^{0.5} + C_2 t \quad (23)$$

Donde:

I = Infiltración acumulada (L)

t = Tiempo (T)

C_1 ($LT^{-1/2}$) y C_2 ($LT^{-1/2}$) = Parámetros

Zhang (1997a) propuso un método simple que funciona bien para medir la conductividad hidráulica de los datos de infiltración en el suelo seco. El método requiere medir la infiltración acumulada en función del tiempo y ajustar los resultados con la ecuación anterior, donde los parámetros C1 ($LT^{-1/2}$) y C2 ($LT^{-1/2}$) están en función a la sorptividad del suelo y conductividad hidráulica respectivamente. La conductividad hidráulica del suelo (K) se calcula a partir de la siguiente ecuación (24).

$$K = \frac{C1}{A} \quad (24)$$

Donde:

C1 = se puede encontrar ajustando un polinomio de segundo orden a los datos para la infiltración acumulada versus la raíz cuadrada del tiempo.

A = es un valor que relaciona los parámetros de Van Genuchten para un tipo de suelo dado con la velocidad de succión y el radio del infiltrómetro de disco.

A se calcula a partir de las ecuaciones (25) y (26):

$$A = \frac{11.65(n^{0.1}-1)\exp[2.92(n-1.9)\alpha h]}{(\alpha r)^{0.91}}, n > 1.9 \quad (25)$$

$$A = \frac{11.65(n^{0.1}-1)\exp[7.5(n-1.9)\alpha h]}{(\alpha r)^{0.91}}, n < 1.9 \quad (26)$$

Donde:

n y α = son los parámetros de Van Genuchten

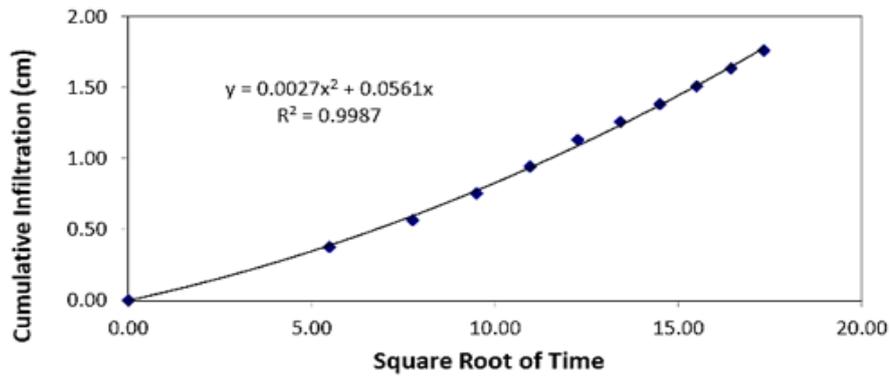
r = es el radio del disco

h = es la succión en la superficie del disco.

Los parámetros de van Genuchten para diferentes clases de textura se pueden obtener de Carsel y Parrish, (1988).

El procedimiento propuesto por Decagon Devices Inc., (2016) incluye una ecuación cuadrática utilizada para calcular C1, que es la pendiente de la línea indicada como "y". La figura 11 da un ejemplo de aplicación (Sihag et al., 2017).

Figura 11: Curva de infiltración y tiempo



Fuente: (Sihag, et al. 2017).

3.2.8.2.3. Lectura y análisis de datos

Fatehnia et al., (2014) señalan que las tasas de infiltración al final de cada prueba consideran la tasa de infiltración estable y se usan para encontrar valores de conductividad hidráulica con el método de Zhang, (1998). Para esto, se requiere el contenido de agua inicial y final junto con tasas de infiltración para los diversos valores de succión sucesivos.

Al momento de colocar el equipo en el suelo, se inician las mediciones de infiltración, correspondientes a las lecturas de los volúmenes de agua inicial y final en diferentes tiempos. la figura 12 ilustra diferentes momentos de mediciones realizadas en diferentes lugares de muestreo.

Figura 12: Trabajo de medición de infiltración en campo



Rincón de la Victoria

Rincón de la Victoria

Quebrada del Monte

Quebrada del Monte

Fuente: Villena et al., 2018a

3.2.9. Determinación del Número de Curva

El número de curva es un método propuesto por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos [USSCS] que se basa en la altura de precipitación y el valor de un parámetro conocido como número de curva [NC] que toma en cuenta los rasgos

característicos del suelo y su vegetación. El valor de NC, es un parámetro hidrológico de una cuenca que indica el potencial que tiene para generar escurrimiento cuando los suelos no están congelados. Un alto valor de NC producirá gran escurrimiento y viceversa (Chow et al., 1994).

La capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo es un parámetro que depende de la textura, la pendiente del terreno y el espesor de la franja de suelo donde tiene lugar la evaporación. El CHAC utiliza los valores de la humedad máxima del suelo como un parámetro fundamental para la calibración y simulación del modelo de Témez, por lo que la capacidad máxima de humedad del suelo es obtenida relacionando las propiedades del Número de Curva de la cuenca con valores tabulados en el Libro Blanco del Agua de España (Ministerio de Medio Ambiente de España, 2000).

3.3. Teoría y metodología utilizada para la determinación de la calidad de las aguas

Conocer la calidad del agua en la cuenca de estudio es otro tema importante como línea base de investigación. Se han realizado tareas de monitoreo en las diferentes fuentes de agua de la cuenca para determinar los parámetros de calidad. En los temas siguientes se detalla la metodología y materiales utilizados para el propósito.

3.3.1. Monitoreo

El agua es uno de los sustentos esenciales para la salud y la vida WHO/UNICEF JMP., 2015, Abubakar, (2016) y Nwankwoala et al., 2014, indican que en las últimas décadas el mundo ha tenido logros importantes en el área de acceso al agua e higiene en la línea de dotación y suministro.

La optimización de información y la información recopilada de las redes de monitoreo de la calidad del agua implican procesos complicados de toma de decisiones y estrategias de gestión (Singh et al., 2019).

Los países desarrollados monitorean y clasifican su agua de forma periódica. Varios países de la Unión Europea [UE] han desarrollado un sistema nacional de calidad del agua, considerando la estructura característica de sus propios ríos y han utilizado este tipo de índices para revelar la situación actual de su nivel de calidad del agua (Cüneyt y Éva, 2011).

Yadav y Rajesh, (2011) señalan que la contaminación de los cuerpos de agua es una de las áreas de mayor preocupación para los ambientalistas. La calidad del agua es un índice de salud y bienestar de una sociedad donde la industrialización, urbanización y las prácticas agrícolas modernas tienen un impacto directo en los recursos hídricos. Estos factores influyen en los recursos hídricos cuantitativa y cualitativamente.

El reporte anual de la OMS, WHO, 2012, indica que beber agua contaminada junto a una higiene inadecuada o un sistema de tratamiento de aguas deficiente ha causado directas o indirectamente más de un millón de muertes al año.

Las fuentes de agua superficial son eje de desarrollo de los seres humanos que permiten el abastecimiento para las diferentes actividades socioeconómicas llevadas a cabo en los asentamientos poblacionales. No obstante, de forma paradójica muchas de estas actividades causan alteración y deterioro de estas. En general, las aguas superficiales están sometidas a contaminación natural (arrastre de material particulado y disuelto y presencia de materia orgánica natural [MON] y de origen antrópico (descargas de aguas residuales domésticas, escorrentía agrícola, efluentes de procesos industriales, entre otros) (Torres et al., 2009).

La disponibilidad de agua no implica que su calidad permita el uso, la contaminación natural y el hombre ha provocado que sea necesario tratarla antes de destinarla a consumo humano, agrícola e industrial. La calidad del agua varía acorde a la región y por el tipo de subsuelo de los contaminantes (Germán et al., 2012).

Uno de los mayores problemas en el agua es la presencia de metales pesados. Algunos son nutrientes esenciales para las plantas y los animales, micronutrientes como Mn, Mo, Cu, Co, Zn, Sc y V, y, otros como el Ni, Sn y Cr son esenciales únicamente para los animales. Cuando estos elementos están presentes en sistemas ambientales a concentraciones superiores a ciertos niveles, debido a desequilibrios naturales o por introducción antropogénica, pueden ser tóxicos para los seres vivos (Domenech y Peral, 2008).

La toxicidad de los metales pesados depende de su movilidad en el medio, que, a su vez, depende de su especiación química, persistencia y tendencia de acumulación o bioacumulación (Domenech y Peral, 2008).

Los metales pesados que dependen de su concentración son considerados tóxicos o peligrosos para la salud humana (Duruipe et al., 2007). La intoxicación por metales pesados puede deberse a la contaminación del agua potable (por ejemplo, tuberías de Pb, desechos de la industria y del consumidor), la ingesta a través de la cadena alimentaria o altas concentraciones en el medio atmosférico en las proximidades de un medio emisor.

La presencia de metales pesados en el agua de consumo tiene un efecto directo sobre la salud, la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2006), (Loranger et al., 1994) y (Menezes-Filho et al., 2009), señalan que el Mn a muy altas concentraciones o exposiciones pueden producir problemas neurológicos. Por su parte (EPA, 2017) y (Fu y Wang, 2011) indican que el Pb en niños puede producir retrasos en el desarrollo físico y mental; en adultos problemas en el hígado y riñón y elevada presión arterial.

Esteves et al. (1996), mencionan que muchos de los contaminantes que ingresan a un cuerpo de agua superficial, por vía natural o antropogénica, quedan retenidos en los sedimentos que se depositan en el fondo del cauce, causando efectos tóxicos sobre la salud. Asimismo, Mariani y Pompêo, (2008) señalan que estos depósitos tienen un gran valor científico para el estudio de estos ecosistemas, pues conservan un registro histórico del tipo de contaminación que ha tenido lugar en las zonas próximas a su recorrido. Al interactuar con las corrientes de agua ponen en circulación los contaminantes retenidos, alterando la dinámica general de la masa de agua.

De acuerdo con el "Informe Nacional sobre la Gestión del Agua en Bolivia" (Mattos y Crespo, 2000) la mayor parte de la actividad minera en Bolivia se desarrolla en las vertientes endorreicas y áreas superiores del río de la Plata. Los depósitos de estaño existen en forma de casiterita o en forma de minerales de sulfuro de estaño relacionados con otros metales (zinc, manganeso, plomo y plata). Contaminan los ríos por descargas de las aguas empleadas en la extracción y procesamiento o por erosión y disolución de las escorias de las minas. Algunas de estas minas se ubican en los confines del Altiplano cerca a la divisoria continental de aguas, vertiendo éstas a la cuenca del río Amazonas y a la del río de La Plata. Además, la información sobre el flujo de aguas subterráneas afectadas es escaso. Además, no se cuenta con información precisa de los vertidos en las aguas superficiales por la minería de socavón o por el drenaje ácido de la minería a tajo abierto.

Se han publicado algunos resultados relacionados con la contaminación por metales pesados provenientes de fuentes naturales o de las aguas de escorrentía de la minería. Se ha estudiado la eliminación de metales pesados de las aguas de arrastre de lluvia procedentes de minería del Cerro de Potosí utilizando lechos de arcillas (Strosnider y Nairn, 2010). En la cuenca del lago Poopó, una de las cuencas bolivianas más afectadas por el estrés hídrico se estudiaron las fuentes de contaminación de metales pesados procedentes de la minería (Ramos et al., 2012). Previamente, un trabajo diferente proponía una metodología para la evaluación de la contaminación minera en el río Pilcomayo que fue publicada en la Biblioteca Virtual de Salud Pública (Medina, 2005).

Existen diversos informes procedentes sobre la gravedad de la situación ambiental en Bolivia. Se pueden resumir en tres grandes problemas: 1) El impacto del cambio climático sobre la agricultura y los reservorios de agua, 2) La contaminación producida por la actividad minera, agrícola e hidrocarburífera y 3) La expansión de las zonas agropecuarias. Estos problemas tienen un efecto directo sobre el acceso a los alimentos y los servicios básicos de suministro de agua potable (LIDEMA, 2011).

El "Informe Final de Preparación del Perfil Ambiental de Bolivia" desarrollado por Naciones Unidas en Bolivia en 2011 (UE, 2011), identifica las regiones petroleras del sur como zonas con grave daño ambiental. Estas zonas han tenido además un fuerte crecimiento poblacional en los últimos años producto de la migración. Esto ha originado un fuerte incremento de la presión sobre los acuíferos debido al aumento de las manchas urbanas, la generación de aguas residuales, la explotación de los recursos hídricos y minerales (agregados). Otros focos de contaminación hídrica y ambiental han afectado especialmente la cuenca alta del río Guadalquivir en el departamento de Tarija.

La cuenca alta del río Guadalquivir cuenta con muy pocos estudios realizados sobre la presencia de metales pesados y sobre la calidad de sus aguas. Investigadores de Bolivia y de la Universidad de Sevilla publicaron en la Biblioteca Virtual de Salud Pública un análisis de la calidad del agua de la Presa de San Jacinto en Tarija en base a informes preliminares de los cuales no queda constancia de su publicación (Medina et al., 2006). Dicho análisis pone de manifiesto la falta de información veraz sobre el estado y calidad de los cuerpos de agua potable en el entorno. La falta de instalaciones apropiadas para la potabilización de las aguas provenientes de los acuíferos más importantes en la región ha llevado en algunos casos al desabastecimiento de las poblaciones o al uso de fuentes de dudosa calidad.

Con el presente proyecto, se realizó el monitoreo y evaluación del agua en la cuenca del Guadalquivir en 15 puntos de muestreo de las principales fuentes de abastecimiento de agua superficial para consumo humano. Asimismo, se analizó la presencia de metales pesados en lodos provenientes de los embalses de San Jacinto y Huacata (Alvizuri, et al. 2022b).

3.3.1.1. Instrumentos y equipos

El trabajo se la realizó con el apoyo de los laboratorios de la Universidad Católica Boliviana "San Pablo" regional Tarija-Bolivia, Universidad Politécnica de Valencia y la Universidad de Alicante, España.

Para la medición de parámetros de calidad se utilizaron los siguientes equipos:

- Espectrómetro de emisión óptico con plasma de acoplamiento inductivo marca Perkin Elmer 4300, para la medición de metales pesados
- Espectrofotómetro de absorción atómica para metales pesados en agua y lodos
- Equipo móvil multiparamétrico HACH modelo DREL / 2088 para la medición de la conductividad, temperatura, Ph, oxígeno disuelto y sólidos suspendidos totales.
- Turbidímetro portátil HACH modelo DREL/2800-2100Q para la medición de la turbiedad.

- Equipo HACH modelo BODTrak II para la medición de la DBO₅ y, para la DQO un espectrofotómetro HACH modelo DR 3900 con kits tipo viales TNT
- Espectrofotómetro HACH modelo DR 3900 y kits para medir otros parámetros básicos.
- Equipo de apoyo, reactivos y materiales de laboratorios básicos

3.3.1.2. Metodología

El periodo de trabajo, área de estudio, puntos de muestreo y los principales parámetros de medición, se detallan en los siguientes acápite.

3.3.1.2.1. Periodo de muestreo

Un estudio similar realizado en la cuenca de Milluni en La Paz, Bolivia, estableció que para una frecuencia de monitoreo válida debe realizarse al menos dos veces al año en los meses más representativos de cada estación, los cuales se determinaron en enero para la estación húmeda y agosto para la estación seca (Alvizuri et al., 2022).

Para la cuenca del Guadalquivir donde los periodos estacionarios son similares, el monitoreo se realizó entre mayo del 2018 y octubre de 2019, abarcando las 4 estaciones del año. Es importante señalar que en el caso de Tarija las estaciones son muy marcadas en cuanto a temperaturas y caudales. El muestreo se lo realizó en cuatro momentos importantes del ciclo hidrológico de Tarija:

- El primer trabajo de muestreo se realizó entre mayo y junio de 2018 que corresponde a la época de invierno o época seca.
- El segundo momento entre diciembre de 2018 y enero de 2019 que corresponde a la época de lluvia
- El tercer trabajo en época seca, entre mayo y junio de 2019.
- Y el cuarto trabajo entre agosto y octubre de 2019 que representa la época de transición entre un periodo seco e inicio de las lluvias

En Tarija la época húmeda está entre noviembre y febrero, mientras que la época seca se desarrolla entre los meses de mayo a septiembre.

3.3.1.2.2. Área de estudio y puntos de muestreo

El área de estudio se ubica en la alta cuenca del Guadalquivir. Las figuras 13, 14, 15 y 16 muestran la ubicación de los 15 puntos de muestreo distribuidos en las principales fuentes de abastecimiento de Tarija.

Figura 13: Puntos de muestreo: Embalse de San Jacinto



Fuente: Elaboración propia – (Villena, et al., 2021)

El embalse de San Jacinto está ubicado en la zona sureste de la ciudad, se realizaron 5 puntos de monitoreo cercanos a la estación de bombeo. Se analizaron muestras de agua y lodos. El embalse de San Jacinto ha sido construido para el abastecimiento de agua potable a la población de Tarija, sin embargo, la sospecha de contaminación por metales pesados y otros, ha originado la paralización de esta fuente de agua.

Figura 14: Puntos de muestreo: Embalse de Huacata

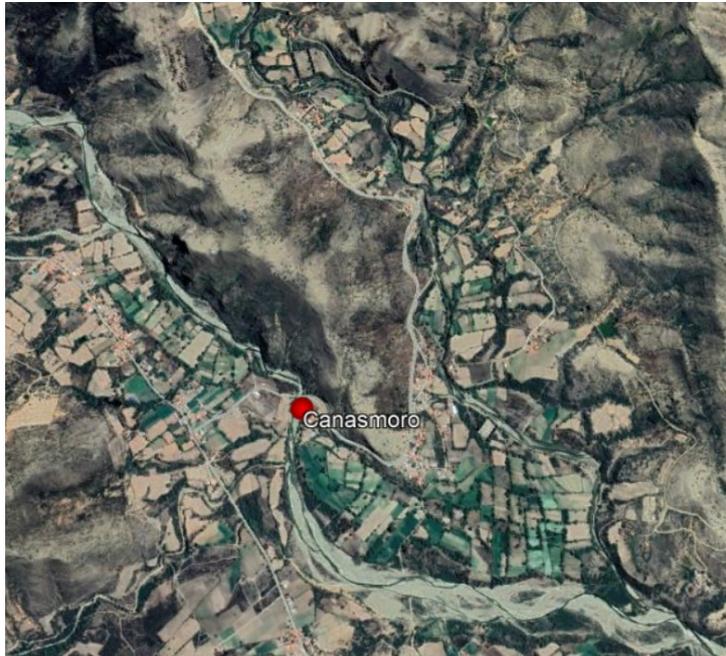


Fuente: Elaboración propia – (Villena, et al., 2021)

La Presa de Huacata, se ubica en la zona norte de la ciudad dentro la cuenca del mismo nombre, se realizaron 5 puntos de monitoreo. El análisis se realizó en muestras de agua y

lodos. La presa ha sido construida para trasvasar parte del agua a la cuenca del Guadalquivir, su explotación y utilización de agua para consumo está paralizada por la sospecha de presencia de plomo.

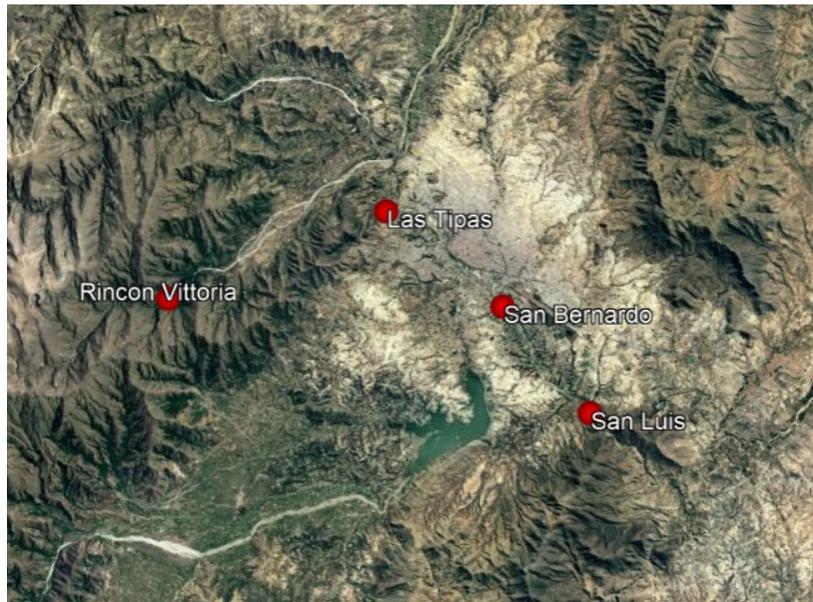
Figura 15: Punto de muestreo: Canasmoro



Fuente: Elaboración propia – (Villena, et al., 2021)

Se monitorearon 4 puntos sobre el río Guadalquivir, 1 en la zona de Canasmoro a la llegada del aporte de Huacata, otro en la obra de toma de Las Tipas, uno intermedio sobre la zona urbana y el último en la salida de la cuenca que se ubica en la zona de San Luís. Estos puntos se encuentran ubicados en las zonas más importantes del área urbana y corresponden a zonas de potencial abastecimiento de agua de consumo. La figura 16 muestra la ubicación de los puntos.

Figura 16: Punto de muestreo: Rincón de la Vittoria y trayecto río Guadalquivir



Fuente: Elaboración propia – (Villena, et al., 2021)

En la zona del Rincón de la Vittoria se monitoreo 1 punto ubicado en la obra de toma. Esta zona es la fuente de abastecimiento más importante de la ciudad de Tarija ya que brinda más del 60% de agua superficial. En la figura 16 se observa la ubicación de la zona.

3.3.1.2.3. Parámetros de control

Los parámetros de control se definieron en aplicación a la Norma Boliviana de calidad de agua (NB512, 2010). Corresponden a parámetros mínimos, básicos y complementarios, dando mayor observación a la presencia de metales pesados. Los parámetros se detallan a continuación:

a) Parámetros de control mínimo: pH, Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$), Turbiedad (NTU), Sólidos totales disueltos (mg/l) y Coliformes totales (UFC/100 mg).

b) Parámetros de control básico y complementario: Dureza, Magnesio (mg/l), Sulfatos (mg/l), Nitritos (mg/l), Nitratos (mg/l), Fósforo (mg/l), Oxígeno disuelto (mg/l), DBO5 y DQO.

c) Metales: Se analizó la presencia de 35 metales.

- Litio (mg/l)
- Cromo (mg/l)
- Estroncio (mg/l)
- Plomo (mg/l)
- Berilio (mg/l)
- Manganeso (mg/l)
- Molibdeno (mg/l)
- Bismuto (mg/l)
- Boro (mg/l)
- Hierro (mg/l)
- Plata (mg/l)
- Talio (mg/l)
- Sodio (mg/l)
- Cobalto (mg/l)
- Cadmio (mg/l)
- Uranio (mg/l)
- Magnesio (mg/l)
- Níquel (mg/l)
- Estaño (mg/l)
- Indio (mg/l)
- Aluminio (mg/l)
- Cobre (mg/l)
- Antimonio (mg/l)
- Potasio (mg/l)
- Zinc (mg/l)
- Bario (mg/l)
- Calcio (mg/l)
- Arsénico (mg/l)
- Lantano (mg/l)
- Titanio (mg/l)
- Selenio (mg/l)
- Cerio (mg/l)
- Vanadio (mg/l)
- Rubidio (mg/l)
- Mercurio (mg/l)

3.3.1.2.4. Muestreo, ensayos y rangos de evaluación y control

El muestreo ha sido realizado en cumplimiento a lo especificado en la normativa boliviana (NB496. 2005). Para los métodos de ensayo se utilizaron las normativas internacionales, como las de la Organización Internacional de Normalización-ISO, guía ISO/IEC 17025:1999 “Requisitos generales relativos a la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración (Norma ISO/IEC 17025, 1999). Asimismo, se aplicaron protocolos estándar de las muestras obtenidas para el análisis de todos los parámetros fisicoquímicos detallados (Emenike et al., 2018).

Los parámetros físicos/químicos medidos al agua superficial como el Ph, conductividad, sólidos disueltos totales, temperatura, oxígeno disuelto y turbiedad han sido medidos in-situ con los equipos multiparámetro móvil HACH modelo DREL/2088 y un turbidímetro portátil HACH modelo DREL/2800-2100Q. Las concentraciones de los otros parámetros como fosfato, nitratos, nitritos, hierro y cobre han sido determinadas en laboratorio con un espectrofotómetro HACH modelo DR 3900.

Para la DBO5 se utilizó un equipo HACH modelo BODTrak II y para la DQO el espectrofotómetro HACH modelo DR 3900 con kits tipo viales TNT 825. Para el análisis biológico y la estimación de coliformes totales se usó la tecnología de filtración con membrana y reactivo Colibblue+9.

Los metales pesados en el agua superficial y lodos han sido medidos con un espectrofotómetro de emisión óptico con plasma de acoplamiento inductivo marca Perkin Elmer 4300.

Para el análisis y evaluación de los resultados se utilizaron las normas de calidad de agua y parámetros máximos permisibles de Bolivia (NB512, 2010), España (Real Decreto 817, 2015), la establecida por la organización mundial de la salud (WHO, 2006) y la establecida por la Agencia de protección Ambiental de los Estados Unidos – EPA (EPA, 2006). La tabla 18 muestra los rangos máximos permisibles para cada norma.

Tabla 18: Rangos máximos permisibles: Parámetros básicos y mínimos

Parámetro	NB512	RD817/2015	WHO	EPA MCL
Ph	6-9	6.5-9.5	6.5-8	6.5-8.5
Conductividad (µs/cm)	1500	2500	---	2500
Turbiedad (NTU)	5	1	<1	5
Sólidos Totales Disueltos (mg/l)	1000	---	600	500
Coliformes totales (UFC/100 mg)	0	0	0	0
Oxígeno disuelto (mg/l)	---	---	---	---
Dureza (mg/l) CaCO ₃	500	---	100-300	---
Sulfatos (mg/l)	400	250	250	250
Nitritos (mg/l)	0.1	0.1	3	1
Nitratos(mg/l)	45	50	50	10
Fósforo (mg/l)	---	---	---	---
DBO ₅	---	---	---	5-7
DQO	---	---	---	40

Fuente: elaboración propia basada en (NB512, 2010), (Real Decreto 817, 2015), (EPA, 2006) y (WHO, 2006).

La tabla 19, muestra los límites máximos permitidos para los metales pesados analizados en la presente. Para un mejor análisis comparativo entre los resultados del monitoreo y los parámetros máximos permitidos, se utilizarán los valores más representativos de cada normativa.

Tabla 19: Rangos máximos permisibles: Metales pesados

Parámetro	NB512	RD817/2015	WHO	EPA MCL
Plomo (mg/l)	0.01	0.01	0.01	0
Hierro (mg/l)	0.3	0.2	0.3	0.3
Manganeso (mg/l)	0.1	0.05	0.1	0.05

Fuente: elaboración propia basada en (NB512, 2010), (Real Decreto 817, 2015), (EPA, 2006) y (WHO, 2006).

3.4. Teoría y metodología aplicada en el proceso de Osmosis Inversa

La metodología y teoría aplicada en el análisis y modelación de la OI, se describe en los siguientes apartados.

3.4.1. Diseño y Montaje de una planta experimental piloto de Ósmosis Inversa

Entre las diferentes tecnologías que permiten convertir el agua contaminada, salobre o el agua de mar en agua potable para el consume humano, las térmicas y la separación por membranas son las que más se destacan. De las primeras, se destacan la destilación flash multietapa [MSF], la destilación de múltiple efecto [MED] y la destilación de compresión de vapor [DCV], mientras que de las segundas se puede nombrar la técnica de electrodiálisis [ED] o la de ósmosis inversa [OI] (Voutchkov, 2013).

Las técnicas de tratamiento de metales pesados en las aguas dependen de diferentes factores que permite clasificarlas como convencionales. Refiriéndose a las técnicas que habitualmente se emplean para la remoción de estos contaminantes como la de filtración por membranas mediante electrodiálisis, nanofiltración, ultrafiltración y ósmosis inversa, así como el intercambio iónico, adsorción, precipitación química o la de coagulación-floculación, y, las no convencionales como el proceso de adsorción de metales con la utilización de materiales naturales, la fitorremediación, biopolímeros, hidrogeles o las ceniza volante (Caviedes, et al. 2015).

La ósmosis inversa, es un proceso de permeación a través de membrana para la separación de determinadas especies por un mecanismo de difusión controlada. Tiene la capacidad de seleccionar elementos de tan solo 1 nm, lo que le otorga un amplio abanico de capacidades de tratamiento (Nemerow y Dasgupta, 1998).

La tecnología de la ósmosis inversa se basa en el proceso de ósmosis, fenómeno natural que se produce cuando dos soluciones, de distinta concentración salina, puestas en contacto a través de una membrana semipermeable tienden a igualar sus concentraciones (Millevialle et al., 1999, Kucera, 2010). Se crea un flujo natural del agua de la solución menos concentrada (mayor potencial químico del agua pura) hacia la solución de mayor concentración, hasta que se llegue a un equilibrio en donde hay igualdad de concentraciones. La fuerza que provoca ese movimiento se conoce como presión osmótica y está relacionada con la concentración de sales en el interior de ambas soluciones.

Las membranas son una parte fundamental del proceso de ósmosis inversa. Actualmente, las membranas disponibles de manera comercial corresponden a las derivadas de dos tipos de polímeros: poliamidas aromáticas [PA] y acetato de celulosa [AC]. Sin embargo, existen estudios que indican limitaciones en las membranas de AC tales como un bajo rango de pH (4.5-7.5) operacional, susceptibilidad a ataques biológicos y un rango acotado de temperatura de operación (Li y Wang, 2010).

Ahmed, et al. (2019) señalan que más del 70% de procesos de desalinización instalados en el mundo son operados mediante OI. Y, que los nuevos materiales de membrana, los métodos

de pretratamiento mejorados y el diseño de procesos novedosos han permitido que la tecnología opere cerca del límite energético teórico. A su vez, Lin y Elimelec, (2015), indican que las innovaciones en la configuración del sistema, como el uso de múltiples etapas y/o pasos, incorporadas en plantas de OI a gran escala para superar los inconvenientes del proceso de OI de una sola etapa, han dado como resultado un menor consumo de energía y una mayor producción de agua.

La OI Es una opción cada vez más popular en el tratamiento de agua en ingeniería química y ambiental. El uso de sistemas de ósmosis inversa para eliminar metales pesados en aguas de consumo ha sido investigado, pero aún no se han aplicado ampliamente a nivel industrial (Fu y Wang, 2011), debido fundamentalmente a cuestiones económicas.

Algureiri y Abdulmajeed (2016) investigaron la eliminación de metales pesados en aguas residuales provenientes de la industria. Los resultados mostraron una alta eficiencia de eliminación de metales pesados mediante el proceso de OI con tasas de rechazo del 98,5 %, 97,5 % y 96 % para los iones Ni(II), Pb(II) y Cu(II) respectivamente.

Mohsen-Nia et al., (2007), lograron eliminar con éxito iones de Cu^{2+} y Ni^{2+} con un proceso de ósmosis inversa y la eficiencia del rechazo de los dos iones aumentó hasta un 99.5%. Por otro lado, Dialynas y Diamadopoulos, (2009) aplicaron un biorreactor de membrana a escala piloto en combinación con osmosis inversa y encontraron que la remoción de metales pesados fue muy alta.

El uso de la OI en la eliminación de metales pesados se ha centrado en la eliminación de cationes tales como Cu^{2+} y Ni^{2+} (Mohsen-Nia et al., 2007), Cu^{2+} (Zhang et al., 2009), As (Chan and Dudeney, 2008), Ni^{2+} y Zn^{2+} (Ipek, 2005) o Zn^{2+} y Cu^{2+} (Ujang and Anderson, 1996) entre otros.

Hay pocos estudios realizados con OI con cationes como Fe, Hg, Sb, Pb y Mn. Se ha utilizado OI en la eliminación de Hg en aguas de refinerías (Urgun-Demirtas et al., 2012). Para el caso el Sb, se ha estudiado el efecto del pH en la eliminación en aguas de consumo utilizando OI con buenos resultados (Kang et al., 2000).

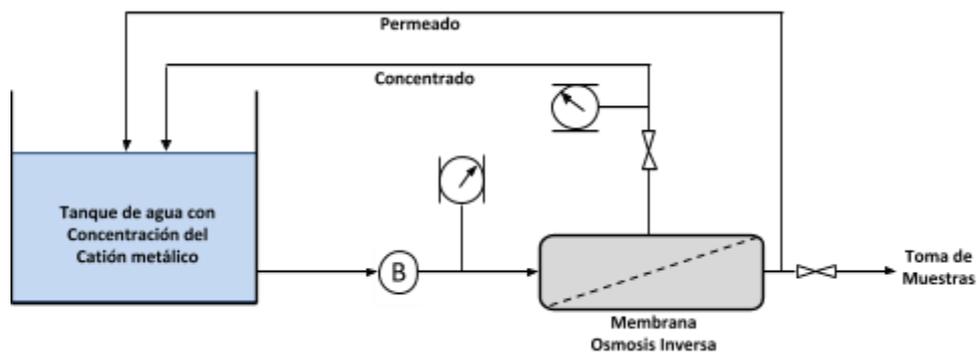
El diseño de una planta de ósmosis inversa es mucho más complejo que el considerar únicamente tipos de membranas y una bomba alta presión. Es necesario definir y optimizar parámetros y determinar métodos de pretratamiento del agua de alimentación que afectan a la vida de las membranas e inciden en el consumo energético, y generalmente, implican a sistemas de desinfección, filtración, acidificación, inhibidores de precipitación, y microfiltración entre otros (Garcia, 2012).

En la presente tesis se realizó el diseño y montaje de una planta piloto experimental de ósmosis inversa y se elaboró el protocolo de funcionamiento para la eliminación del Fe, Pb y Mn. (Villena et al., 2020a).

3.4.1.1. Montaje y funcionamiento de la planta

Para lograr un proceso experimental eficiente en la eliminación de metales pesados mediante ósmosis inversa, se plantea un diseño, construcción y puesta en marcha de una instalación piloto como la mostrada en la figura 17 (Villena, et al. 2020a; Villena, et al. 2022b).

Figura 17: Esquema general de funcionamiento conceptual de la planta piloto



Fuente: Villena, et al. 2020a; Villena, et al. 2022b

El sistema trabaja en circuito cerrado. La disolución de agua a tratar se introduce en el depósito y mediante bombeo se circula a la etapa de OI (membrana) donde el concentrado y el permeado son recirculados al depósito. El proceso se mantiene en continuo funcionando hasta que el J_v (flux) permanece constante. En ese momento se toman muestras del permeado y se analiza la concentración de cationes metálicos.

3.4.1.1.1. Membrana

El sistema utiliza una membrana comercial Keesen modelo ULP-2540 (Keensen, 2020) y una carcasa Wave Cyber (Shanghai) modelo 2540.300.1. La membrana es del tipo poliamida, enrollada en espiral con un área activa de 2.5 m², y permite un permeado de 2.84 m³/d con un rechazo de concentrado de NaCl hasta un 99.3%. La máxima presión de trabajo (aplicada) es de 600 psi (40 bares) y proporción mínima de concentrado de 8%, según datos del fabricante. La figura 18 muestra el detalle y configuración de la membrana comercial utilizada.

Figura 18: Membrana Semipermeable



Fuente: Keensen, 2020

3.4.1.1.2. Bomba y accesorios de control manual

El sistema funciona con una bomba comercial LEO-LVS1-30 centrífuga/eléctrica multietapa de 1.5 HP de potencia, 1.8 m³/h y una presión máxima de operación de hasta 35 bares. La figura 19 ilustra la bomba utilizada.

Figura 19: Bomba centrífuga



Fuente: Proveedor <http://www.luzamsrl.com.bo/catalogoController/getUno/53>

El sistema es montado en un marco de prueba de aluminio y una mesada de acero inoxidable. Al ingreso de la bomba se instaló un filtro de agua capaz de retener posibles materiales en suspensión, además la bomba cuenta con una válvula de seguridad ante posibles cambios de presión que puedan dañar la membrana.

El sistema de bombeo ha sido configurado con un variador de frecuencia que permite la regulación y manipulación del caudal de ingreso al sistema, asimismo cuenta con manómetros de glicerina al ingreso y salida de la membrana para visualizar y controlar las presiones de trabajo con escalas de 1 a 20 bares de presión.

3.4.1.1.3. Sistematización del proceso experimental

Para la evaluación del comportamiento y funcionamiento de la membrana es necesario la medición permanente de los flujos del permeado y concentrado, para este propósito se instalaron sensores de medición de caudales a la salida del permeado y concentrado. Asimismo, se instaló un rotámetro analógico a la salida del concentrado para tener un sistema de control visual.

Los sensores son de la marca Gems Sensors, con escalas de 0.5 a 5 l/min colocado a la salida del permeado y de 1 a 25 l/min a la salida del concentrado. Los sensores han sido sistematizados y programados a una tarjeta Arduino conectada a un ordenador que permite la medición y registro de datos de caudal a tiempo real. Los sensores se muestran en las figuras 20 y 21.

Figura 20: Sensor de caudal en el permeado con escala de 0.5 a 5 l/min



Fuente: Proveedor- <https://es.rs-online.com/web/p/sensores-e-indicadores-de-flujo/4468286/>

Figura 21: Sensor de caudal en el concentrado con escala de 1 a 25 l/min



Fuente: Proveedor- <https://es.rs-online.com/web/p/sensores-e-indicadores-de-flujo/9074031/>

3.4.1.2. Diseño de experimentos

Para la determinación del número de experimentos y su interrelación entre variables se utilizó el método de fracción factorial y matriz ortogonal, esto permitió un diseño experimental con una adecuada optimización de recursos económico y tiempo.

Tanto el número de experimento como la combinación de variables y niveles ha sido elaborado utilizando el software Statgraphics Centurion 13.

3.4.1.2.1. Diseño factorial fraccional

Al aumentar el número de variables bajo estudio con un diseño factorial 2^K , el número de experimentos aumenta geométricamente. Así, si el número de variables (K) es grande, el número de experimentos necesarios será 2^K y permitirán estudiar 2^k efectos lo cual no significa que todos ellos sean de interés (Tort, 1985).

La idea es realizar sólo una fracción de los experimentos que requeriría un factorial completo implica que sólo se podrá estimar una fracción de los efectos. Este ahorro en el número de experimentos a realizar con la consiguiente reducción en la información obtenida se puede justificar de tres maneras diferentes, todas ellas relacionadas con el postulado del "effect sparsity" (Box y Meyer, 1985).

Tort, (1985), indica que uno de los principal justificativo para optar por un diseño factorial fraccional, es la de la proyección. Supóngase que de los R factores considerados sólo unos pocos cuya identidad se desconoce, sean activos (proporcionen efectos principales o interacciones entre ellos). Argumentando como (Box y Hunter, 1961) un diseño que permita estudiar esos "d" factores sería un fraccional de resolución $R = d + 1$. De hecho, si las variables son asignadas utilizando cuidadosamente los conocimientos previos al experimento un diseño de resolución menor puede ser suficiente.

3.4.1.2.2. Ortogonal Arrays

Las orthogonal arrays son matrices de diseño de experimentos factoriales altamente fraccionados. Precisamente por ser diseños factoriales son ortogonales, es decir que proporcionan estimaciones de los efectos que son independientes entre sí (Tort, 1985).

Taguchi contribuyó a la difusión del Diseño de Experimentos, ya que éste, a diferencia de lo que ocurre con el diseño clásico, no requiere ser un experto en el método para estar en condiciones de aplicarlo (Taguchi et al., 2005).

Taguchi innovó y simplificó el diseño de experimentos con la introducción de las tablas conocidas como arreglos ortogonales [AO] (Orthogonal Arrays) a través de las cuales se determina de una manera estandarizada la combinación de los niveles de los factores que se probarán en cada ensayo. Los AO permiten examinar hasta un total de $n-1$ factores, siempre y cuando no se consideren las interacciones entre los mismos. Facilitan y, en algunos casos, reducen gran parte del esfuerzo del diseño experimental porque posibilitan evaluar simultáneamente numerosos factores con un número mínimo de ensayos, permitiendo así una disminución en los recursos necesarios para la experimentación (Hernández et al., 2015).

El método de Taguchi logra resolver problemas de Diseño de Experimentos de manera práctica. La utilización del diseño clásico implica en general destinar mayores recursos a la

experimentación (mayor número de unidades experimentales, más personal involucrado, más tiempo, incluso puede llegar a requerirse un lugar especial para la experimentación al haber más réplicas, esfuerzos para mantener de manera homogénea las condiciones de experimentación, entre otros). El método de Taguchi en algunos casos constituye el único camino posible que tienen las empresas para llevar a cabo una experimentación (Hernández et al., 2015).

3.4.1.2.3. Determinación de variables

Las variables de control y respuestas definidas para el proceso experimental se detallan en los siguientes apartados.

3.4.1.2.3.1. Variables y niveles de Control

Se determinaron 3 variables de control y 3 niveles de operación, la tabla 20 muestra el detalle de niveles que debe tener cada metal.

Tabla 20: Variables y niveles de experimentación por metal

Variable	Presión (Pas.) X10 ⁵			Caudal medio Ingreso (m ³ /seg)			Concentración (mol/m ³)		
	P1	P2	P3	Q1	Q2	Q3	C1	C2	C3
Niveles	5.0	7.5	10	1.22E-04	1.39E-04	1.47E-04	C1M1, C1M2, C1M3	C2M2, C2M2, C2M3	C2M2, C2M2, C2M3

Fuente: elaboración propia

Donde:

P1, P2 y P3: Corresponde a los 3 niveles de la presión, Bajo, Medio y Alto.

Q1, Q2 y Q3: Corresponde a los 3 niveles de caudal medio de ingreso, el caudal medio se determina durante las corridas de cada experimento, haciendo una relación entre el caudal de ingreso al sistema y el caudal de concentrado, los niveles están determinados en rangos mínimos de trabajo.

C1, C2 y C3: Corresponde a los 3 niveles de las concentraciones del metal en el agua combinadas con NaCl, donde M1 es para el Pb, M2 Fe y M3 Mn.

3.4.1.2.3.2. Variables de respuesta

Las variables de respuesta objeto del presente trabajo, están definidas por:

- Flux (m³/m².seg): Que permitirá determinar la eficiencia del proceso.

- Índice de rechazo en la Remoción del metal (%): Que medirá la eficacia en la remoción del metal en el agua.

3.4.1.2.4. Número de experimentos

Para la determinación del número de experimentos se utilizó la metodología propuesta por Taguchi. Los datos obtenidos y la determinación del número de experimentos, así como las interacciones fueron analizados utilizando el software estadístico comercial Statgraphics Centurion 13 a través del modelo de superficie de respuesta predictivo. Para este efecto, se utilizó el método de la fracción factorial con 3 niveles, determinando 9 pruebas para cada metal, en la tabla 21 se muestran las interacciones entre variables definidas por el software (Villena, et al. 2020a).

Tabla 21: Número de experimento e interacciones entre variables

Ensayo	Variables		
	P (Pas) X10 ⁵	Q (m3/seg)	Cf (mol/m3) – catión metálico
1	10	1.22E-04	C3Pb, C3Fe y C3Mn
2	5	1.47E-04	C3Pb, C3Fe y C3Mn
3	7.5	1.47E-04	C1Pb, C1Fe y C1Mn
4	5	1.39E-04	C2Pb, C2Fe y C2Mn
5	5	1.22E-04	C1Pb, C1Fe y C1Mn
6	7.5	1.22E-04	C2Pb, C2Fe y C2Mn
7	7.5	1.39E-04	C3Pb, C3Fe y C3Mn
8	10	1.47E-04	C2Pb, C2Fe y C2Mn
9	10	1.39E-04	C1Pb, C1Fe y C1Mn

Fuente: elaboración propia, Villena et al., 2020a, basado en el diseño del Statgraphics 13

3.4.1.3. Pruebas iniciales de corrección y verificación de la membrana.

Existe en el mercado una amplia gama de membranas comerciales utilizadas para la Ósmosis Inversa, los proveedores ofertan membranas con características de operación estándar bajo condiciones de operación especificadas. Estas condiciones deben ser verificadas antes de proceso de experimentación. La temperatura es una variable muy difícil de manipular en un trabajo experimental por lo que esta variable será utilizada como un factor de ajuste (Villena, et al. 2020a).

3.4.1.3.1. Prueba de ajuste por temperatura.

Lora et al., (2020), señala que la temperatura es un parámetro muy difícil de controlar en un medio natural, sin embargo, en un proceso operativo en planta es importante evaluar su efecto en el funcionamiento de la OI.

Por su parte, (Huang y Lin, 1968), menciona que la temperatura es un factor importante en el análisis y evaluación del rendimiento de la membrana y comportamiento de los flujos de permeado y concentrado que repercuten en el flux de la membrana. Por esta razón, y dada la complejidad de manipular la temperatura en el proceso experimental, se aplicó el modelo de Arrhenius para el ajuste de los resultados experimentales. La teoría del modelo de Arrhenius es planteada con la ecuación (27):

$$A = A_0 e^{-\Delta H/R (1/T - 1/T_0)} \quad (27)$$

Donde:

A_0 = es la permeabilidad a tiempo T_0 .

Por su lado, la ecuación del flux de agua se define como (28):

$$J = A(\Delta P - \Delta \Pi) = A_0 e^{-\Delta H/R (1/T - 1/T_0)} (\Delta P - \Delta \Pi) \quad (28)$$

Donde:

ΔP = es la diferencia de presión entre las caras de la membrana, es decir la presión media entre la entrada y salida del módulo si el permeado está a presión atmosférica.

$\Delta \Pi$ = es la diferencia de presión osmótica de la disolución alimento y la del permeado.

De esta forma si queremos normalizar el flux J_T , obtenido a una temperatura diferente a T_0 , a su valor J_{n0} , que en nuestro ajuste es 293 K tendremos las expresiones (29) y (30):

$$J_T/J_{n0} = A(\Delta P - \Delta \Pi)/A_0(\Delta P - \Delta \Pi) = A_0 e^{-\Delta H/R (1/T - 1/T_0)} (\Delta P - \Delta \Pi)/A_0 e^{-\Delta H/R (1/T_0 - 1/T_0)} (\Delta P - \Delta \Pi) \quad (29)$$

$$J_T/J_{n0} = e^{-\Delta H/R (1/T - 1/T_0)} \quad (30)$$

A partir del flux medido a una cierta temperatura, la ecuación del flux normalizado a T_0 a 293 es (31) y (32).

$$J_{n0} = J_T e^{-\frac{\Delta H}{R} (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} \quad (31)$$

$$J_{n0} = J_T e^{-\frac{\Delta H}{R} (\frac{1}{T} - \frac{1}{293})} \quad (32)$$

Donde:

J_T = Flux

$\Delta H/R$ = Energía de activación obtenida a partir de la pendiente de la línea graficada entre $\ln(A)$ y $1/T$.

T = Conversión de temperatura de °K a °C = $t+295$

t = temperatura obtenida durante el experimento

Jno = Flux final luego de la conversión

3.4.1.3.2. Verificación de permeabilidad bajo condiciones del proveedor

Para la puesta en marcha del proceso experimental, previamente se realizó la prueba de eficiencia de la membrana considerando las condiciones de testeo indicadas por el proveedor, de acuerdo con lo siguiente.

- Performance/Eficiencia: mínimo el 99% de rechazo de sal.
- Funcionamiento con 10 bar de presión.
- Temperatura máxima de 25°C.
- Concentración de NaCl de 1500 ppm.
- Datos tomados después de 30 minutos de operación.

3.4.1.4. Aguas sintéticas, química y equipamiento

El estudio experimental a nivel de laboratorio con aguas naturales se torna complicado por varias razones; a) dificultad de transporte de grandes muestras para ser llevadas al laboratorio; b) demanda importante de tiempo para trasladarse a tomar permanentemente muestras para alimentar las plantas; c) variabilidad en las características fisicoquímicas y bacteriológicas de las aguas naturales; d) riesgos de ensuciamiento y pérdida de la eficiencia de la membrana por la posible presencia de microorganismos patógenos, sólidos en suspensión, otros metales, etc. y; e) la necesidad de realizar un tratamiento primario antes del ingreso a la planta piloto lo que implica mayor tiempo y dinero.

Por las dificultades expuestas, surge la necesidad de realizar el proceso experimental con aguas sintéticas de preparación sencilla a base de agua destilada, sales de los metales estudiados y cloruro de sodio [NaCl]. Las sales de metal permiten simular las concentraciones en el agua natural. El NaCl permite simular supuestas concentraciones excedentes de otros compuestos en el agua natural. Sin embargo, es importante señalar que al utilizar agua destilada en el estudio (sintéticas), estas tienen cargas nulas de otros organismos patógenos y otras concentraciones contaminantes.

Los experimentos han sido diseñados para determinar el comportamiento de las membranas con la utilización de aguas sintéticas. Las aguas sintéticas han sido elaboradas en 60 litros para cada metal con la utilización de sales de acuerdo con el siguiente detalle.

- Para el análisis de plomo: se utilizó nitrato de plomo Pb (NO₃)₂ marca Merck con 99.5% de pureza.

- Para el análisis del hierro: se utilizó cloruro férrico (Fe Cl_3) marca Merck con 99.5% de pureza.
- Para el análisis del manganeso: se utilizó sulfato de manganeso hidrato (MnSO_4) marca Biopack con 99.5% de pureza.
- El cloruro de sodio (NaCl) utilizado es de la marca BIOPACK.
- Para el pesaje de las sales se utilizó una balanza electrónica de 4 dígitos.

3.4.1.4.1 Cálculo de las soluciones de metal

Las cantidades de sales de metal y cloruro de sodio utilizadas en la elaboración de las aguas sintéticas han sido calculadas a partir de los valores encontrados en el monitoreo. Se detalla la teoría de cálculo utilizada.

3.4.1.4.1.1. Sales de metal:

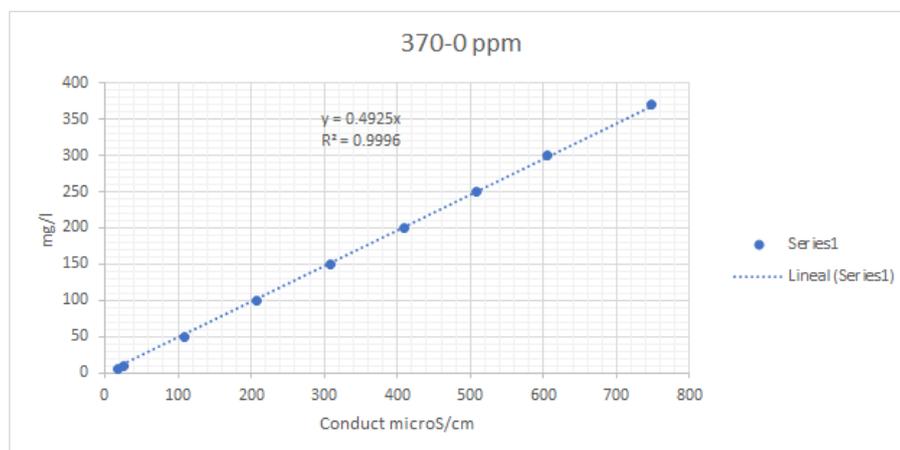
Se realizaron los cálculos de las cantidades de sal requerida para preparar 60 litros de agua sintética.

3.4.1.4.1.2. Cloruro de sodio (NaCl):

Se colocó cloruro de sodio en concentraciones equivalentes a la conductividad encontrada durante el proceso de monitoreo. Para el cálculo de la cantidad de NaCl se utilizó la curva experimental (Domínguez, 2018) que se muestra en la figura 22 y la regresión expresada en la ecuación (33).

$$Y = 0.4925 x \quad (33)$$

Figura 22: Curva empírica para determinar la cantidad NaCl



Fuente: Domínguez, (2018)

3.4.1.5. Conversiones experimentales.

En plantas de procesamiento a nivel industrial, la conversión de las desaladoras en España y otros países está entre el 40% y el 50%, independientemente del año de puesta en marcha y del tamaño de la desaladora. Antes de 1990, los índices se situaban en el rango de 30-40% (Cabero, 2015).

El proceso industrial de osmosis inversa utiliza sistemas en serie y paralelo para lograr conversiones del permeado vs. Concentrado de hasta el 90%. Se utiliza membranas colocadas en serie para que el concentrado de la primera membrana ingresa a una segunda membrana permitiendo un incremento del caudal de permeado, este proceso se repite hasta lograr que el permeado llegue hasta un 90% de eficiencia.

Con el objeto de poder evaluar el comportamiento de la membrana simulando un proceso industrial, se aplican conversiones que permita que las concentraciones de metales sean incrementadas en el flujo de alimento y llegar a conversiones óptimas. La máxima concentración del catión metálico encontrada en el monitoreo será considerada como el primer nivel de análisis, esta concentración será incrementada en conversiones de entre 5 y 10 para tener un nivel medio y alto de las concentraciones del metal en el flujo de alimento.

En la tabla 22 se detallan los niveles de concentraciones utilizadas en el diseño de experimentos.

Tabla 22: Conversiones y niveles de concentración de metales

Nro.	Metal	Concentración máxima de monitoreo (mol/m ³)	Conversión (mol/m ³)		
			C1 (Baja)	C2 (media)	C3 (alta)
1	Plomo	1.5E-04	1.5E-04	7.5E-04	15.1E-04
2	Hierro	36.8E-03	36.8E-03	184.05E-03	1049.5E-03
3	Manganeso	9.23E-03	9.23E-03	46.15E-03	92.29E-03

3.4.1.6. Verificación de la solubilidad de las sales de metal

Con el objeto de analizar una posible precipitación de las sales en la membrana durante los experimentos y evitar el ensuciamiento prematuro, se realizó la verificación de la solubilidad de las sales.

3.4.1.6.1. Ensuciamiento

El ensuciamiento o fouling es el proceso resultante de la pérdida del rendimiento de una membrana debido a la deposición de sustancias disueltas sobre su superficie externa y/o en sus poros (Koros et al., 1996).

Carrasco, (2003) define al ensuciamiento como la acumulación de depósitos bióticos y abióticos sobre una superficie en contacto con un fluido, generando una estructura o película en forma de «torta». Este fenómeno originado sobre las membranas modifica la constitución de la superficie reduciendo la cantidad de permeado lo que origina el aumento de la presión de trabajo necesaria y agudizan el fenómeno de polarización ya que retrasan la retrodifusión de las sales hacia la corriente principal.

Según Sadhwani, (2002), los principales tipos de ensuciamiento en las membranas de ósmosis inversa son.

- Ensuciamiento por precipitaciones (de sales minerales y de óxidos metálicos).
- Ensuciamiento por depósitos (de partículas de gran tamaño, de sustancias coloidales y de sustancias biológicas).
- Ensuciamiento por circunstancias especiales (azufre coloidal y compuestos orgánicos).

La precipitación de sales minerales y de óxidos metálicos favorece la aparición de una capa o torta de materiales en la superficie de las membranas. Las sales minerales que destacan al ensuciamiento son el carbonato cálcico, sílice, fluoruro de calcio y sulfatos de calcio, bario y estroncio, mientras que los óxidos metálicos que pueden precipitar son los de aluminio, hierro y manganeso (Quintana, 2010).

Es importante distinguir entre el ensuciamiento por precipitación y el ensuciamiento adsortivo, el primero genera la formación de la suciedad debido a que las sales están concentradas más allá de sus solubilidades. En el segundo caso se genera una deposición de materiales en los poros de la membrana conduciendo a una reducción de diámetro del poro y, por consiguiente, a un aumento de la resistencia de la membrana (Quintana, 2010).

El ensuciamiento disminuye con un adecuado pretratamiento, con la adición de productos químicos y con una limpieza periódica (Quintana, 2010).

3.4.1.6.2. Ensuciamiento inorgánico o por incrustaciones/scaling

Las incrustaciones se originan por la precipitación de sales pocos solubles y metales, siendo el hierro y manganeso los que más precipitan en los procesos de OI (Quintana, 2010).

Shirazi et al., (2010) señalan que cuando se excede a la solubilidad de una sal, esta precipita y forma una incrustación, produciendo cristales sólidos directamente en la superficie de la membrana.

Los elementos como hierro y manganeso pueden oxidarse desde una forma soluble a una forma insoluble y precipitar en la membrana. Aunque podrían incluirse en la categoría de ensuciamiento inorgánico, su origen está más relacionado con problemas prácticos de operación (Peña et al., 2013). El hierro y el aluminio pueden ser un problema cuando se utilizan coagulantes basados en estos metales para el pretratamiento del agua. Tanto el cloruro férrico y el aluminio se sobredosifican y pueden dar lugar a post-precipitaciones y ensuciar la membrana como un sólido en suspensión (Melián, 2015).

El control del ensuciamiento de las membranas se basa en las siguientes metodologías (Melián, 2015).

1. Pre-tratamiento del agua de alimentación.
2. Limpiezas periódicas de las membranas.
3. Mejora de las propiedades de las propiedades antifouling de las membranas.
4. Evaluación y optimización del funcionamiento del sistema (estrategias de operación).
5. El uso de modelos de predicción.

Por lo que es importante entender la importancia y los efectos interactivos que causan diversos tipos de ensuciamiento para el control oportuno del ensuciamiento (Li y Elimelech, 2006 y Sahachaiyunta et al., (2002).

Existen formas y metodologías para evitar el ensuciamiento por incrustación en las membranas. Lee y Lee, (2000) recomienda el aumento de la velocidad del fluido, mientras que Greenberg et al., (2005) y Bonné et al., (2000), proponen la adición de antiincrustantes para la inhibición de la formación del incrustamiento, por su lado Choi et al., (2009) evaluaron la combinación de varios tipos de pre-tratamiento (químicos y físicos).

Existen muchos modelos y numerosas investigaciones realizadas para explicar y predecir el ensuciamiento por precipitación de sales en diferentes superficies y condiciones de trabajo (Boerlage et al., 1999), y en menor medida se ha examinado los mecanismos de la formación de las incrustaciones en los sistemas de membranas (Lee y Lee, 1999 y Oh et al., 2009).

3.4.1.6.3. Equilibrio de solubilidad.

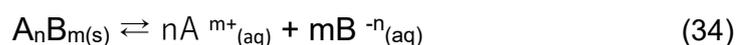
Sanchez y Sanz, (1985), señala que la precipitación se basa en la diferencia de solubilidad entre los componentes de una disolución o mezcla.

La solubilidad [S] es la capacidad de una sustancia de disolverse en otra, y se expresa en términos de la masa de una sustancia (denominada el soluto) que puede disolverse en una masa de otra (denominada el disolvente).

Los factores que dependen de la solubilidad de un compuesto poco soluble están.

- Fuerza iónica del medio.
- Efecto salino.
- pH.
- Producto de solubilidad.

El producto de solubilidad es definido como la constante de equilibrio de la disociación química en la que aparece un sólido iónico y sus correspondientes iones disueltos en agua., El producto de solubilidad es representado como K_s o PS, y el equilibrio de solubilidad viene dado por la ecuación 34.



Donde:

A = representa el catión

B = representa el anión

m, n = índices estequiométricos.

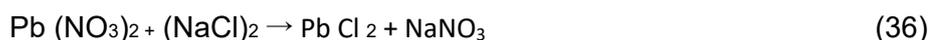
La constante de equilibrio o producto de solubilidad de la ecuación 37, se determina con la ecuación 35.

$$K_s = [A^{m+}]^n * [B^{-n}]^m \quad (35)$$

Assens y Montorioal, 1957, indican que la presencia de otras sales puede alterar su solubilidad, así por ejemplo, la presencia de sales con un ión común provoca una disminución de la misma (efecto del ión común), mientras que el efecto del ión común queda perfectamente explicado mediante la teoría clásica del producto de solubilidad.

Las ecuaciones 36, 37 y 38 expresan los productos de solubilidad de las sales utilizadas en el presente proyecto.

a) Nitrato de plomo Pb (NO₃)₂ + Cloruro de Sodio (NaCl)



b) Cloruro Férrico (FeCl₃) + Cloruro de Sodio (NaCl)



c) Sulfato de Manganeso (MnSO₄) + Cloruro de Sodio (NaCl)



3.4.1.7. Limpieza de la membrana.

Concluido el ciclo experimental con un metal de análisis y para continuar con el siguiente metal, se debe proceder a la limpieza de la membrana a objeto de evitar incrustaciones y/o ensuciamientos excesivos que generen pérdida de eficiencia de la membrana. Ruiz et al., (2016), señalan que, para recuperar la operatividad de las membranas, se hace necesaria la realización de protocolos periódicos de limpieza con la optimización de secuencias de lavado de membranas de ósmosis inversa que han sufrido un ensuciamiento severo, debido a la incrustación de sales y/o deposición de coloides.

Para este proyecto, se considera la técnica de limpieza con ácido cítrico (Ruiz et al., 2016) que supone una alternativa a los agentes limpiadores más utilizados. En solución acuosa se presenta como ión citrato, formando sales con gran número de iones metálicos y favoreciendo la eliminación de óxidos metálicos e incrustaciones de carbonato cálcico. Asimismo, señalan que la temperatura tiene un efecto positivo en la efectividad de la limpieza, indicando que 22° es una temperatura optima de lavado, aunque la elevación de esta consigue aumentos adicionales moderados de la producción.

Lora, et al. (2002), afirma que como norma general se considera que una membrana está sucia y debe pararse la producción para ejecutar el protocolo de limpieza química cuando se produce alguna de las siguientes condiciones.

- Disminución del flujo de permeado en un 10-15%.
- Aumento de la concentración de sal en el permeado en un 10-15%.
- Aumento de la pérdida de carga en el tubo de presión en un 15-20%.

Fritzmann et al., (2007), describe el siguiente ciclo convencional de limpieza.

- Enjuague del tubo de presión con permeado o agua destilada.
- Bombeo, a bajo caudal y 4 bar de presión (presión recomendada por la mayoría de los fabricantes de membranas), de la disolución de limpieza precalentada a la temperatura que establezca el protocolo.
- Recirculación de la disolución de limpieza hasta que se estabilice la temperatura, ajustando el pH si es necesario.
- Reposo de la disolución en el interior del módulo de membrana durante 1-15 horas, en función del tipo y grado de ensuciamiento.
- Bombeo a elevada velocidad de flujo para arrastrar los compuestos que producían el ensuciamiento y la disolución de limpieza fuera del sistema.

- Enjuague del tubo a presión con permeado o agua destilada.

Siguiendo con los criterios de evaluación del ensuciamiento de las membranas y bajo la propuesta de García-Fayos et al., (2014), para el presente proyecto se aplica un sistema de limpieza suave con el siguiente protocolo de aplicación.

- Enjuague con agua destilada durante 30 minutos.

Limpieza con ácido cítrico al 0.5%(p) durante 30 minutos.

- Enjuague con agua destilada hasta que no haya restos del ácido.

Después de la limpieza suave se repite la prueba de caracterización para comprobar el grado de recuperación de las propiedades permeoselectivas típicas de una membrana de OI. Si es satisfactorio (rechazo de sales mayor igual o mayor al 95% o el flujo de permeado mayor de 0.5 L/m² ·h·bar o una recuperación del 85% del flux respecto al inicio), se puede continuar con el siguiente análisis caso contrario se repite el ciclo de limpieza hasta el cumplimiento de los parámetros (García-Fayos et al., 2016).

El protocolo de limpieza para el presente proyecto supone la preparación de unos 40 a litros de agua destilada con ácido cítrico entre el 0.5-1% de concentración en peso. Una vez concluido el ciclo experimental, se procede al primer proceso de limpieza que consiste en hacer circular por el sistema (por la membrana) agua destilada por el laso de unos 30 minutos a 4 bares de presión. Se compara con los datos iniciales y si no se cumple con los parámetros indicados se procede a la limpieza más profunda. Se conecta al sistema la concentración de agua con ácido cítrico y nuevamente se procede a la alimentación por otros 30 minutos y a la misma presión. Para finalizar, nuevamente se debe hacer circular agua destilada por 30 minutos más. Este proceso se debe repetir hasta tener una recuperación optima de los parámetros de operación marcados por el fabricante.

El procedimiento de limpieza secuencial consiste en la aplicación de un lavado triple, en el que se alternaron durante un tiempo de 30 minutos, agua destilada, la mezcla de ácido cítrico y nuevamente agua destilada, durante el proceso de lavado se verifica una de las siguientes características, la recuperación de la permeabilidad, o, el rechazo de las sales con la conductividad y pH.

En caso de observar recuperación de la membrana solamente con agua destilada se puede suprimir la utilización de ácido cítrico.

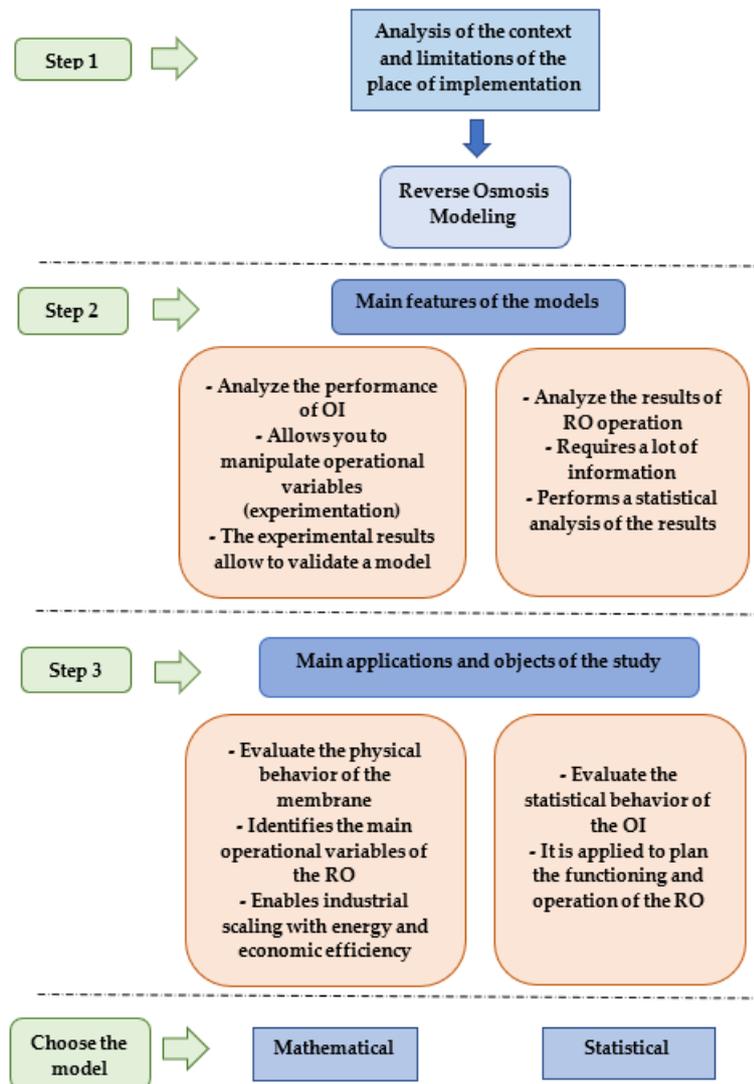
3.5. Teoría del modelo de Concentración-Polarización

Elaborar un modelo matemático de CP para el sistema propuesto es fundamental para evaluar el comportamiento físico del sistema en la separación de los metales. Permite que el

diseño futuro de una planta a nivel industrial sea realizado con niveles energéticos óptimos y costos de operación y mantenimiento sostenibles.

La selección de la modelación matemática para evaluar el comportamiento de la membrana y de la OI, se basa en un mecanismo de selección a partir de las ventajas y aplicaciones que tiene la modelación matemática respecto a la estadística (Villena, et al., 2022). La figura 23 ilustra el mecanismo propuesto para elegir el modelo idóneo en la evaluación de la OI.

Figura 23: Mecanismo de selección del modelo



Fuente: Villena et al., 2022a

Considerando el contexto económico y social boliviano y el objetivo de la investigación, un modelo matemático es idóneo para la investigación. La modelación matemática permitirá evaluar el comportamiento físico de la membrana y definir las condiciones operativas que permitan un escalamiento futuro con mejor eficiencia energética.

3.5.1. La Concentración – Polarización

Para Feria-Díaz et al., 2021, la OI es la tecnología utilizada más avanzada en el mundo para la desalación de agua, debido a su consumo energético relativamente bajo, alta eficiencia, flexibilidad, facilidad de operación y economía de proceso. Esta tecnología trajo el impulsó en el avance de materiales, mejoras en la eficiencia de las bombas y creación de dispositivos de recuperación de energía. Sin embargo, el aumento de la polarización que induce a la pérdida de permeabilidad de la membrana y ensuciamiento son algunos de los problemas que deben ser analizados y tratados con oportunidad. Sablani et al., (2001) afirma que una razón principal para la disminución del flujo durante el período inicial de un proceso de separación de membranas es la polarización de la concentración de soluto en la superficie de la membrana.

El principal tema de investigación en la transferencia de masa es el proceso de transferencia de masa cerca de la membrana, donde la concentración-polarización (CP) afecta significativamente este proceso. Por tanto, el estudio de este fenómeno en la membrana se centra en el modelado de CP; siendo necesario modelar el fenómeno CP para predecir el proceso de separación en OI. Chenghan, y Han, (2019).

Para AlSawafth, et al., (2021), Gu et al., (2021) y Salcedo-Díaz et al., (2014), en los procesos de tratamiento de agua basados en membranas, el ensuciamiento de la membrana ocurre de forma inevitable y puede afectar significativamente el desempeño, operación, sustentabilidad y viabilidad económica de los procesos. Señalan que la Concentración por Polarización es uno de los mecanismos de ensuciamiento debido a la compleja interacción física y química entre los diferentes componentes de alimento y la superficie de la membrana. Una manera adecuada de predecir el rendimiento de la membrana y los requisitos de energía para el bombeo es a través de una adecuada comprensión cuantitativa de los procesos de concentración por polarización que sucede en la membrana. Existen varias correlaciones de transferencia de masa para una descripción cuantitativa de la CP.

Armijo y Condorhuaman, (2012) indican que el efecto de la polarización por concentración en un sistema de osmosis inversa sucede cuando el soluto tiende acumularse sobre la superficie de la membrana si esta deja pasar más fácilmente al disolvente. La concentración del soluto se incrementa en el tiempo creando una gradiente de concentración que origina un flux de retorno desde la superficie de la membrana hacia la masa principal de la solución. En estado estacionario, se alcanza un valor constante para la concentración del soluto sobre la superficie de la membrana y así mismo para el flux neto del soluto, que es el mismo que atraviesa la película de líquido como el que atraviesa la membrana. Se considera que en el lado de la solución concentrada (alimentación) el efecto de la polarización por concentración es más importante que en el lado de la solución diluida (permeado).

Asimismo, Armijo y Condorhuaman, (2012) señalan que, debido a la acumulación de soluto en la superficie de la membrana, se desarrolla un gradiente de concentración en la solución de alimentación que produce difusión molecular hacia el seno de la solución, reduciendo el flujo de disolvente que llega a la membrana. El incremento de la presión osmótica debido al aumento de la concentración también reduce el flujo de disolvente.

Por su lado, Fariñas, (1999) y García, (2002) explican que cuando se desarrolla un proceso de separación con membranas, a medida que avanza el tiempo van quedando solutos cerca de la membrana del lado de la alimentación pertenecientes a sales disueltas que no pasaron por el permeado. Estos solutos deben ser arrastrados por la corriente de rechazo, sin embargo, al ser esta velocidad muy baja, solo pueden pasar a la corriente de rechazo por difusión en sentido contrario al flujo de permeado, llamada también retro difusión, y, que origina una zona en la que la concentración de especies es mayor que la del resto de la solución denominada **Capa Límite**. Esta situación se llama polarización de la membrana y cuando aumenta la concentración de esta solución en contacto con la membrana se genera una **Concentración de Polarización**.

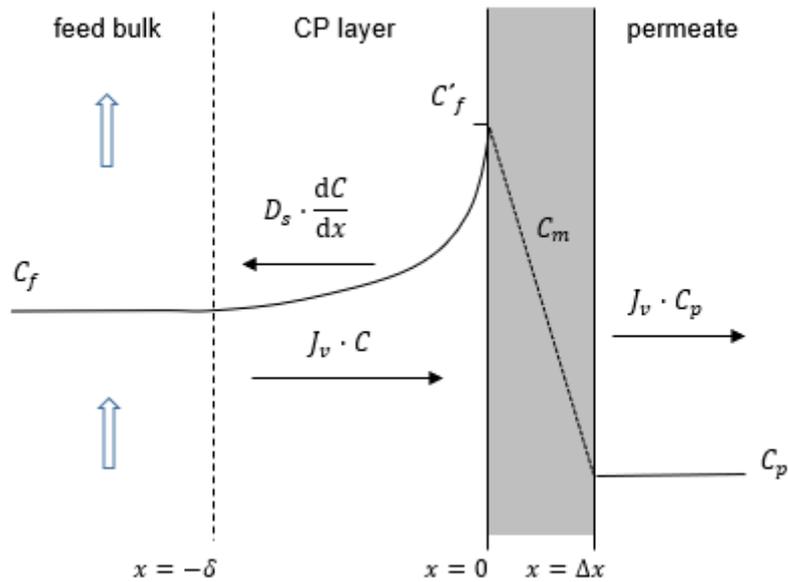
El proceso de concentración de los solutos en la superficie de la membrana se debe principalmente al equilibrio de las fuerzas convectivas y difusivas. Las primeras son las que permiten el arrastre del soluto a la membrana y origina el permeado mientras que la segunda provoca que el soluto retorna al flujo de disolución. En esencia, la polarización de concentración refiere al soluto que se retiene en la zona adyacente de la membrana de forma no permanente, que, a diferencia del ensuciamiento, esta puede dejar de existir al cesar la fuerza impulsora (Salcedo-Díaz, 2006).

3.5.2. Modelo de Concentración – Polarización

La figura 24 esquematiza el modelo de transferencia de masa por incremento de concentración en la zona próxima a la membrana (Capa Interna – CO) por efecto de la acumulación del soluto retenido (Villena, et al. 2022b).

De acuerdo con el esquema de la figura 23, Salcedo-Díaz, (2006) y Chenghan y Han (2019), muestra el aumento de la concentración en la capa límite de alimentación debido a la retención de soluto. A distancias de la pared mayores que el espesor de la capa límite δ , la concentración C_f toma el valor de la solución de alimentación a granel porque se supone que el flujo tangencial a la membrana es turbulento. En la capa límite de CP, la concentración aumenta gradualmente hasta alcanzar un máximo en la superficie de la membrana C_f' debido al flujo convectivo hacia la pared de la membrana. Si no hay retención completa del soluto, alguna cantidad del soluto pasa a través de la membrana causando la concentración de permeado C_p (Villena, et al. 2022b).

Figura 24: Esquema de concentración-polarización en osmosis inversa



Fuente: Elaboración propia, Villena, et al. 2022b

El modelo de Kedem (Spiegler y Kedem, 1966 y Spiegler y Katchalsky, 1963), basado en los principios de la termodinámica irreversible, relaciona los flujos de disolvente y soluto con los coeficientes de transporte que a su vez son independientes de la concentración de soluto (Pontié et al., 2008). Para un sistema formado por dos componentes, agua y soluto, la expresión del flujo volumétrico y la retención intrínseca para este modelo

$$Jv = Lp(\Delta p - \sigma \Delta \pi) \quad (39)$$

$$R_m = 1 - \frac{1-\sigma}{1-\sigma \cdot \exp\left(-\frac{Jv}{B_s}\right)} \quad (40)$$

Donde:

Jv = Volumen flux

Lp = Permeabilidad del agua en la membrana

ΔP = Presión transmembrana

$\Delta \pi$ = Diferencia de presión osmótica

σ = Coeficiente de reflexión

Bs = Coeficiente de transporte de soluto

Rm = Índice de rechazo intrínseco del soluto

La conversión Y , que representa la capacidad de producción de agua es definida como la fracción del flujo de alimentación que pasa a través de la membrana o también denominado

el flujo de permeado. Cuanto mayor es este flujo mayor es la capacidad de producción del sistema de OI, este valor se determina con la ecuación 41.

$$Y = \frac{Q_p}{Q_f} \times 100 \quad (41)$$

Para un soluto, el índice de rechazo observado R_o y el rechazo intrínseco R_m se calculan usando la concentración de soluto en la masa o la concentración de soluto en la pared de la membrana de alimentación C_f , y la concentración de soluto en el lado del permeado C_p .

$$R_o = \frac{C_f - C_p}{C_f} \quad (42)$$

$$R_m = \frac{C_f - C_p}{C_f} \quad (43)$$

En la capa límite, el equilibrio entre el flujo convectivo en la tarifa, la retrodifusión y el flujo convectivo que pasará al permeado es.

$$J_v \cdot C_p = J_v \cdot C - D_s \cdot \frac{dC}{dx} \quad (44)$$

Donde:

C = Concentración del soluto en la capa CP

D_s = Coeficiente de Difusión del soluto

La integración del gradiente de concentración de la ecuación (44) a lo largo de la capa límite con condiciones límite dadas por la concentración de soluto en la solución a granel y la concentración de soluto en la pared de la membrana produce.

$$\frac{C_f - C_p}{C_f - C_p} = \exp\left(\frac{J_v \delta}{D_s}\right) = \exp\left(\frac{J_v}{k}\right) \quad (45)$$

Donde el coeficiente de transferencia de masa k , se puede obtener a partir de una correlación de transferencia de masa basada en los números de Reynolds y Schmidt.

El flujo volumétrico promedio de permeado se calcula utilizando el área efectiva de membrana, S , como.

$$J_v = \frac{Q_p}{S} \quad (46)$$

De acuerdo con la Ec. (42), (43) y (44), los rechazos observados e intrínsecos están relacionados por la siguiente ecuación.

$$\frac{R_o^{-1}}{R_m^{-1}} = \exp\left(\frac{J_v}{k}\right) \quad (47)$$

La diferencia de presión osmótica entre ambos lados de la membrana es.

$$\Delta\pi = Rg \cdot T(C'f - Cp) \quad (48)$$

Donde:

Rg = constante de la ley de los gases

T = es la temperatura

La dependencia del parámetro de permeabilidad con la temperatura se modela mediante una ecuación tipo Arrhenius (Mulder, 1996).

$$L_p(T) = L_{p,0} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta H}{Rg} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right) \quad (49)$$

El valor de $-\Delta H/Rg$ se ajusta a los resultados de permeabilidad de la membrana a diferentes temperaturas. El modelo considera una temperatura de referencia de $T_0 = 293$ K (Villena et al. 2020a).

Combinando Ecs. (45), (48) y (49) con la ecuación (39), obtenemos el modelo dependiente de la temperatura para el flujo volumétrico basado en la concentración total de soluto:

$$J_v(T) = L_p(T) \cdot \left[\Delta P - \sigma \cdot Rg \cdot T \cdot (C_f - C_p) \cdot \exp\left(\frac{J_v}{k}\right) \right] \quad (50)$$

Se debe tener en cuenta que en el caso de una solución que contenga un soluto mayoritario e iones minoritarios la Ec. (49) es aplicable al soluto principal que es responsable de la mayor parte de la presión osmótica.

El rechazo observado de un soluto minoritario está relacionado con el flujo volumétrico por la ecuación (51) que se obtiene mediante la combinación de la ecuación. (40-43) y (45).

$$\frac{R_{o,i}}{1-R_{o,i}} = \frac{\sigma_i}{1-\sigma_i} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{J_v(T) \cdot (1-\sigma_i)}{B_{s,i}}\right) \right] \cdot \exp\left(-\frac{J_v(T)}{k_i}\right) \quad (51)$$

La variación de temperatura durante el proceso experimental genera una variación del parámetro L_p , por lo que el mismo debe ser ajustado con el modelo de Arrhenius (Huang y Lin, 1968), mostrado en la ecuación 52.

$$A = A_0 * e^{-\frac{\Delta H}{R} * \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (52)$$

Si consideramos al valor de A como el parámetro $L_p(FaT)$ ajustado al factor de ajuste por temperatura y A_0 como el factor teórico de L_{p0} , la ecuación 52 quedaría como.

$$L_p(FaT) = L_{p0} * e^{-\Delta H/R * \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (53)$$

Donde el factor de ajuste viene representado de acuerdo con la ecuación 54.

$$FaT = e^{-\frac{\Delta H}{R} * \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (54)$$

Combinando las ecuaciones 52, 53 y 54 se tendría la ecuación 55 que representa el modelo final del sistema propuesto.

$$Jv = Lp \cdot e^{-\frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \cdot [\Delta p - \sigma \cdot R \cdot T (Cf - Cp) e^{\frac{Jv}{k}}] \quad (55)$$

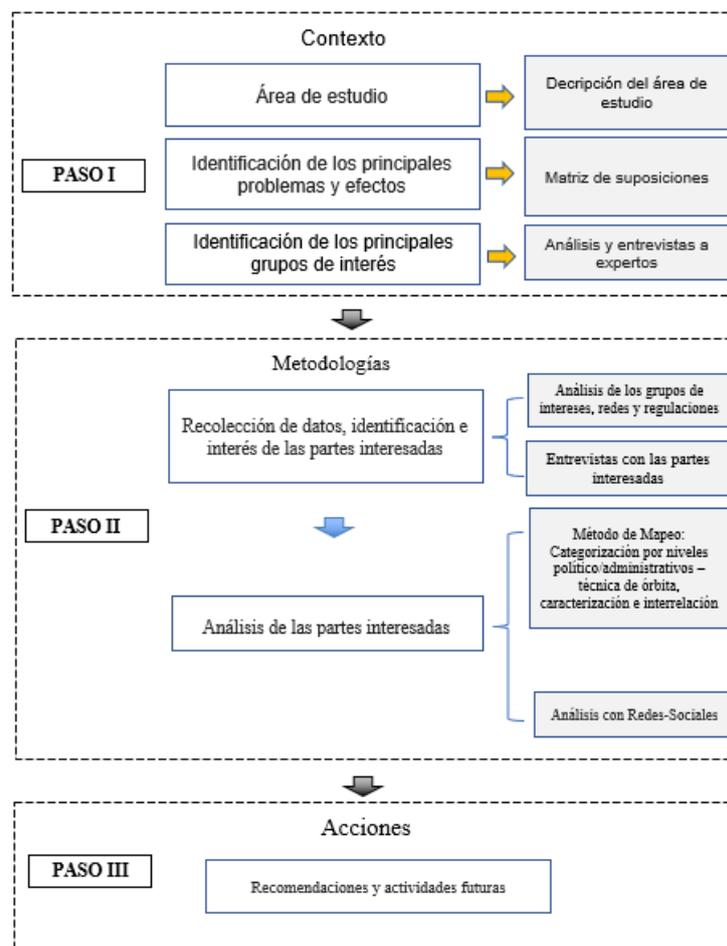
Los parámetros del modelo Lp , σ y k , son determinados a partir de los datos experimentales y regresiones no lineal con la herramienta de cálculo y modelación Matlab.

3.6. Partes Interesadas: Gestión del Agua.

3.6.1. Metodología

La figura 25 muestra el esquema metodológico aplicado, se observa que el análisis de las partes interesadas considera un proceso cualitativo y un cuantitativo distribuido en tres pasos consecutivos, el primero que identifica y describe el área de estudio, el segundo que realiza el análisis cualitativo y cuantitativo y el tercero donde se establecen las acciones futuras.

Figura 25: Esquema metodológico de análisis de las partes interesadas



Fuente: elaboración propia

3.6.2. Recolección de datos

Se aplicaron entrevistas personales con las principales autoridades. Todos expresaron interés en participar activamente en los procesos de consenso y toma de decisiones coordinadas. El resultado vuelve a mostrar las diferencias políticas entre los distintos actores.

Hay un acercamiento entre las juntas vecinales y la Municipalidad. Las entidades privadas no muestran diferencias políticas, pero sí expresan la necesidad de comunicar más sobre el alcance de los proyectos.

Para conocer la relación e información entre los diferentes interesados, se realizaron preguntas sobre el uso de los recursos y la información del proyecto. A cada interesado se le preguntó lo siguiente.

- ¿Cuál es el interés de participar en las decisiones de desarrollo local?
- ¿Con quién mantiene generalmente una relación institucional en la planificación de proyectos relacionados con el agua?
- ¿Con quién cree que es importante ampliar la relación institucional en la planificación de proyectos y recursos relacionados con el agua?

Para cada respuesta es necesario dar una puntuación, si la relación es nula o no existe, 0; si es poco 1 y si es mucho 2. Los resultados sirven para formar una red social.

3.6.3. Análisis Cualitativo

Bajo los enfoques y metodologías propuestos en los trabajos desarrollados por Mayers, (2005), Yang et al., (2016), Trawick, (2003), Lupo, (2010) y Reed et al., (2009), Baccar et al., (2021), Leach, (2002), Hearne & Torpen, (2010), además de la propuesta de la ODA (ODA, 1995^a y 1995^b), el análisis de las partes interesadas en la alta cuenca del río Guadalquivir es desarrollado considerando el siguiente procedimiento.

- a) Identificación de problemas y escenarios mediante análisis de mapeos
- b) Identificación de los grupos de intereses
- c) Establecer el objetivo y procedimiento de análisis, relacionando las bases teóricas normativas e instrumentales
- d) Identificación de las partes interesadas.
- e) Clasificación de las partes interesadas, en actores clave, creadores del contexto de temas y de multitud
- f) Relación entre los interesados

3.6.3.1. Métodos y procedimiento de análisis

Se detallan las metodologías aplicadas para la identificación y análisis de las partes interesadas.

3.6.3.1.1. Identificación de los grupos de interés y análisis por mapeos

Baccar et al., (2021), Leach, (2002) y Hearne & Torpen, (2010), indican que el primer paso en el análisis es identificar los grupos y actores involucrados en el sector y los problemas que se originan en los escenarios de conflicto. Se utilizan los métodos propuestos para identificar los problemas y estrategias y la identificación de los grupos de interés.

Los mapeos son técnicas muy utilizadas que se basan en clasificar y caracterizar a los interesados según categorías específicas de poder, interés, influencia, legitimidad y urgencia; para otros, el método de mapeo permite y se relaciona con ellos. Entre las técnicas de mapeo más conocidas utilizadas en este trabajo se encuentran las desarrolladas por (Aggens, 1998; Grimble & Wellard 1997; Lupo, 2010; Trawick, 2003; Yang et al., 2016) que clasifican por niveles de interés, poder e influencia. Mientras que Grimble & Wellard, (1997) y Biggs & Matsuert, (1999) proponen métodos para analizar el impacto entre las partes interesadas y, Chevalier & Buckles (2008) para medir el grado de afectación.

3.6.3.1.2. Identificación de problemas y escenarios

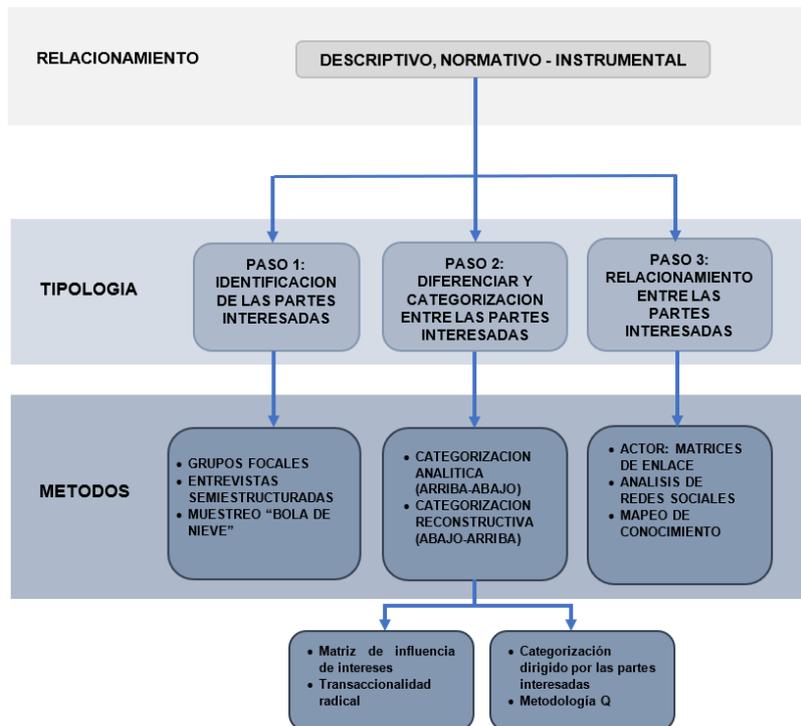
Baccar et al., (2021) permiten identificar problemas y escenarios de conflicto que involucran a expertos locales en múltiples campos y comprenden una gran cantidad de información. Se considera también a los actores locales, principalmente los formuladores de políticas o aquellos que inciden en las políticas públicas de desarrollo.

Con base en los criterios de Leach, (2002) y Hearne & Torpen, (2010), se pueden realizar entrevistas preliminares para identificar los principales grupos de interés en la gestión del agua y el poder en la toma de decisiones.

3.6.3.1.3. identificación y categorización de las partes interesadas

Reed et al., (2009), esquematiza el procedimiento y relacionamiento entre lo teórico, metodológico e instrumental que se aplica al análisis de las partes interesadas. La figura 26 muestra el esquema a seguir en el análisis de las partes interesadas. Se identifican 3 niveles de análisis a seguir, el primero que relaciona lo descriptivo, normativo e instrumental del análisis para identificar los objetivos y metas; un segundo nivel que permite identificar, clasificar y relacionar los distintos actores y partes interesadas del sistema; finalmente el tercer nivel que visualiza diferentes métodos para la identificación, clasificación y relacionamiento de las partes interesadas.

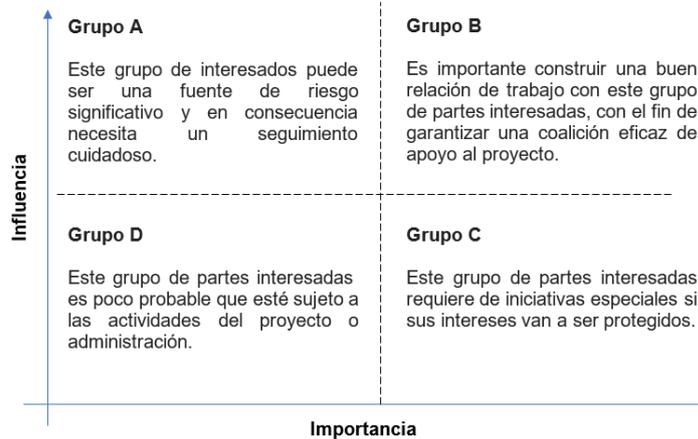
Figura 26: Esquema procedimental de análisis de partes interesadas en la cuenca del Guadalquivir



Fuente: Elaboración propia basada en el esquema de Reed et al., (2009)

La ODA (ODA, 1995a y 1995b) propone una serie de técnicas y enfoques de análisis de las partes interesadas desarrollados para la gestión de recursos naturales, haciendo énfasis en el consenso y la investigación conjunta de soluciones. La ODA (ODA, 1995a y 1995b) sugiere una metodología en la que como primer paso es identificar a todas las partes interesadas potenciales y sus intereses; evaluar el probable impacto del proyecto en cada uno de estos intereses (positivo, negativo, desconocido). Indica la prioridad relativa que el proyecto debe otorgar a cada actor en la satisfacción de sus intereses, sugiere además el uso de técnicas de identificación de bolas de nieve cuando es difícil o costoso identificar a todos los interesados. Con respecto a la evaluación de la importancia de cada actor para el éxito del proyecto, sugiere combinar influencia e importancia, utilizando un diagrama matricial para clasificar las partes interesadas en cuatro grupos diferentes, la figura 27 ilustra esta propuesta Lupo, (2010).

Figura 27: Matriz de clasificación de partes interesadas según influencia e importancia activa

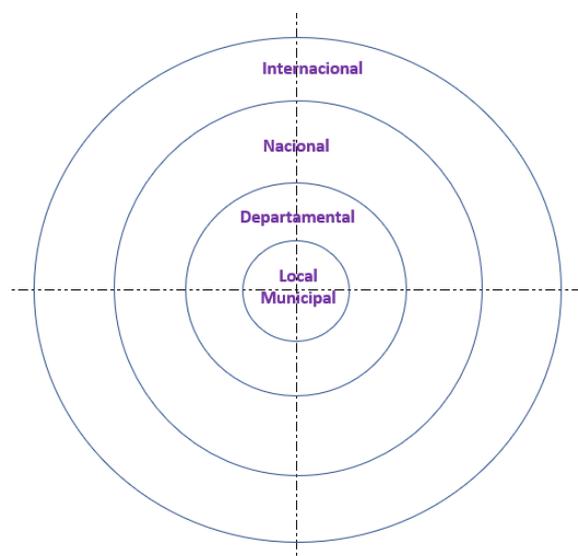


Fuente: Lupo, (2010) y las propuestas de, ODA (1995^a y 1995b) y Grimble y Wellard, (1997).

La ODA, (1995^a) y (1995b) indica que esta matriz de participación debe verse como una herramienta dinámica que proporciona un medio para identificar áreas potenciales de desacuerdo entre las distintas partes interesadas Lupo, (2010).

Lupo, (2010) señala que la identificación de las partes interesadas puede realizarse con expertos o directamente a través del equipo del proyecto. Esto permite agrupar e identificarlas por el grado de participación de cada actor en cada etapa, adoptando la imagen de las órbitas de participación desarrollada por Aggens, (1998). El enfoque de identificación y agrupación de las partes interesadas por orbitas es utilizado con niveles de gobierno o instancias de participación en lo nacional, departamental e internacional, la figura 28 muestra el enfoque.

Figura 28: Esquema de objetivos para identificar las partes interesadas y el grado de participación



Fuente: elaboración propia bajo el enfoque de la European Commission [EC], (2003), Aggens, (1998), expuesto en el proyecto de Lupo, (2010)

Los métodos utilizados tienen por objeto: i) identificar a las partes interesadas, ii) diferenciar y categorizar a las partes interesadas; e iii) investigar las relaciones entre las partes interesadas. En el anexo 3.1 se detalla la descripción resumida de cada uno de los métodos propuestos en cada tipología de análisis, que incluye los recursos requeridos, nivel de participación de las partes interesadas, sus fortalezas y debilidades. Aunque algunos métodos pueden utilizarse para más de un propósito: por ejemplo, el análisis de redes sociales se utiliza principalmente para investigar las relaciones entre las partes interesadas, así como para categorizarlos, Reed et al., (2009).

3.6.3.1.3.1. Identificación de las partes interesadas y sus intereses

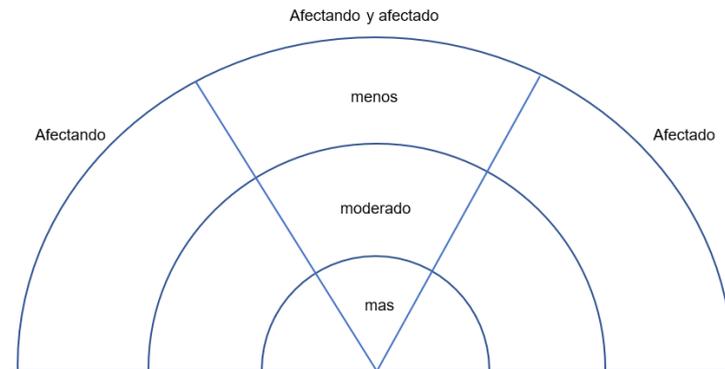
Reed et al., (2009) señala que gran parte de la literatura sobre análisis de las partes interesadas ha supuesto que estas son evidentes y autoconstruidas, y se ha centrado sobre su categorización, previamente identificadas para comprender intereses y relaciones. Sin embargo, antes de que esto se pueda hacer, es necesario identificar quiénes tienen intereses en el fenómeno de investigación. Esto en sí mismo requiere una comprensión clara del tema bajo investigación para que los límites de lo social y un fenómeno ecológico pueda ser bien establecida. Con esta aclaración se pueden utilizar varios métodos para identificar las partes interesadas.

En este mismo estudio, Reed et al., (2009) destacan lo propuesto por Clarkson, (1995) y (Clarkson et al., 1994) indicando que la identificación de las partes interesadas suele ser un proceso iterativo, en el que las partes interesadas adicionales se agregan a medida que continúa el análisis, por ejemplo, utilizando opiniones de expertos, grupos focales, entrevistas o una combinación de estos. Si los límites del fenómeno en sí están claramente definidos, entonces las partes interesadas pueden identificarse con relativa facilidad. Sin embargo, hay riesgo de que se omitan accidentalmente algunas partes interesadas generando como consecuencia que no todas las partes interesadas relevantes del fenómeno pueden identificarse.

Chevalier y Buckles, (2008) proponen otra forma de identificar a las partes interesadas, que incluye: identificación por expertos u otras partes interesadas; por autoselección (en respuesta a anuncios o anuncios); por escrito registros o datos del censo que pueden proporcionar información para categorizar por edad, sexo, religión y residencia; a través de un registro oral o escrito, relatos de eventos importantes (identificando a las personas que fueron involucrado); o utilizando una lista de verificación de posibles categorías de partes interesadas. Una vez clasificadas en grupos (por ejemplo, utilizando la matriz de clasificación u otras técnicas), Chevalier y Buckles, (2008) recomiendan colocar a las partes interesadas

en un “diagrama de arco iris” que los clasifica según el grado en que pueden afectar o verse afectados por un problema o acción la figura 29 ilustra esta propuesta.

Figura 29: Diagrama de arco iris para clasificar a las partes interesadas según el grado en que pueden verse afectadas



Fuente: Propuesta de Chevalier y Buckles (2008), y Reed et al., (2009).

3.6.3.1.3.2. Clasificación y diferenciación de las partes interesadas

Reed et al. (2009), propone un proceso, mediante un sistema analítico de arriba hacia abajo y otro reconstructivo de abajo hacia arriba.

El primer método consiste en aplicar un conjunto de metodologías en los que la clasificación se lleva a cabo por quienes realizan el análisis basado en observaciones del fenómeno o problema en cuestión. Se puede categorizar, clasificar o diferenciar a las partes interesadas por los niveles de influencia, de cooperación o de competencia que tienen o, por la amenaza, urgencia o legitimidad que tienen las partes interesadas en el proyecto, Reed et al. (2009), Hare y Pahl-Wostl, (2002), Freeman, (1984), Savage et al., (1991), Mitchell et al., (1997), Bianchi y Kossoudji, (2001) y Salam y Noguchi, (2006).

Hart y Sharma, (2004) propone un enfoque alternativo conocido como “transactividad radical” donde invierte este problema. Se centra en la apertura de dos vías de diálogo con las partes interesadas que de otro modo serían consideradas periféricas. Esto generalmente incluye a aquellos que están a distancia, débil, pobre, desinteresado, aislado o no legítimo, pero que pueden ser perjudiciales. Sostienen que esto permite que las partes interesadas poderosas y marginales se influyan entre sí y se evitan relaciones potencialmente disruptivas en el futuro. Esto permite reconocer que las partes interesadas marginales pueden tener conocimiento y perspectivas que pueden ayudar a anticipar el futuro y potencial problemas de recursos e identificar oportunidades innovadoras para la futura administración.

El segundo método, propone que la categorización, clasificación y parámetros sean definidos por las mismas partes interesadas de modo que el análisis refleje sus preocupaciones de forma más cercana, Reed et al. (2009). Por ejemplo, se puede aplicar una clasificación de

tarjetas que es un método utilizado en psicología experimental en grupos de interés para procesos de categorización de partes interesadas en la gestión de proyectos de agua sostenible. Donde a cada parte interesada se les pide una clasificación de tarjetas y enumerar a todos los interesados en el proyecto, agrupándolos por intereses y afinidades permitiendo que durante la investigación esto pueda reflejar la comprensión de las partes interesadas entre sí (Hare y Pahl-Wostl, 2002).

Además de otras metodologías, Dale y Lane, (1994) proponen la utilización de entrevistas o talleres con las partes interesadas para identificar y comparar los objetivos de diferentes grupos, las oportunidades percibidas y las limitaciones que tienen para alcanzar sus objetivos. De este modo (a menudo utilizando entrevistas repetidas), se categorizan las partes interesadas en las cuales se identifican objetivos similares. Toda la información recopilada durante este proceso puede ser útil para las negociaciones entre grupos en conflicto que tiene un enfoque similar al mapeo de conflictos propuesto por Cornelius y Faire, (1989), que se centra en las necesidades en lugar de posiciones u objetivos declarados (Reed et al. 2009).

Lupo, (2010) expone la taxonomía propuesta por Mitchell et al., (1997) que clasifica a actores latentes, expectantes y definitivos, obtenidos mediante la asignación de atributos de poder, legitimidad y urgencia, donde.

El poder es definido como la influencia pasada y presente que tienen las partes interesadas en torno al proyecto a nivel nacional, departamental o local, sea este en la etapa de diseño o ejecución del proyecto.

La legitimidad es cuando las reclamaciones, solicitudes, gestiones o interés que tienen las partes interesadas en el proyecto son adecuadas, apropiadas y elegibles dentro el sistema social y político.

La urgencia es definida como la medida en el que una parte interesada estuvo activa y puede demostrar su esfuerzo, gestión y solicitudes con la mayor urgencia y solicitar la atención inmediata en la implementación del proyecto.

La proximidad permite medir el estado, la calidad o el hecho de estar próximo o cerca del área de intervención del proyecto.

Creighton et al., (1998) por su parte, propone una escala de valores a establecer a cada parte interesada en función a los atributos establecidos por el evaluado; donde 1 es la menor y 5 la mayor de las escalas atribuidas. La tabla 23, ilustra la clasificación según una escala de atributos.

Tabla 23: Tabla modelo: Clasificación de las partes mediante escalas de atributos

Parte interesada	Poder	Legitimidad	Urgencia	Proximidad	Escala final	Clasificación	Intervención
------------------	-------	-------------	----------	------------	--------------	---------------	--------------

Fuente: Elaboración propia basada en la propuesta de Lupo, (2010) y Mitchell et al., (1997)

Las puntuaciones otorgadas a cada parte interesada deben tener un carácter objetivo basado principalmente en el poder, interés e influencia que puedan tener en la ejecución del proyecto. Lupo, (2010), recomienda que aquellas partes interesadas cuyo puntaje promedio de cada atributo supera o igual a 3 es considerada como alta, mientras que inferior a 3 es considerada como baja. Las partes interesadas que tienen todos los atributos con puntuación de 3 o superior deben clasificarse como **partes interesadas definitivas**, mientras que con un solo atributo o ninguno son clasificadas como **latentes**. Sin embargo, todas aquellas partes interesadas que están en una posición media es decir entre 2 a 3 son clasificadas como **expectantes**.

Una vez clasificadas, la Comisión Europea EC, (2003) recomienda el involucramiento de las partes interesadas en el proyecto de una manera clara y simple, estableciendo que las partes interesadas pueden involucrarse para colaborar/cooperar, pensar en conjunto y conocer en conjunto. Lupo, (2010) indica que una adecuada forma de apropiar el grado de participación de las partes interesadas definitivas es la participación activa (**colaborar/cooperar**) por el poder, legitimidad, urgencia y cercanía de la zona del proyecto por lo que deben estar ubicadas en el más alto nivel de participación. Las partes expectantes es la segunda etapa de participación (**co-pensamiento**), que significa que son consultadas únicamente para tener información y opiniones útiles. La tercera etapa correspondiente a las partes interesadas latentes (**co-conocimiento**), son instancias a las que solamente se les debe mantener informados.

3.6.3.1.3.3. Relación entre las partes interesada

Existen varios métodos que permiten investigar la relación entre las partes interesadas Reed et al., (2009) propone 3 métodos aplicados a la gestión del agua. El primero, mediante la realización de matrices de vinculación entre actores. El segundo, que analiza patrones de comunicación e influencia entre actores mediante el análisis de redes sociales y finalmente el mapeo de conocimientos que permite analizar la información entre los actores.

Un método común que permite describir las interrelaciones de las partes interesadas es a través de la matriz de vinculación descrita en la figura 26 y propuesta por la ODA, (1995^a) y (1995 b), Grimble y Wellard, (1997), Biggs y Matsuert, (1999) y Lupo, (2010). Donde, las partes interesadas se enumeren en las filas y columnas de una tabla creando una cuadrícula de modo que las interrelaciones pueden describirse utilizando palabras clave. Una forma

adecuada de realizar este trabajo es determinar si las relaciones entre cada uno de los interesados son de conflicto, complementarios o de cooperación Reed et al., (2009).

Las redes sociales se utilizan para ayudar a identificar a las partes interesadas, garantizar que no están marginados, identificar los conflictos entre las mismas y seleccionar los representantes. Esta información es especialmente importante en iniciativas de gestión de recursos hídricos que buscan influir en el comportamiento de las partes interesadas a través de personas influyentes. Tanto la red social y la literatura sobre gestión de recursos discute cómo las redes influyen individuos y grupos (Reed et al., 2009).

En el presente trabajo, el análisis de partes interesadas en la gestión del proyecto propone un primer análisis de las principales instancias en aras de poder lograr en el futuro los acuerdos necesarios para una gobernanza del agua adecuada en la cuenca del Guadalquivir (Villena, et al. 2021b).

3.6.4. Análisis Cuantitativo – Análisis de Redes Sociales

Prell et al., (2009), Borgatti et al., (2013) y León, (2021), explican muy claramente que un análisis de redes sociales permite completar un análisis cualitativo con uno cuantitativo; además, es un método que estudia las “relaciones” existentes entre los actores para analizar su posición dentro de la red y sacar conclusiones útiles para el objetivo del estudio.

Existen varias herramientas para la construcción de redes. La UCINET© (León, 2021) es un programa que permite una adecuada construcción de redes en función de los niveles de comunicación entre las partes interesadas.

CAPITULO IV: RESULTADOS

En los siguientes acápite se detallan los resultados de la investigación.

4.1. La disponibilidad de agua en la cuenca

La disponibilidad de agua en la cuenca se detalla en los siguientes apartados.

4.1.1. Parámetros morfológicos de la cuenca del Guadalquivir.

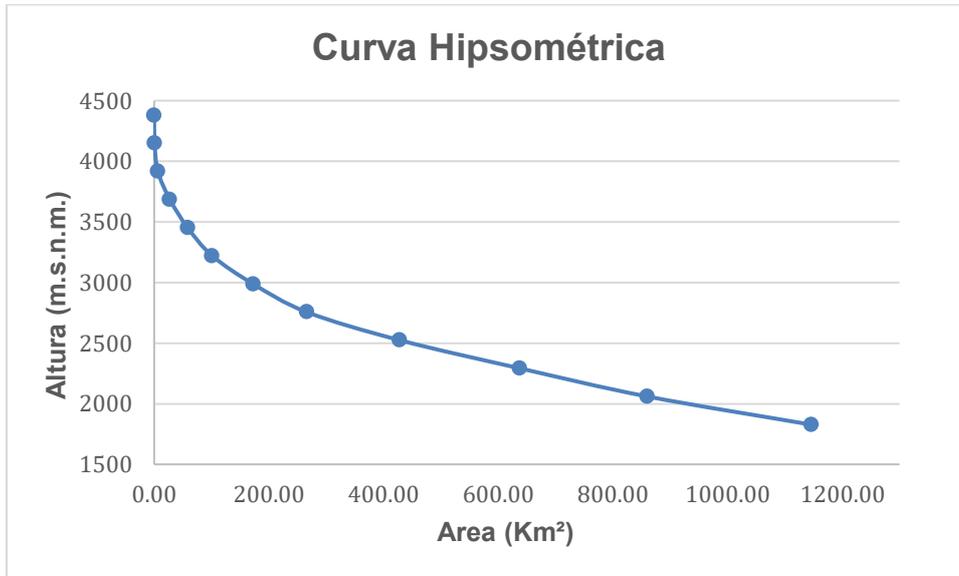
La tabla 24 detalla los parámetros morfológicos de la cuenca del Guadalquivir.

Tabla 24: Características morfométricas de la cuenca del Guadalquivir

DESCRIPCION	UNIDAD	VALOR
De la superficie		
Área	Km ²	1541.02
Perímetro	Km ²	222.07
Cota		
Cota Mínima	msnm	1827
Cota Máxima	msnm	4585.97852
Centroide (PCS: WGS 1984 UTM Zone 20S)		
x centroide	m	313473.61
y centroide	m	7621722.50
z centroide	m	2993.71
Altitud		
Altitud media	msnm	2993.71
Altitud más frecuente	msnm	1827
Altitud de frecuencia media	msnm	2500.94
Pendiente		
Pendiente Promedio de la Cuenca	%	36.32
De la Red Hídrica		
Longitud del Curso Principal – Guadalquivir	Km	60.44
Orden de la Red Hídrica	UNIDAD	7
Longitud de la Red Hídrica	Km	3644.76
Pendiente Promedio	%	1.20
PARAMETROS GENERALES DE LA CUENCA		
Factor de Forma – Rf		0.48
Índice de Compacidad – Kc		1.14
Coefficiente de Circularidad – Cc		0.39
Densidad del Drenaje – Dd		2.37
Tiempo de concentración	Hr	5.10
Pendiente del Cauce Principal	%	0.19

La figura 30 muestra la curva hipsométrica de la cuenca.

Figura 30: Curva hipsométrica de la cuenca del Guadalquivir



Las características físicas de la cuenca y la representación de la curva hipsométrica, muestra que la cuenca es del tipo sedimentaria con un moderado potencial de infiltración.

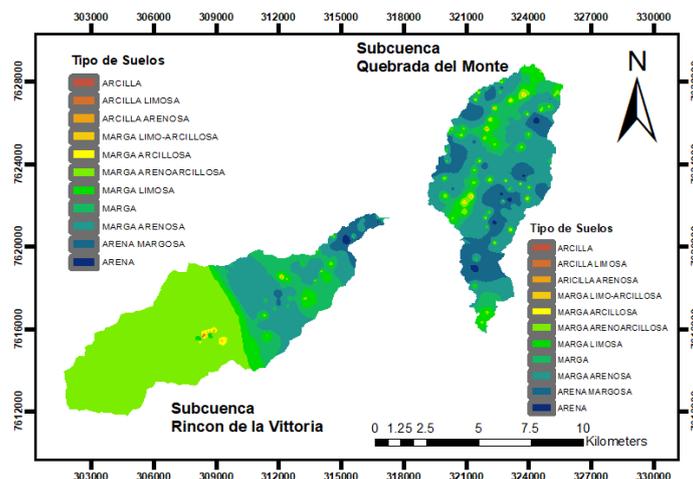
4.1.2. Propiedades de Infiltración en los suelos en la cuenca

Las propiedades de hidráulicas de los suelos en las cuencas de estudio se detallan a continuación.

4.1.2.1. Caracterización de suelos.

Las figuras 31 y 32 muestran los planos de infiltración en la cuenca de estudio.

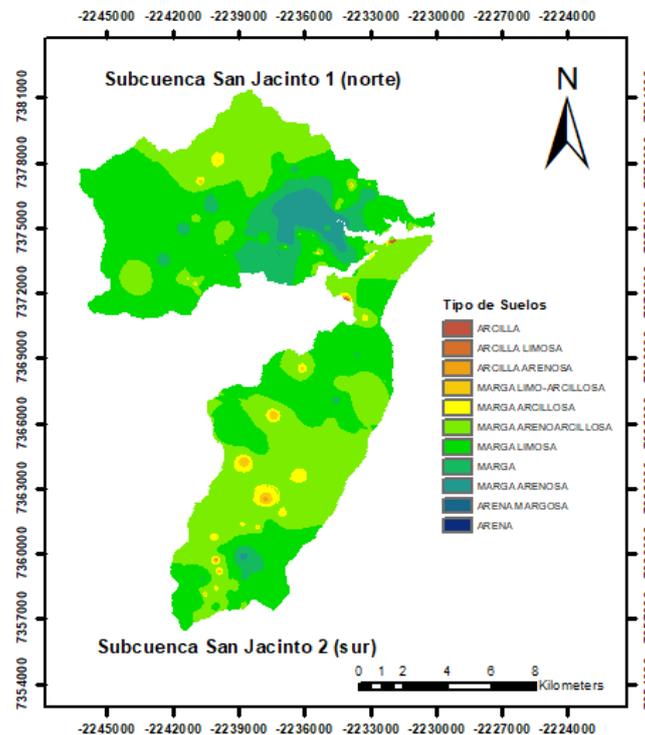
Figura 31: Caracterización de suelos con fines hidrológicos de las subcuencas de la Vittoria y quebrada del Monte



Fuente: Villena, et al. (2019)

La clasificación de las subcuencas de la Vittoria y de la Quebrada del Monte muestran claramente una tendencia de suelos finos con tipologías que van desde marga arenosa hasta arcillo limosa.

Figura 32: Caracterización de suelos con fines hidrológicos de las subcuencas de San Jacinto 1 (norte) y San Jacinto 2 (sur)



Fuente: Villena, et al. (2019)

Para las subcuencas de San Jacinto 1 y 2, las tendencias son de Marga arcillosa hasta arcillo limosa. Con un moderado potencial de infiltración.

4.1.2.2. Propiedades hidráulicas de los suelos.

Para el registro de datos obtenidos en el levantamiento de información de campo se elaboraron planillas de trabajo cuyo modelo se adjunta en el anexo 1.8. Las tablas 25 y 26 muestran los datos de la conductividad hidráulica de las subcuencas de La Vittoria y Quebrada del Monte y las tablas 27 y 28 de San Jacinto 1 y 2, mientras que las curvas de infiltración se adjuntan en el anexo 1.9.

Tabla 25: Conductividad Hidráulica subcuenca La Vittoria

Punto	K (cm/h)								
1	21.91	14	0.36	27	0.03	40	0.30	53	0.28
2	11.76	15	12.98	28	0.06	41	0.03	54	0.18
3	3.03	16	0.25	29	0.04	42	0.09	55	0.11
4	0.35	17	0.30	30	5.20	43	0.41	56	0.34
5	0.12	18	2.20	31	0.80	44	0.26	57	1.59

Punto	K (cm/h)								
6	2.91	19	0.62	32	0.35	45	0.49	58	0.22
7	0.79	20	0.31	33	0.24	46	1.16	59	0.60
8	0.01	21	0.66	34	0.22	47	2.26	60	2.70
9	0.01	22	4.94	35	0.41	48	1.52	61	0.64
10	0.01	23	0.18	36	0.78	49	3.65	62	0.17
11	0.01	24	0.26	37	0.88	50	0.11	63	0.96
12	0.18	25	1.35	38	2.71	51	4.90		
13	0.33	26	0.67	39	1.05	52	0.49		

Tabla 26: Conductividad Hidráulica quebrada del Monte

Punto	K (cm/h)								
1	3.13	24	0.22	47	16.28	70	13.29	93	0.32
2	0.16	25	0.10	48	0.07	71	0.40	94	0.26
3	0.25	26	0.12	49	0.05	72	16.74	95	0.71
4	0.42	27	0.12	50	0.25	73	0.03	96	1.37
5	0.19	28	1.57	51	3.16	74	4.40	97	0.03
6	3.77	29	0.86	52	0.16	75	0.10	98	0.21
7	0.24	30	0.31	53	0.12	76	0.27	99	0.19
8	0.14	31	0.01	54	0.08	77	0.10	100	4.37
9	0.07	32	3.90	55	9.38	78	4.02	101	0.06
10	0.04	33	8.53	56	19.00	79	0.22	102	1.24
11	2.98	34	14.64	57	0.33	80	0.10	103	1.42
12	0.09	35	3.99	58	0.37	81	0.25	104	1.68
13	0.33	36	0.47	59	4.55	82	0.27	105	0.32
14	0.23	37	0.18	60	3.39	83	13.84	106	0.71
15	11.48	38	1.40	61	0.50	84	0.32	107	0.65
16	0.05	39	0.13	62	2.88	85	0.40	108	0.29
17	1.65	40	0.28	63	0.81	86	0.03	109	0.39
18	3.14	41	0.02	64	0.62	87	0.33	110	0.29
19	0.23	42	0.10	65	10.15	88	10.13	111	0.73
20	10.66	43	0.25	66	4.76	89	0.32		
21	0.20	44	0.24	67	0.11	90	1.85		
22	1.04	45	0.11	68	4.91	91	0.07		
23	0.36	46	0.70	69	0.23	92	5.12		

Tabla 27: Conductividad hidráulica San Jacinto 1

Punto	K (cm/h)						
1	0.16	24	0.43	47	0.26	70	0.34
2	0.03	25	0.28	48	2.66		
3	0.61	26	0.78	49	2.14		
4	0.48	27	0.14	50	0.31		
5	2.02	28	0.25	51	0.37		
6	0.58	29	0.18	52	0.24		
7	0.84	30	0.05	53	0.49		
8	0.17	31	0.71	54	0.14		
9	0.48	32	0.26	55	0.31		
10	0.51	33	0.75	56	0.31		

Punto	K (cm/h)						
11	1.47	34	0.76	57	0.08		
12	0.47	35	0.16	58	0.46		
13	1.28	36	0.62	59	0.24		
14	1.50	37	0.37	60	0.16		
15	0.27	38	0.46	61	0.17		
16	1.54	39	0.20	62	0.07		
17	0.02	40	2.51	63	0.19		
18	0.04	41	1.59	64	0.52		
19	0.25	42	1.32	65	0.22		
20	0.95	43	0.47	66	0.88		
21	0.47	44	1.70	67	0.41		
22	0.61	45	0.40	68	0.18		
23	0.13	46	4.63	69	0.45		

Tabla 28: Conductividad hidráulica San Jacinto 2

Punto	K (cm/h)	Punto	K (cm/h)	Punto	K (cm/h)
1	0,07	24	0,15	47	0,16
2	0,08	25	0,60	48	0,40
3	0,13	26	0,01	49	0,67
4	0,15	27	0,19	50	0,62
5	0,52	28	0,51	51	0,49
6	0,57	29	0,12	52	0,34
7	0,40	30	0,05	53	0,34
8	0,58	31	0,32	54	0,03
9	0,04	32	0,06	55	0,51
10	0,15	33	0,49	56	0,11
11	0,07	34	0,07	57	0,49
12	0,50	35	0,13		
13	0,83	36	0,16		
14	0,04	37	0,32		
15	0,70	38	0,37		
16	1,40	39	0,71		
17	0,69	40	0,54		
18	0,18	41	0,09		
19	0,39	42	0,40		
20	0,11	43	0,58		
21	0,59	44	0,17		
22	0,36	45	0,15		
23	0,13	46	0,56		

A partir de la caracterización de los suelos y la medición de las propiedades hidráulicas se determinaron los grupos hidrológicos de los suelos predominantes en las zonas de estudio, las tablas 29 y 30, detallan estos resultados.

Tabla 29: Grupo de suelos subcuenca Rincón de la Vittoria y Quebrada del Monte

Grupo de suelo	La Vittoria Porcentaje (%)	Qda. Monte Porcentaje (%)
A	6.15	9.82
B	6.15	8.04
C	13.85	13.4
D	73.85	68.75

Tabla 30: Grupo de suelos subcuenca San Jacinto 1 y San Jacinto 2

Grupo de suelo	San Jacinto 1 Porcentaje (%)	San Jacinto 2 Porcentaje (%)
A	3	6
B	5	8
C	14	13
D	78	73

4.1.2.3. Número de Curva de la cuenca del Guadalquivir.

La cuenca alta del Guadalquivir presenta suelos con moderados potenciales de escurrimiento y buena condición hidrológica. Se evidencian diferentes sistemas de tratamiento del suelo donde los cultivos en la zona central del área de estudio tienen una importancia relevante por ser la agricultura uno de los sectores productivos más importantes. Con estos resultados y bajo un análisis ponderado de las diferentes características, se determinó el NC de la cuenca. La tabla 31 muestra la ponderación realizada para la determinación del número de curva.

Tabla 31: Determinación del Número de Curva para la cuenca del Guadalquivir

Tipo de Suelo	Porcentaje (%)	NC	NC Ponderado
A	6.2	48	2.9
B	6.7	67	4.5
C	13.5	77	10.4
D	73.4	80	58.72
NC (ponderado)			76.52

Se asume que la alta cuenca del Guadalquivir le corresponde un NC=77, que es un valor razonable para los suelos de la cuenca.

4.1.3. Parámetros de calibración

Con base a las características de los suelos, se determinaron los parámetros de calibración requeridos por el CHAC, la tabla 32 muestra los datos obtenidos para la alta cuenca del Guadalquivir.

Para la calibración se utilizaron las estaciones hidrométricas de Tolomosa y Obras por contener un mayor periodo de registro y una información más confiable. Los valores de la estación de Obrajes tienen una mejor representatividad de las cuencas ubicadas al norte mientras que Tolomosa las de la zona sur.

Tabla 32: Parámetros de calibración para la modelación del balance hídrico

Cuenca	Área (Km ²)	Excedencia C	Humedad Máxima H _{max} (mm)	Numero días de Lluvia	Infiltración máxima I	Descarga α
<u>Guadalquivir (Tolomosa)</u>	<u>1541.4</u>	<u>0.30</u>	<u>270</u>	<u>10</u>	<u>158</u>	<u>0.013</u>
<u>Guadalquivir (Obrajes)</u>	<u>1541.4</u>	<u>0.30</u>	<u>350</u>	<u>10</u>	<u>223</u>	<u>0.013</u>
Rincón de la Vittoria	61.18	0.20	65	8	47.32	0.0079
San Jacinto 1	65.77	0.35	110	10	59.57	0.01
San Jacinto 2	72.85	0.35	85	10	63.1	0.01
Tarija (quebrada del Monte)	366.02	0.25	35	10	23.71	0.01
Obrajes	270.24	0.35	170	10	211	0.013
Sella Quebrada	185.14	0.35	195	10	112	0.013
Tolomosa	278.92	0.20	125	8	79.43	0.005
Canasmoro	241.28	0.30	235	10	141	0.010

Donde:

C = los rangos de excedencia son 0.2 (arcillas) < C < 0.7 (arena)

El trabajo de investigación ha mostrado que los suelos se encuentran entre arenas limosas y arcillas, por lo que los rangos asumidos corresponden a los valores basados en este estudio para cada cuenca.

H = El valor de Hmax, que es del orden de 200 mm como valor promedio en cuencas (Temez, 1977). La cuenca del Guadalquivir está conformada en su gran mayoría por suelos de tendencia fina con cobertura vegetal moderada, por lo que los valores se acercan más a suelos de huertos y no así a rocas.

La capacidad máxima de humedad del suelo se ha obtenido en base a las propiedades de los suelos encontradas en la investigación de la infiltración.

I = los rangos de la infiltración máxima están entre $100 < I_{\max} < 400$ (Témez, 1977), la infiltración de los suelos con mayor tendencia mostrados en las curvas de infiltración establece que la cuenca del Guadalquivir se encuentra cercano a 400 mm de máxima infiltración.

A = los rangos de descarga para el modelo están entre $0.004 < \alpha < 0.15$

N = número de días de lluvia corresponde al promedio de pluviometría mensual, se estima de 10 días para la cuenca del Guadalquivir,

4.1.4. Calibración: caudales simulados vs caudales registrados

Las figuras 33 y 34 muestran las tendencias temporales y magnitudes de los caudales simulados y los registrados en la alta cuenca del Guadalquivir para las estaciones de Tolomosa y Obrajes. Se observa la similitud tanto en periodos de lluvia como en periodos secos, esto permite establecer que la calibración realizada presenta un ajuste aceptable.

Figura 33: Caudales simulados Vs Registrados – Estación de Obrajes

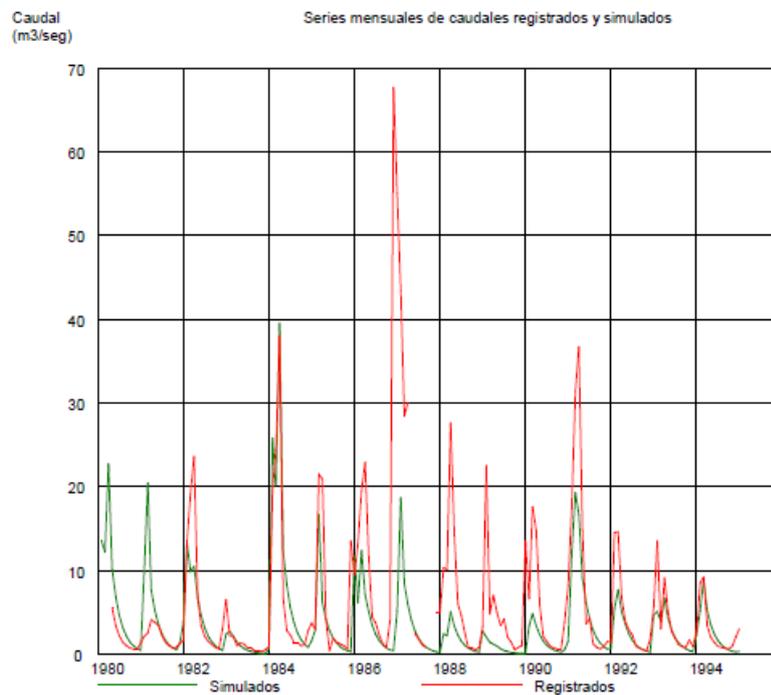
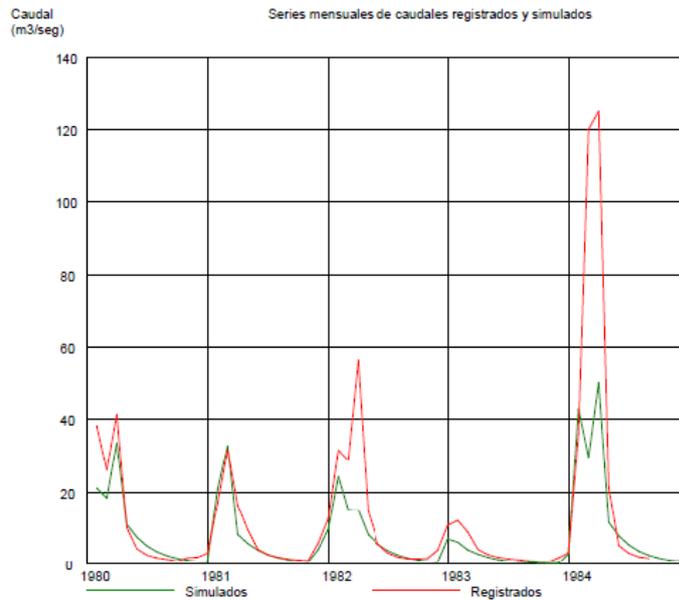


Figura 34: Caudales simulados Vs Registrados – Estación de Tolomosa



La tabla 33 detalla los resultados finales del proceso de calibración del modelo hidrológico obtenidos del CHAC para cada subcuenca de estudio utilizados para la simulación de caudales y aportes.

Las tendencias de caudales simulados vs. registrados para las subcuencas pertenecientes a la del Guadalquivir se detallan en el anexo 1.10.

Tabla 33: Parámetros de simulación obtenidos de la calibración del modelo

Cuenca	Superficie aporte (Km ²)	C	H _{max}	I _{max}	α	EMR Q _{medios}	ECEMR Q _{bajos}	ECEMER Q _{altos}
<u>Guadalquivir (Tolomosa)</u>	<u>1541.4</u>	<u>0.30</u>	<u>270</u>	<u>158</u>	<u>0.013</u>	<u>0.3922</u>	<u>0.5189</u>	<u>1.2822</u>
<u>Guadalquivir (Obrajes)</u>	<u>1541.4</u>	<u>0.30</u>	<u>350</u>	<u>223</u>	<u>0.013</u>	<u>0.4248</u>	<u>0.9897</u>	<u>1.3713</u>
Rincón de la Vittoria	61.18	0.20	65	47.32	0.0079	0.8548	0.8368	1.7284
San Jacinto 1	65.77	0.35	85	63.1	0.01	0.573	6.7973	1.4384
San Jacinto 2	72.85	0.35	110	59.57	0.01	0.5333	5.6857	1.4180
Tarifa (quebrada del Monte)	366.02	0.25	35	23.71	0.01	0.2991	1.7002	1.3087
Obrajes	270.24	0.35	170	211	0.013	0.8151	0.8310	1.6603
Sella Quebrada	185.14	0.35	195	112	0.013	0.7811	2.6045	1.5528
Tolomosa	278.92	0.20	125	79.43	0.005	0.5123	0.9282	1.6626
Canasmoro	241.28	0.45	225	125	0.016	0.5219	4.7125	1.3323

4.1.5. Simulación – balance hídrico

La simulación del balance hídrico se realizó considerando los siguientes factores.

Series mensuales de precipitación areal para el periodo 1980/81-2016/17, ajustadas y completadas a partir de los registros de las estaciones del SENAMHI, en el anexo 1.11 se muestran las series mensuales areales de las cuencas de estudio.

Series mensuales de ETP areal de las cuencas de estudio para el periodo señalado anteriormente y registros del SENAMHI, en el anexo 1.12 se detalla la ETP.

Superficie de cada cuenca de estudio y el número día medio mensual de lluvia de cada cuenca.

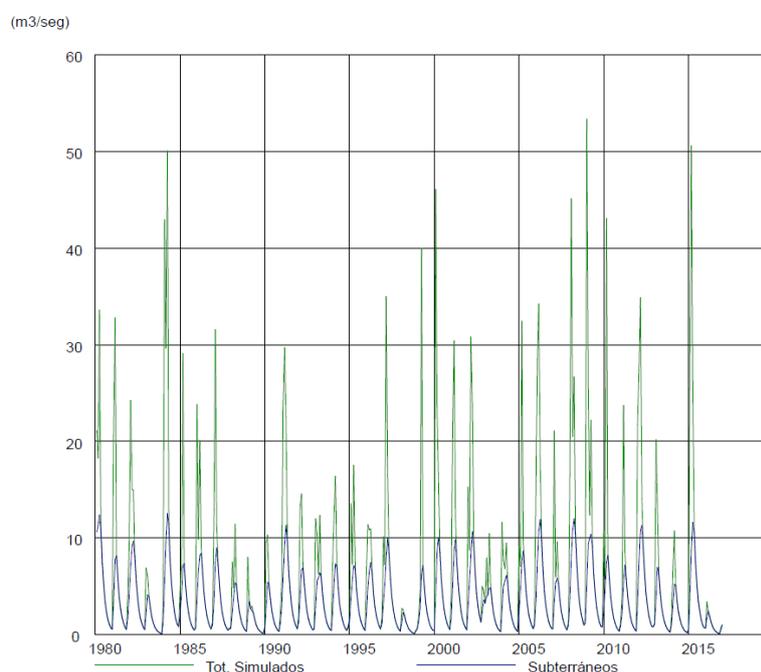
Valores y parámetros de calibración detallados anteriormente, tal es el caso de la H_{max} , I_{max} , humedad inicial, parámetro C y α .

Como resultado del proceso de simulación se obtienen los valores de las variables que intervienen en el modelo del balance hídrico superficial correspondiente al periodo analizado:

- Precipitación (mm)
- ETP (Evapotranspiración).
- Aportaciones (m^3/seg)
- Caudal específico ($l/s-km^2$)
- Aportación total (hm^3)

La figura 35, muestra el comportamiento de los aportes del caudal medio mensual de la alta cuenca del Guadalquivir generados por el modelo – CHAC para el periodo de análisis de 1980-2016.

Figura 35: Comportamiento temporal de los aportes en la cuenca del Guadalquivir



Las gráficas de aportes temporales de las subcuencas de estudio se encuentran en el anexo 1.13.

El Balance hídrico mensual de la alta cuenca del río Guadalquivir con el resumen de las principales variables hidrológicas intervinientes se resume en la tabla 34.

Tabla 34: Aportes medio mensual en la cuenca alta del Guadalquivir (m3/s)

Mes	Precipitación		Evapotranspiración		Aportes/Escorrentamiento superficial total		
	Pv (Km³)	PI (mm)	Etv (Km³)	ET (mm)	Qesp (m³/seg)	Q (l/seg/km²)	Aportación (m3/seg)
Enero	0.2698	175.046	0.166	107.516	15.983	10.369	10.369
Febrero	0.2441	158.351	0.167	108.168	18.546	12.032	12.032
Marzo	0.1875	121.651	0.178	115.668	14.035	9.105	9.105
Abril	0.0482	31.251	0.183	118.705	6.454	4.187	4.187
Mayo	0.0077	4.968	0.168	109.195	4.380	2.842	2.842
Junio	0.0020	1.319	0.162	105.022	2.966	1.924	1.924
Julio	0.0017	1.086	0.142	92.100	2.008	1.303	1.303
Agosto	0.0065	4.243	0.134	86.689	1.359	0.881	0.881
Septiembre	0.0177	11.451	0.122	78.911	0.919	0.596	0.596
Octubre	0.0728	47.251	0.131	85.014	0.734	0.476	0.476
Noviembre	0.1378	89.414	0.142	92.222	0.921	0.598	0.598
Diciembre	0.2310	149.892	0.153	99.559	7.739	5.021	20.727

4.1.6. Análisis de la oferta y demanda de agua en la cuenca.

La oferta calculada anteriormente y la demanda general para los municipios de Tarija y San Lorenzo se resumen en la tabla 35. Mientras que la situación de las fuentes de agua se detalla en la tabla 36.

Tabla 35: Oferta y demanda en la cuenca

Mes	Oferta (m3/seg)	Demanda de agua Potable		Demanda de agua Riego		Balance General (m3/seg)
		Tarija	San Lorenzo	Tarija	San Lorenzo	
		Enero	10.37	0.89	0.02	
Febrero	12.03	0.81	0.02	1.87	0.30	9.03
Marzo	9.11	0.89	0.02	1.48	0.15	6.57
Abril	4.19	0.86	0.02	1.20	0.00	2.10
Mayo	2.84	0.89	0.02	1.25	0.00	0.68
Junio	1.92	0.86	0.02	1.56	0.00	-0.52
Julio	1.30	0.89	0.02	3.47	0.00	-3.08
Agosto	0.88	0.89	0.02	6.67	0.00	-6.70
Septiembre	0.60	0.86	0.02	8.57	0.00	-8.86

Mes	Oferta (m3/seg)	Demanda de agua Potable		Demanda de agua Riego		Balance General (m3/seg)
		Tarija	San Lorenzo	Tarija	San Lorenzo	
Octubre	0.48	0.89	0.02	7.22	0.36	-8.02
Noviembre	0.60	0.86	0.02	7.35	0.70	-8.34
Diciembre	5.02	0.89	0.02	6.48	0.89	-3.27

Tabla 36: Estado actual de las fuentes superficiales

Fuente	Tipo	Lugar	Producción (l/seg)	Observaciones
Rincón de la Vittoria	Superficial	Río La Vittoria	241.3 (máximo), 90 (estiaje)	Presa derivadora y galería filtrante
Las Tipas	Superficial	Río Guadalquivir	75.56	Bombeo desde el río
Erquis	Superficial	Río Erquis	28.78	Galería filtrante
San Jacinto	Superficial	Presa San Jacinto	260	Bombeo: Actualmente no se utiliza por contaminación
Huacata	Superficial	Presa de Huacata	260	Actualmente no se utiliza por contaminación y falta de obras complementarias

Fuente: COSAALT, 2016

La tabla 36 muestra que entre junio a diciembre se presentan déficit de agua en la cuenca, asimismo, de las 5 fuentes superficiales actual que cuenta la empresa, sólo 3 están en producción, San Jacinto y Huacata están paralizadas por contaminación del agua.

4.2. La Calidad de agua en la cuenca

Los resultados obtenidos del proceso experimental respecto a la calidad del agua se detallan en los siguientes apartados.

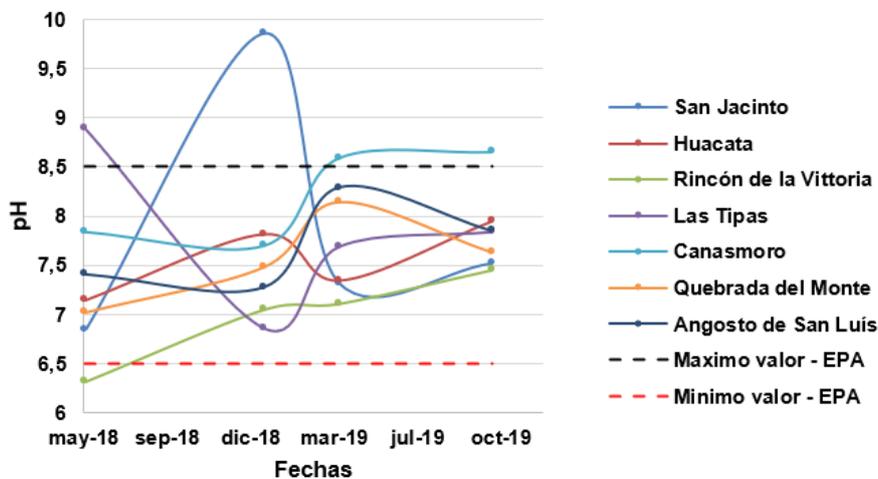
4.2.1. Monitoreo

El Monitoreo de las principales fuentes de abastecimiento de agua se realizó entre mayo del 2018 a octubre de 2019 en 15 diferentes puntos de muestreo distribuidos en 5 fuentes principales de agua, los resultados muestran el grado de contaminación y la repercusión que tiene en el consumo (Alvizuri, et al., 2022b). En el anexo 2.1 se detallan los valores de los parámetros básicos obtenidos en el monitoreo.

4.2.1.1. Parámetros de control mínimos

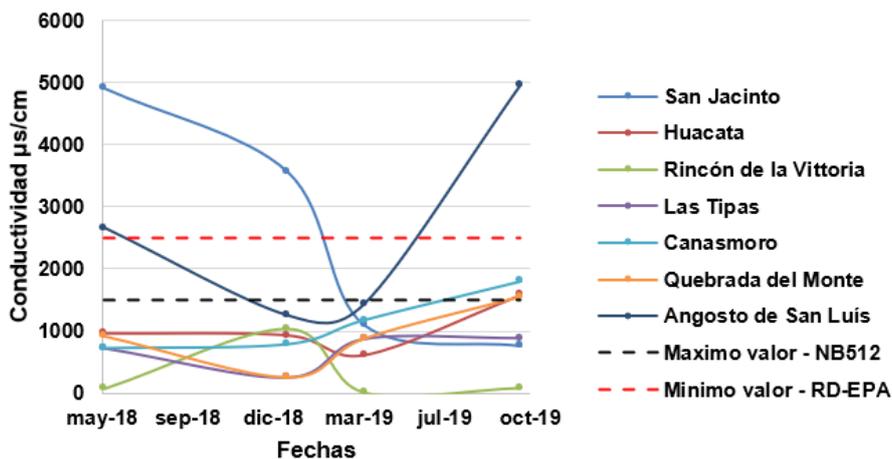
Las figuras 36 y 37 muestran el comportamiento del pH y la conductividad.

Figura 36: Comportamiento del pH



El pH tiene un comportamiento estable en casi todo el período de muestreo, sin embargo, en las Tipas y San Jacinto se observa una elevación entre agosto y octubre.

Figura 37: Comportamiento de la conductividad



La conductividad en San Jacinto y San Luís tiene valores altos durante abril y octubre, manteniéndose estable para el resto de los puntos.

Las Figuras 38 y 39 ilustran el comportamiento de la turbidez y los sólidos disueltos totales.

Figura 38: Comportamiento de la turbiedad

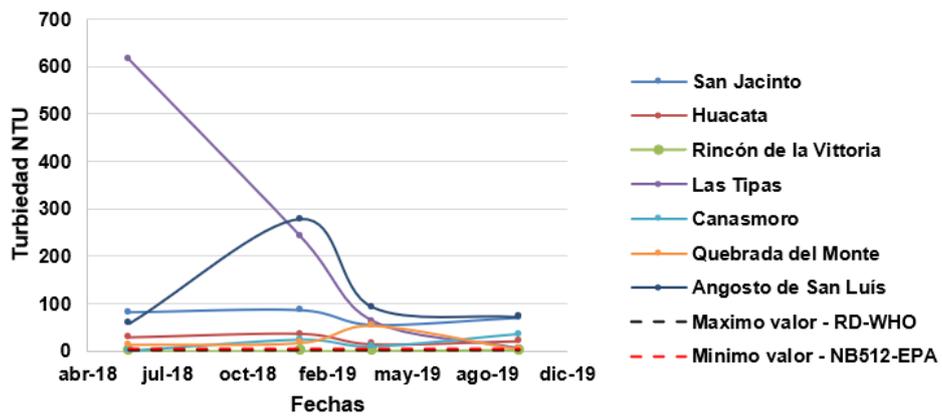
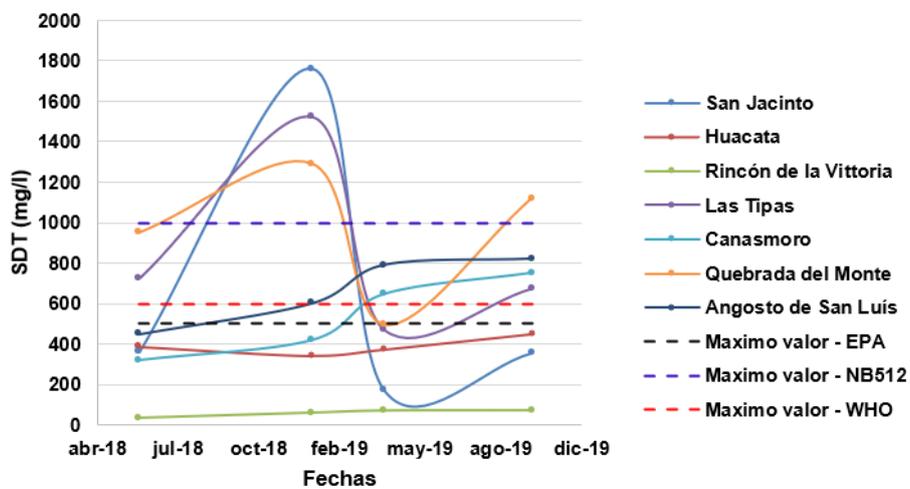


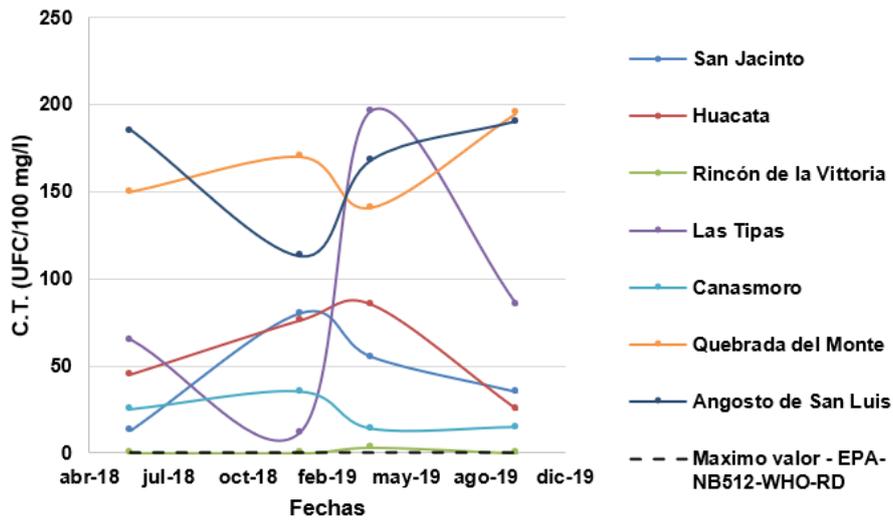
Figura 39: Comportamiento de los Sólidos Disueltos Totales – SDT



Tanto los valores de turbidez como los sólidos disueltos totales están por encima de lo permitido, a excepción del Rincón de la Vittoria, Huacata y Canasmoro, que durante los meses secos de mayo y agosto muestran una disminución significativa.

La presencia de coliformes totales es evidente en todas las áreas y puntos de análisis, excepto en el área de Rincón de la Vittoria, que muestra un comportamiento más estable. La figura 40 detalla el comportamiento de los coliformes durante el periodo de muestreo.

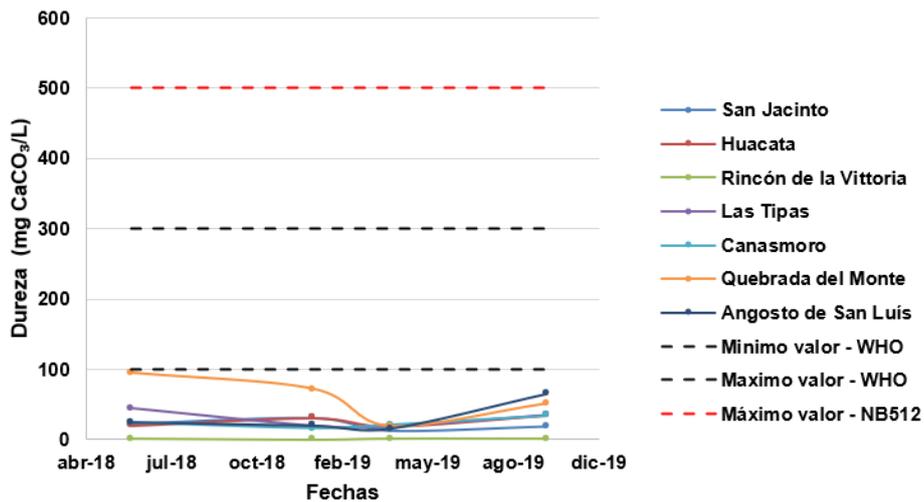
Figura 40: Comportamiento de los Coliformes Totales



4.2.1.2. Parámetros de básicos y complementarios

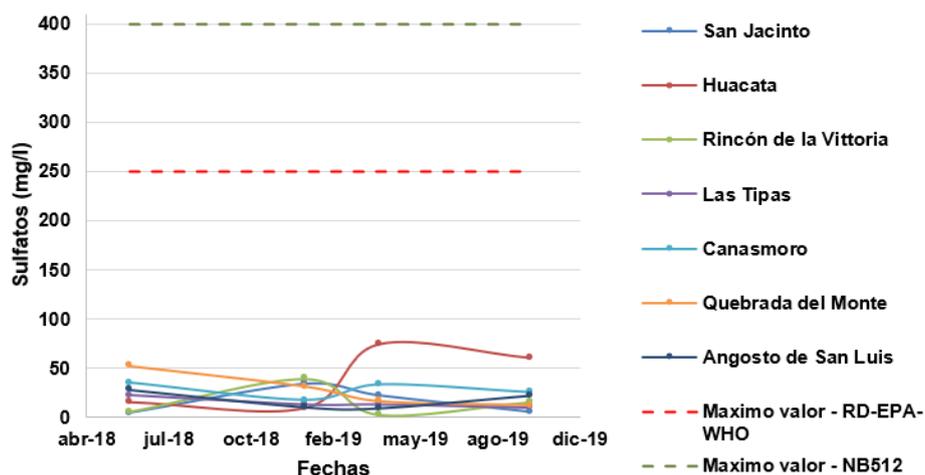
En cuanto a la dureza, todas las aguas están por debajo de los valores establecidos, la figura 41 muestra los resultados.

Figura 41: Comportamiento de la dureza



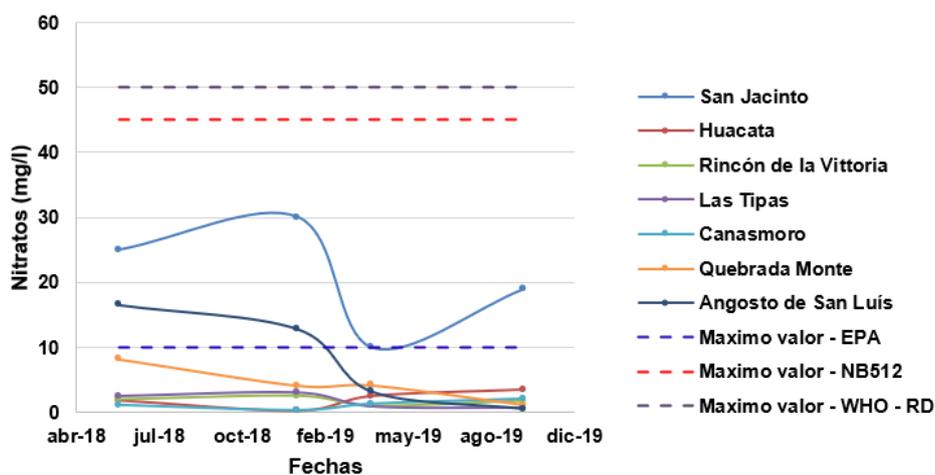
Las figuras 42 y 43 detallan el comportamiento de sulfatos y nitratos, los sulfatos muestran valores dentro de las disposiciones de las diferentes regulaciones.

Figura 42: Comportamiento de los sulfatos



Los valores de nitrato cumplen con los estándares, excepto San Jacinto y San Luís, que presentan valores superiores a los establecidos por la EPA, 2017.

Figura 43: Comportamiento de los nitratos



Respecto a comportamiento de los nitritos sólo el muestreo realizado entre mayo y septiembre de 2019 en los puntos de San Luis y Quebrada del Monte muestra valores más altos que los establecidos por NB512 y el Real Decreto 817. El resto tiene valores por debajo de lo establecido en norma. La figura 44 ilustra el comportamiento de este parámetro y la figura 45 el comportamiento del oxígeno disuelto.

Figura 44: Comportamiento de los nitritos

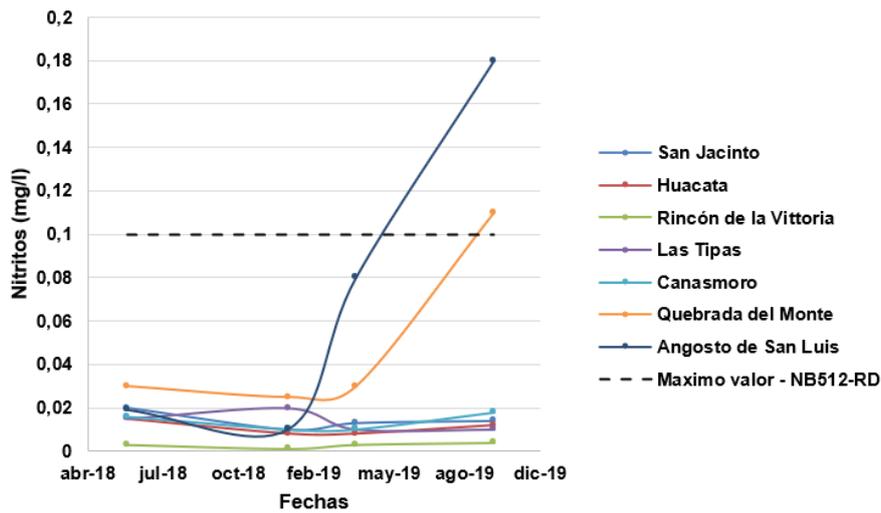
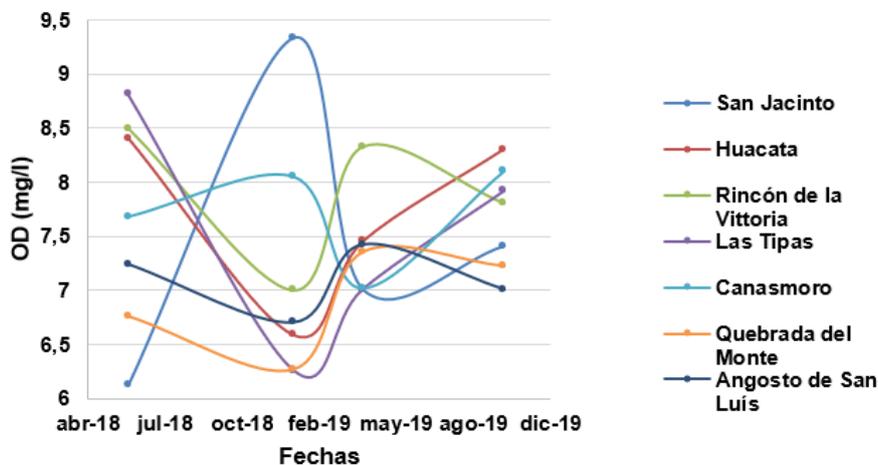


Figura 45: Comportamiento del Oxígeno Disuelto



Solo la EPA, 2017 establece parámetros máximos para DBO_5 y DQO. El Rincón de la Vittoria muestra valores por debajo de los parámetros, mientras que las Tipas y Canasmoro solo durante los meses de mayo a diciembre de 2019 tuvieron una disminución en el DBO_5 . En cuanto a los valores de la DQO, San Luis muestra valores por encima del máximo permitido durante todo el muestreo, el Rincón de la Vittoria tuvo un aumento en el muestreo realizado en octubre de 2018.

Las figuras 46 y 47 ilustra el comportamiento del DBO_5 y DQO.

Figura 46: Comportamiento del DBO₅

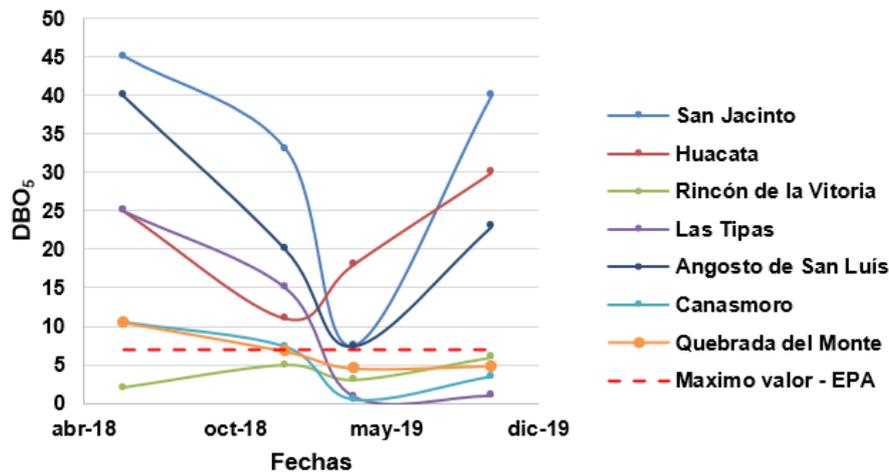
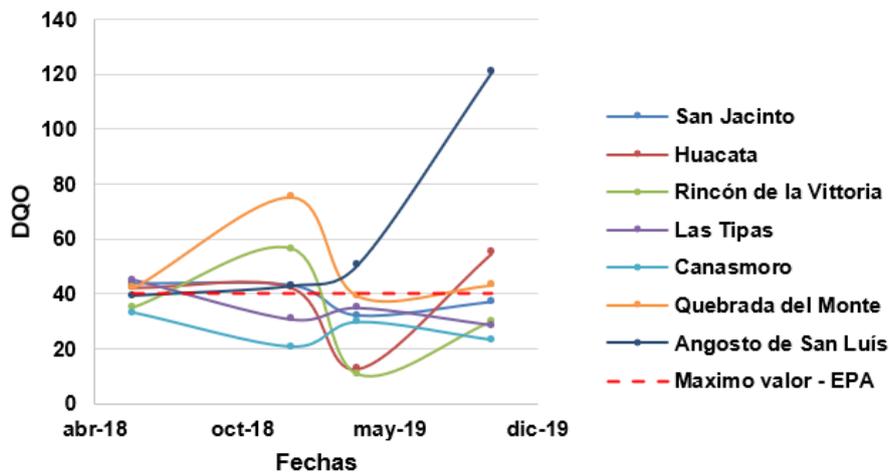


Figura 47: Comportamiento del DQO

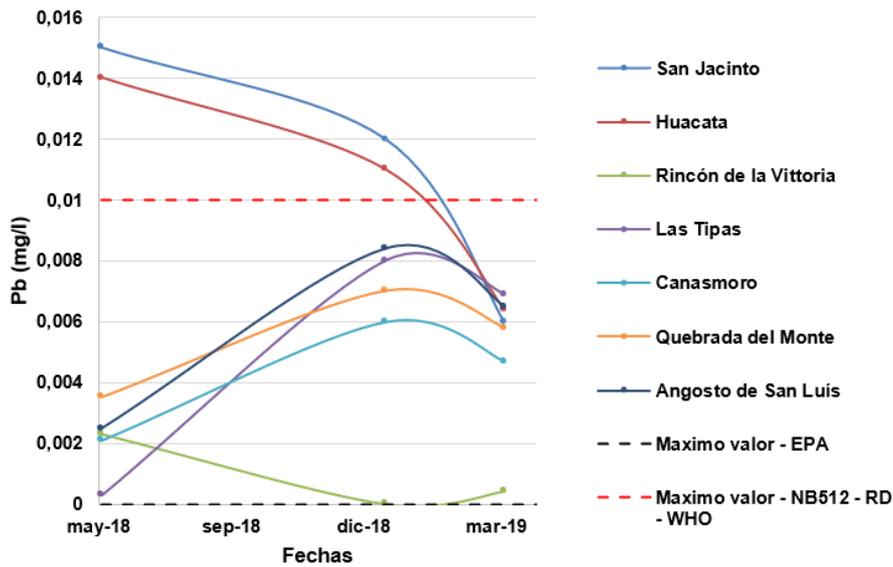


4.2.1.3. Metales

Como se indicó en acápite anteriores, el monitoreo se realizó para 35 metales, sin embargo, la investigación se centra en aquellos metales cuyos parámetros están por encima de las normativas de control, siendo el plomo (Pb), hierro (Fe) y manganeso (Mn), los que muestran valores críticos en el agua. En el anexo 2.2 se detallan los resultados de las analíticas realizadas para la determinación de concentraciones de los metales en los diferentes meses del periodo de análisis

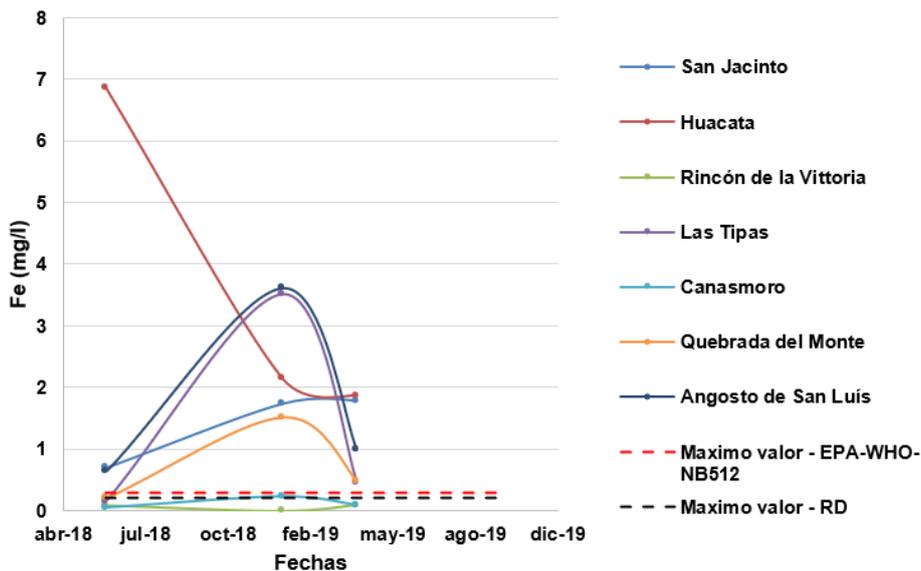
Para el EPA-MCL, todos los puntos tienen concentraciones de plomo superiores a las permitidas, sin embargo, para la NB512, el RD817 o la OMS, 2016, solo las muestras del lago San Jacinto y Huacata presentan concentraciones fuera de la norma. La figura 48 ilustra el comportamiento del plomo (Pb) durante el periodo de muestreo.

Figura 48: Comportamiento del plomo (Pb)



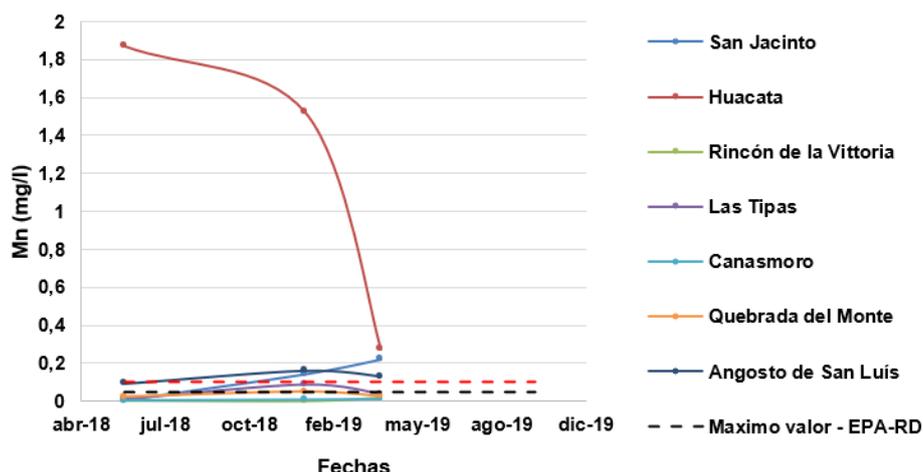
Para el hierro, solo las aguas del Rincón de la Vittoria y Canasmoro tienen concentraciones por debajo de las normas, el resto de los puntos de análisis muestran concentraciones muy superiores al valor máximo permitido. La figura 49 muestra el comportamiento de este metal.

Figura 49: Comportamiento del hierro (Fe)



En la figura 50 se observa que el manganeso tiene altas concentraciones en Huacata, San Jacinto y San Luis, el resto tiene concentraciones por debajo de los límites permitidos.

Figura 50: Comportamiento del manganeso (Mn)

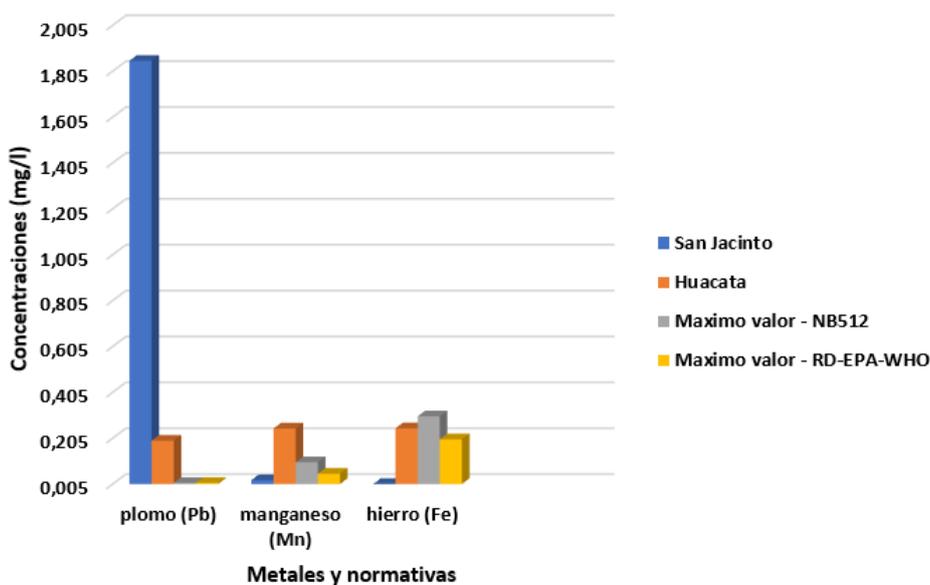


4.2.1.4. Monitoreo de lodos en los embalses de San Jacinto y Huacata.

Respecto a los lodos, el monitoreo contempla el análisis de las presas de Huacata y San Jacinto. En el anexo 2.3 se detallan las concentraciones encontradas en lodos.

Las concentraciones de lodo de los depósitos de San Jacinto y Huacata muestran que exceden los parámetros máximos requeridos por los estándares. La figura 51 muestra este comportamiento.

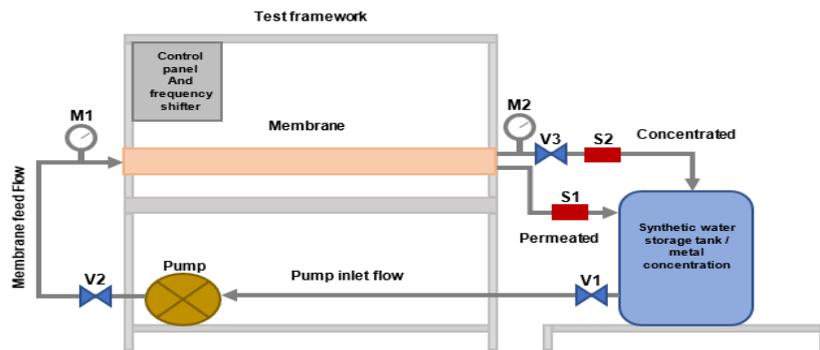
Figura 51: Concentración de metales en lodos de los embalses de San Jacinto y Huacata



4.3. Diseño, montaje y puesta en marcha de la planta piloto

El diseño final de la planta piloto y el esquema de funcionamiento se muestra en la figura 52.

Figura 52: Esquema del diseño final de la Planta Piloto



El montaje final la puesta en funcionamiento se ilustra en la figura 53.

Figura 53: Montaje final de la planta piloto instalada en laboratorios de la UCB Tarija



Planta Piloto en laboratorios de la Universidad Católica de Bolivia-Tarija (en pleno funcionamiento).

4.3.1. Protocolo de funcionamiento

Para una adecuada operación y manipulación de la planta se elaboró el protocolo de funcionamiento bajo las consideraciones del diseño de experimento y la manipulación de las variables del sistema. El procedimiento se detalla a continuación.

1ro. Verificar que el tanque de almacenamiento con el agua sintética esté conectado con el sistema de bombeo a través de la válvula V1.

2do. Para iniciar la experimentación, las válvulas V1 (para el agua que ingresa a la bomba) y V2 (para alimentar la membrana) deben estar abiertas.

3ro. El regulador de frecuencia ubicado en el panel de control debe estar en la posición inicial (cero) y, la válvula de aguja V3 que regula la presión ubicada en la salida del concentrado, debe estar en el nivel más bajo.

4to. Al iniciar el arranque del sistema, debe verificarse que las presiones indicadas por los manómetros M1 y M2 ubicados en la entrada de la membrana y en la salida del concentrado sean iguales. Las especificaciones del fabricante indican una tolerancia máxima de 1 Bar como diferencia de caída de presión en la membrana.

5to. Las variaciones de presión pueden manipularse o controlarse con la apertura o cierre de la válvula aguja V3. Los caudales de suministro, concentrado y permeado se regulan con el variador de frecuencia. Es importante salvaguardar las condiciones del proveedor con respecto a las presiones y temperaturas máximas de trabajo que soportan la membrana y la carcasa protectora.

6to. Los caudales en la salida del sistema se visualizan y sistematizan mediante los sensores de flujo S1 y S2 ubicados en la salida del permeado y concentrado respectivamente. Estos se encuentran conectados a un ordenador y programados en una placa Arduino.

7mo. Cada experimento de cada metal genera información que permite evaluar la eficiencia y el comportamiento de la membrana en condiciones de operación específicas del sitio. Los datos de presión, temperatura, concentración del metal y tasas o conversiones de flujo de operación, deben ser anotados en una planilla Excel para su posterior procesamiento.

8vo. Cuando se observe la estabilización de los flujos que pueden durar entre 30 y 45 minutos, se toman 3 muestras de agua en cantidades mínimas de 100 ml de los siguientes sectores.

- Flujo de ingreso con la muestra de concentrado inicial.
- El flujo de permeado con la muestra a la salida del permeado.
- Flujo de concentrado con la muestra en la salida del concentrado

9no. Al final de las pruebas, el cierre debe realizarse primero apagando el regulador de frecuencia a cero y desconectando todo el sistema de la energía eléctrica, luego se baja la válvula V3 a la presión mínima y finalmente se cierran las válvulas V1 y V2.

Antes de iniciar un nuevo experimento, se debe verificar la limpieza de la membrana.

4.3.1.1. Consideraciones importantes

Con el objeto de precautelar la integridad y eficiencia de la membrana, así como del sistema en su conjunto es importante cumplir con las siguientes consideraciones.

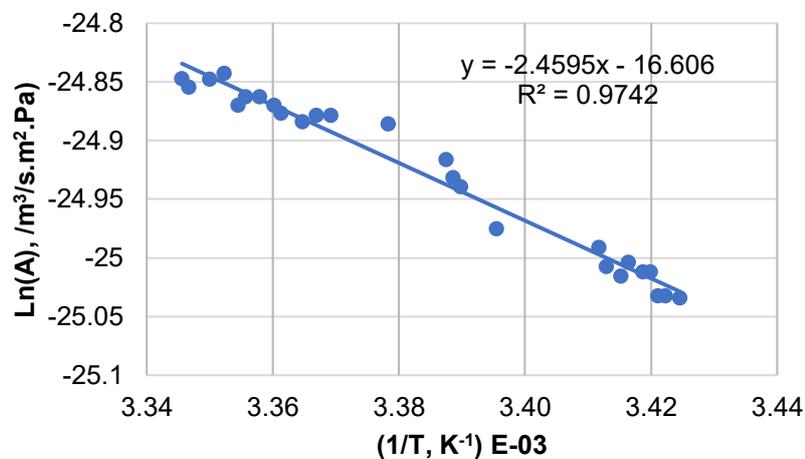
- Iniciar los experimentos con la mínima concentración o nivel más bajo del metal, ir aumentando la concentración al nivel medio y alto de manera progresiva, esto permite un mejor manejo del agua sintética.

- Para evitar el ensuciamiento prematuro de la membrana y perder efectividad, es necesarios que luego de cada corrida y antes del aumento de los niveles de concentración se realice una limpieza del sistema, aplicando el protocolo descrito más adelante.

4.3.2. Ajuste por temperatura

Utilizando el modelo de Arrhenius se realizaron las pruebas experimentales para la obtención de un factor de corrección por temperatura para una presión constante de 5×10^5 Pa (5 Bar) y un área activa de la membrana de 2.5 m^2 . El comportamiento de la permeabilidad a diferentes temperaturas se detalla en el anexo 2.4. La figura 54 muestra la variación del flux respecto a los cambios de temperatura, su línea de tendencia y la regresión obtenida que permite la corrección del flux a cualquier temperatura.

Figura 54: Ajuste por temperatura



Con la ecuación 32 y la curva de ajuste, el modelo de ajuste de los resultados experimentales a cualquier temperatura se detalla en la ecuación (56):

$$J_{no} = J T e^{2459.5 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{293} \right)} \quad (56)$$

4.3.3. Verificación de la eficiencia de la membrana en condiciones del proveedor

Bajo las condiciones de operación indicadas por el proveedor, se obtuvieron los siguientes resultados de operación y eficiencia de la membrana. La tabla 37 detalla la eficiencia en la remoción de NaCl.

Tabla 37: Verificación de la eficiencia de la membrana en la remoción de NaCl

Muestra	Tiempo (min)	Conductividad (us/cm) – permeado	Ph	Temperatur a °C	Conductividad en disolución (NaCl) – 1500 PPM en 60 litros – us/cm	Remoción de NaCl	% de remoción
1	30	12.39	7.13	25	2760	2747.61	99.55%
2	35	12.58	7.17	25	2760	2747.42	99.54%
3	40	13.3	7.76	26	2760	2746.7	99.52%
4	45	13.3	7.91	26	2760	2746.7	99.52%

Se verifica que la membrana tiene un 99.53% de remoción de NaCl que es mayor al indicado por el proveedor del 99.3%. Este resultado ha sido obtenido comparando las lecturas de la conductividad en el flujo de permeado respecto a la conductividad de la solución de prueba con 1500 PPM en 60 litros.

4.3.4. Elaboración de las aguas sintéticas

La tabla 38 detalla las concentraciones de las sales de NaCl y de los metales utilizadas en la elaboración y preparación de las aguas sintéticas. Para 3 niveles de concentración. La concentración inicial C1 corresponde a los valores máximos encontrados en el monitoreo, la media C2 y la alta C3 se han fijado para poder definir el modelo de OI hasta valores de conversión del 90%.

Tabla 38: Concentraciones de sal de metal y cloruro sódico

No	Metal	Sales	Cantidad de Sales por concentración (mol/l/60litros) litros						
			C1 (inicial)		C2 (media)		C3 (alta)		
			Metal	NaCl	Metal	NaCl	Metal	NaCl	Metal
1	plomo	Pb (NO3)2	NaCl	8,84E-08	2,18E-04	4,42E-07	1,09E-03	8,84E-07	2,18E-03
2	hierro	(FeCl3)6H2O	NaCl	7,45E-06	4,85E-04	3,72E-05	2,43E-03	7,45E-05	4,85E-03
3	manganeso	MnSO4-H2O	NaCl	2,10E-06	4,85E-04	1,05E-05	2,43E-03	2,10E-05	4,85E-03

4.3.4.1. Verificación de la precipitación de las sales

Para evitar ensuciamiento prematuro de la membrana y variabilidad en la eficiencia de esta, se verificó la solubilidad y precipitación de las sales utilizadas para las aguas sintéticas. En todos los casos se comprueba que las concentraciones máximas que se alcanzarían con las disoluciones sintéticas “C3”, están muy por debajo de las solubilidades de las sales y, por tanto, no hay riesgo de incrustación de estas en la superficie de la membrana. En los anexos 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10 y 2.11, se detallan los cálculos relacionados a la precipitación de las sales en las distintas disoluciones y las comprobaciones respectivas.

La solubilidad a 20°C de las sales utilizadas se detalla en la tabla 39.

Tabla 39: Solubilidad de las sales

Sal	Solubilidad (g/l)
Pb(NO₃)₂	486
FeCl₂*6H₂O	920
MnSO₄*H₂O	762
NaCl	358

Fuente: Elaboración propia, en base a especificaciones del proveedor, www.merckgroup.com

4.4. Análisis del comportamiento del sistema y validación del modelo CP

De acuerdo con el diseño de experimentos, se realizaron 9 corridas experimentales para cada metal con la interacción de las variables de control y el ajuste por temperatura. Los resultados y la evaluación final se describen a continuación (Villena, et al. 2022b).

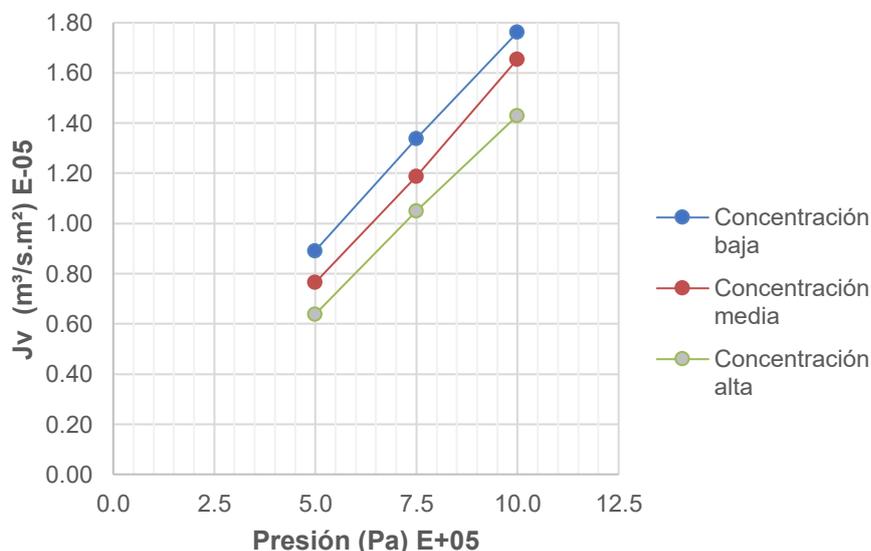
4.4.1. Análisis y evaluación del plomo.

Se han tenido dos momentos de análisis y verificación, el primero a través de la conductividad y el segundo mediante analíticas químicas. Con la conductividad se evaluó en primera instancia la remoción del Pb y el NaCl, mientras que con la analítica se verificó las concentraciones de los metales.

4.4.1.1. Comportamiento de la membrana respecto a la presión

La figura 55 muestra el comportamiento del J_v respecto al aumento de presión ΔP para cada concentración.

Figura 55: Comportamiento del J_v respecto a la presión ΔP



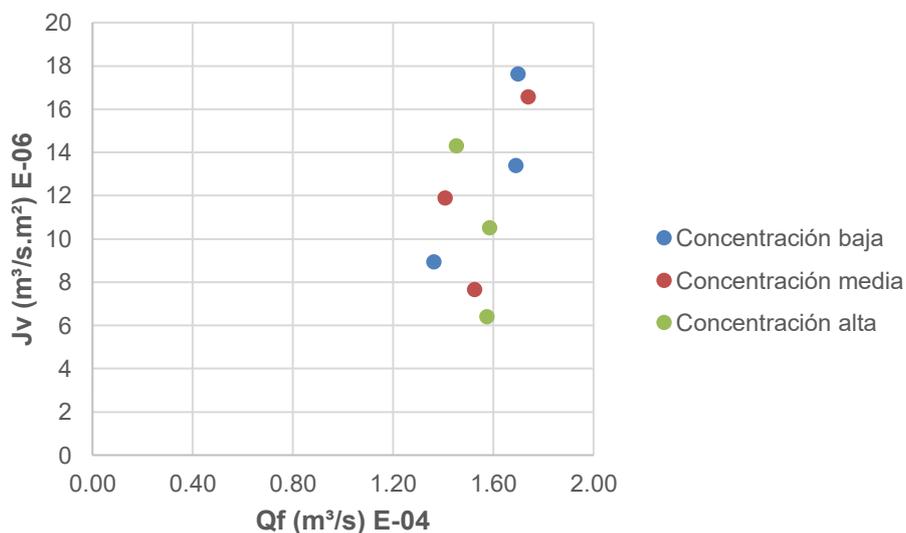
Los resultados muestran un adecuado comportamiento de separación entre los componentes de las aguas sintéticas en la membrana. El comportamiento del flux fue el esperado para un proceso de OI, observándose que este es directamente proporcional a la presión e inversamente proporcional a la concentración. Esto indica que la microestructura de la membrana interactuaría apropiadamente con la solución.

Es bien sabido que bajo presiones definidas el comportamiento del flujo con la presión tiende a ser lineal, por lo que no se observa compactación física de la membrana cuando las concentraciones de soluto son bajas. Sin embargo, para altas concentraciones la curva muestra un comportamiento diferente, esto debido a la dificultad en el proceso de transferencia de masa cerca de la superficie de la membrana. La tabla resumen de los resultados experimentales se encuentra en el anexo 2.12.

4.4.1.2. Efecto del Flujo de alimento Q_f en el J_v

Con los rangos de flujo de entrada utilizados para el sistema de $1.1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} < Q_f < 1.53 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, se observa el comportamiento del flux, figura 56.

Figura 56: Comportamiento del J_v respecto a la variación de Q_f



Se observa que el flux aumenta con el aumento del caudal de alimento, sin embargo, también se observa que, con el aumento en la concentración, el flujo disminuye proporcionalmente.

Incrementar el Q_f con concentraciones bajas aumenta la velocidad, esto hace que el coeficiente de transferencia de masa aumente y por lo tanto aumenta el J_v . Por el contrario, el aumento de la concentración hace que aumente la CP y que disminuya el J_v . Tal cual se señala en el trabajo de investigación sobre un proceso de PC por ósmosis inversa de una solución de glucosa presentado por Chenghan, C. y Han, Q. (2019).

Con esto se puede demostrar que a bajas concentraciones el mecanismo de control es la transferencia de masa, mientras que a altas concentraciones el que gobierna el proceso es la polarización de la concentración (Villena, et al. 2021).

4.4.1.3. Evaluación de la remoción de sales mediante análisis de conductividad.

Se obtuvieron muestras de agua del sistema en el ingreso y permeado para evaluar el índice de rechazo del Pb + NaCl a partir de la medición de la conductividad, este proceso tiene por objeto evaluar en una primera instancia el comportamiento del sistema, los resultados se muestran en las tablas 40, 41 y 42.

Tabla 40: Análisis del rechazo de sales por conductividad del plomo para la concentración baja

Muestra	Tiempo de toma (operación)	Conductividad (us/cm) – permeado	Ph	Conductividad en el ingreso (60 litros) – us/cm	Conductividad en el permeado (us/cm)	% de remoción	Presión (Pas)	Nivel de Caudal
1	30	4.26	6.9	462	457.74	99.08%	5E05	Bajo
2	35	3.39	6.62	395	391.61	99.14%	7.5E05	alto
3	45	2.98	6.61	403	400.02	99.26%	10E05	medio

Tabla 41: Análisis del rechazo de sales por conductividad del plomo para la concentración media

Muestra	Tiempo de toma (operación)	Conductividad (us/cm) – permeado	Ph	Conductividad en el ingreso (60 litros) – us/cm	Conductividad en el permeado (us/cm)	% de remoción	Presión (Pas)	Nivel de Caudal
1	40	16.29	6.32	1909	1892.71	99.15%	5E05	bajo
2	35	18.45	6.09	1909	1890.55	99.03%	7.5E05	medio
4	45	17.33	5.92	1909	1891.67	99.09%	10E05	alto

Tabla 42: Análisis del rechazo de sales por conductividad del plomo para la concentración alta

Muestra	Tiempo de toma (operación)	Conductividad (us/cm) – permeado	Ph	Conductividad en el ingreso (60 litros) – us/cm	Conductividad en el permeado (us/cm)	% de remoción	Presión (Pas)	Nivel de Caudal
1	40	34.4	6.01	4000.5	3966.1	99.14%	5E05	bajo
2	40	37.1	5.94	4000.5	3963.4	99.07%	7.5E05	medio
3	45	38.9	5.86	4000.5	3961.6	99.03%	10E05	bajo

Aunque el porcentaje de rechazo disminuye con cada concentración, se observa que los niveles están por encima del 99% lo que permite tener una primera evaluación favorable del sistema y en especial de la membrana utilizada.

4.4.1.4. Evaluación del índice de remoción del Pb, mediante analítica química.

Los resultados del análisis químico respecto a las concentraciones del Pb y el NaCl en el agua tanto en el ingreso como en el permeado, se detallan en las tablas 43 y 44:

Tabla 43: Analíticas del plomo

Nivel y Presión de trabajo (Pa) E+05	PLOMO			
	Ingreso Analítica "Cf" (mg/l)	Permeado Analítica "Cp" (mg/l)	Permitido/norma (mg/l)	Rechazo %
C1-5	4.47E-02	5.32E-04	0.01	98.81%
C1-7.5	4.45E-02	3.26E-04	0.01	99.27%
C1-10	4.72E-02	2.66E-04	0.01	99.44%
C2-5	4.46E-01	2.93E-04	0.01	99.93%
C2-7.5	4.55E-01	1.96E-04	0.01	99.96%
C2-10	4.56E-01	1.67E-04	0.01	99.96%
C3-5	1.74E+00	1.96E-04	0.01	99.99%
C3-7.5	1.76E+00	1.94E-04	0.01	99.99%
C3-10	1.77E+00	3.73E-04	0.01	99.98%

Tabla 44: Analíticas para el NaCl en combinación con el plomo

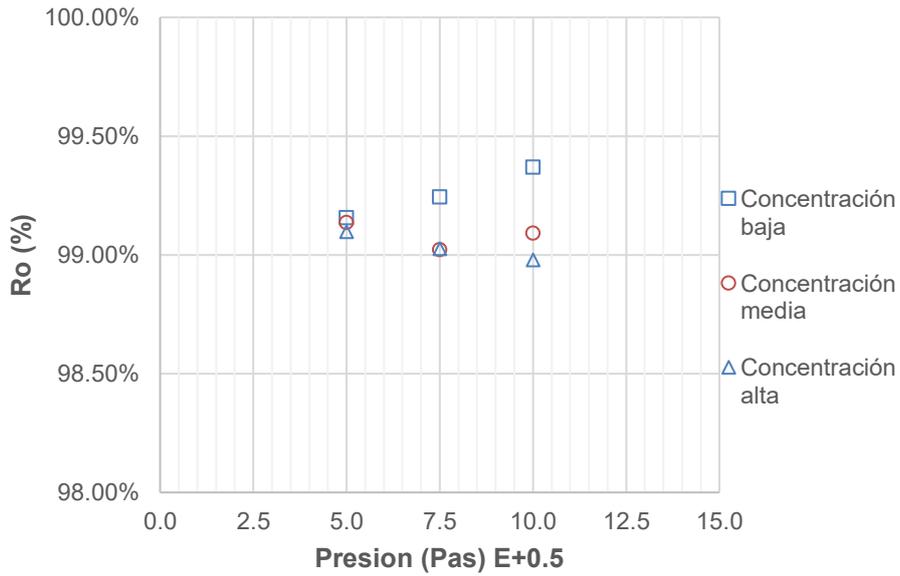
Presión (Pas) E+05	Concentración	NaCl en combinación con el Pb		
		Ingreso Analítica (mg/l)	Permeado/analítica (mg/l)	Rechazo %
5	Baja	227.54	1.92E+00	99.16%
7.5	Baja	194.54	1.47E+00	99.24%
10	Baja	198.48	1.25E+00	99.37%
5	Media	929.84	8.02E+00	99.14%
7.5	Media	929.84	9.09E+00	99.02%
10	Media	940.18	8.54E+00	99.09%
5	Alta	1876.43	1.69E+01	99.09%
7.5	Alta	1876.43	1.83E+01	99.03%
10	Alta	1876.43	1.92E+01	98.98%

Los resultados muestran que los índices de rechazos están por encima del 99%, para la mayoría de los casos.

4.4.1.5. Efecto de la presión ΔP sobre el rechazo del soluto R_o

Los resultados detallados anteriormente muestran que en general las tasas de rechazo del soluto fueron superiores al 99%. Esto muestra que el proceso de OI permite obtener aguas seguras en concentraciones de metales por debajo de los límites permitidos. La figura 57 muestra este comportamiento.

Figura 57: Efecto de la presión ΔP sobre el índice de rechazo R_o



El índice de rechazo R_o muestra un comportamiento adecuado, aunque no se visualiza una tendencia muy clara, los rechazos en la mayoría de los casos son superiores al 99%. Esto en términos cuantitativos permite establecer que las concentraciones de metales en el permeado están por debajo de los parámetros establecidos en la normativa nacional e internacional para el agua de consumo humano. Se evidencia que con las concentraciones bajas y medias la tendencia al rechazo es creciente, sin embargo, para las concentraciones altas el rechazo decae, debido a la concentración del soluto cerca de la capa límite de la membrana.

4.4.1.6. Efecto de concentración del soluto C_f sobre el Flux J_v y el rechazo R_o

Las figuras 58 y 59 muestran el comportamiento del sistema respecto al aumento de la concentración C_f .

Figura 58: Efecto de la concentración C_f sobre el flux J_v

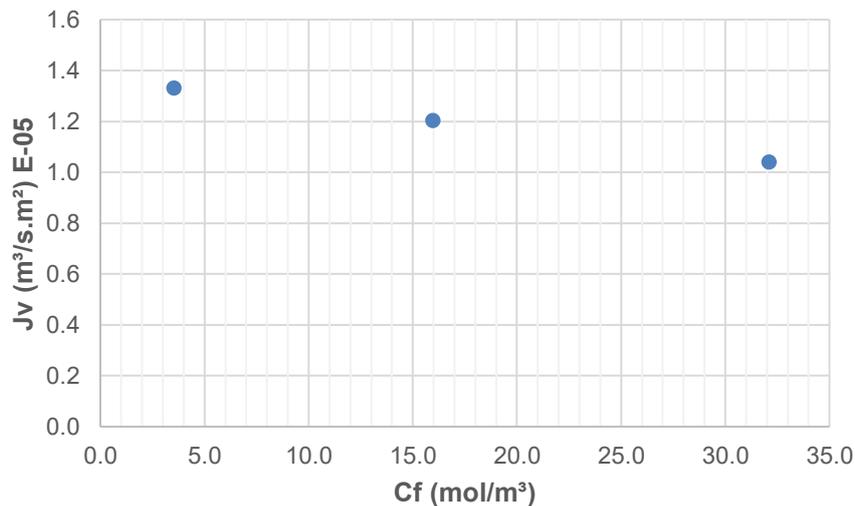
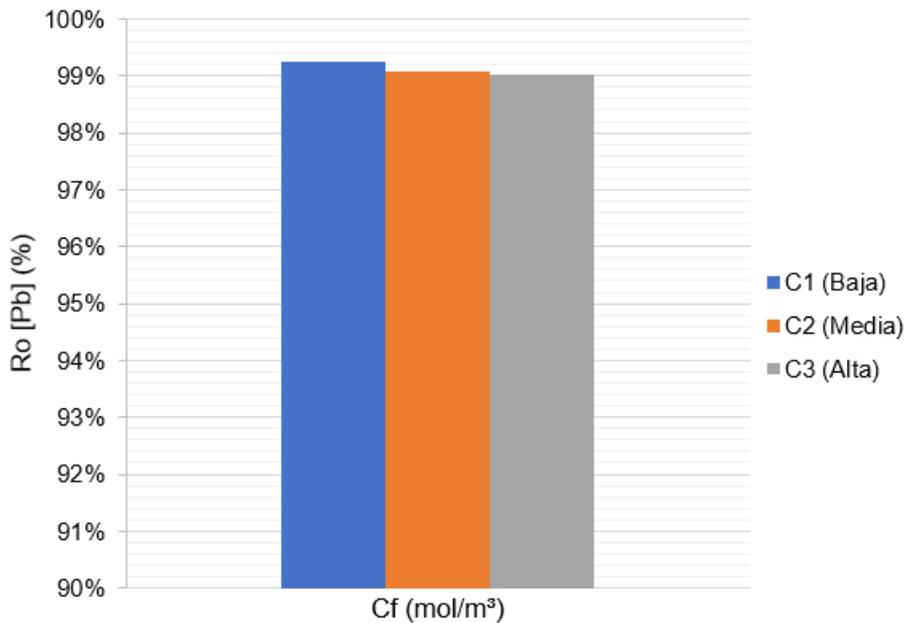


Figura 59: Efecto de la concentración C_f sobre el rechazo R_o

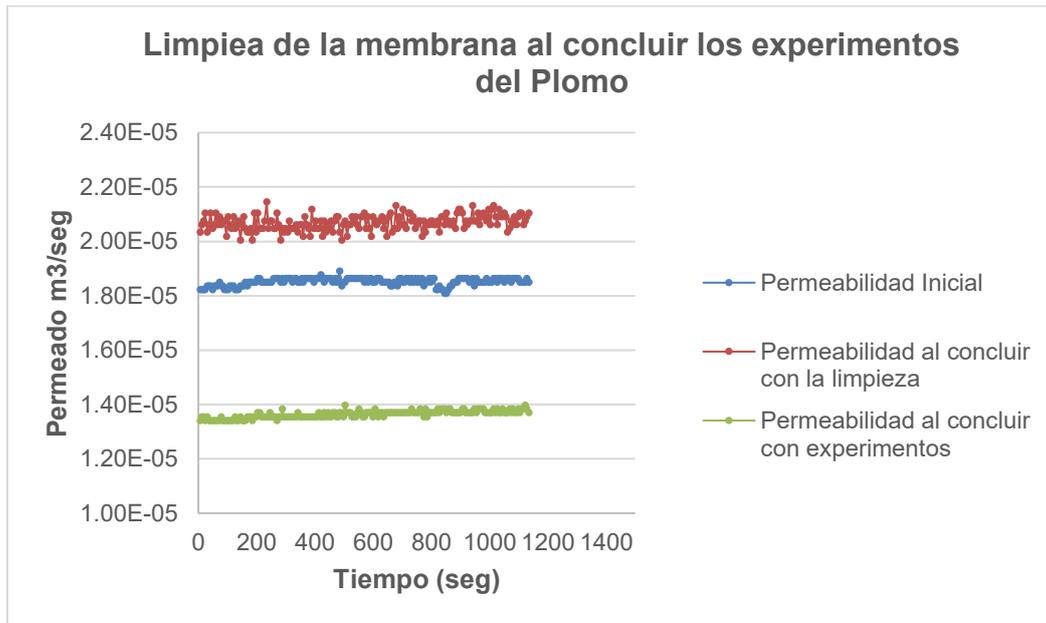


Los gráficos muestran que ante el aumento de la concentración del soluto C_f , el flux disminuye, esto se explica por la disminución en la transferencia de masa y la concentración por polarización cerca de la capa límite de la membrana. Si bien el rechazo en ambos casos es superior al 98%, en la gráfica 58 se observa una ligera disminución de R_o , esto debido a que a medida que aumenta la concentración el proceso de CP cerca de la capa límite de la membrana produce una disminución en el rechazo del soluto. Estos resultados concuerdan con el trabajo de Pontié, M. et al (2008), quienes presentan un enfoque que combina la caracterización y modelado de la transferencia de masa en un sistema de OI a presiones bajas.

4.4.1.7 Limpieza de las membranas luego de los experimentos con plomo

Concluidos los experimentos con el plomo y siguiendo el protocolo específico, se procedió a la limpieza de la membrana antes de iniciar con el segundo metal, los resultados de la recuperación de la membrana se muestran en la figura 60.

Figura 60: Limpieza membrana luego de experimentos del plomo



En este caso, se observa que al concluir los experimentos con el plomo el permeado cae hasta un 26% respecto al permeado inicial. Sin embargo, al concluir la fase de limpieza el permeado recupera inclusive un 12% por encima de la permeabilidad inicial. La limpieza se la realizó en 3 ciclos con agua destilada, en este caso no ha sido necesario utilizar ácido cítrico.

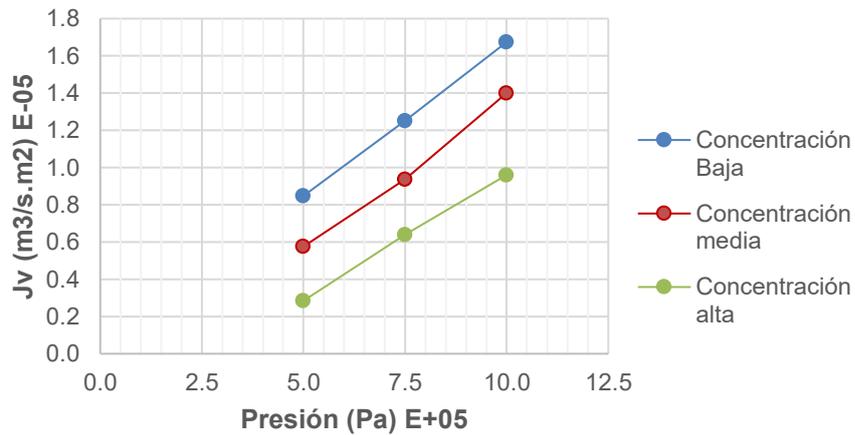
4.4.2. Análisis y evaluación del manganeso.

Los resultados obtenidos durante la separación del manganeso se detallan en los siguientes apartados.

4.4.2.1. Evaluación del comportamiento del Flux

La figura 61 muestra el comportamiento del J_v con respecto al aumento de presión ΔP para cada concentración.

Figura 61: Comportamiento del J_v respecto a la presión ΔP

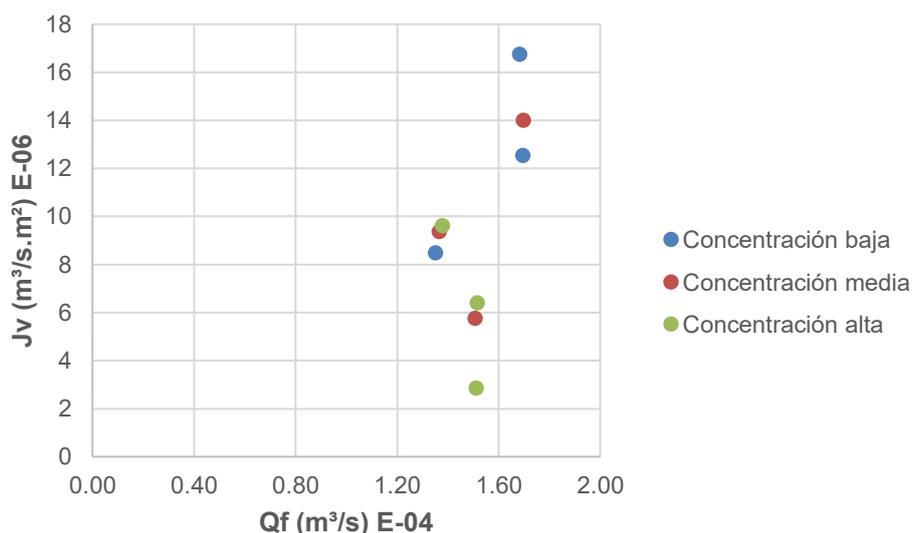


De manera similar al plomo, se observa un adecuado comportamiento de separación entre los componentes de las aguas sintéticas en la membrana. El comportamiento del flux fue el esperado para un proceso de OI. Aunque las concentraciones del manganeso son mucho mayores a las del plomo, las gráficas muestran que bajo presiones definidas el comportamiento del flujo con la presión tiende a ser lineal, por lo que no se observa compactación física de la membrana cuando las concentraciones de soluto son bajas. Sin embargo, para altas concentraciones la curva muestra un comportamiento diferente, esto debido a la dificultad en el proceso de transferencia de masa cerca de la superficie de la membrana. La tabla resumen de los resultados experimentales se encuentra en el anexo 2.13.

4.4.2.2. Efecto del Flujo de alimento Q_f en el J_v

Los rangos de flujo de entrada utilizados para el sistema son similares a los del plomo, de $1.1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} < Q_f < 1.53 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, bajo esta variable de operación, el comportamiento del flux se muestra en la figura 62.

Figura 62: Comportamiento del Jv respecto a la variación de Qf



Se observa que el flux aumenta con el aumento del caudal de alimento Qf, sin embargo, también se observa que con el aumento en la concentración el flujo disminuye considerablemente.

Incrementar el Qf con concentraciones bajas aumenta la velocidad, esto hace que el coeficiente de transferencia de masa aumente y por lo tanto aumenta el Jv. Por el contrario, el aumento de la concentración hace que aumente la CP y que disminuya el Jv. Se puede afirmar que a bajas concentraciones el mecanismo de control es la transferencia de masa, mientras que a altas concentraciones el que gobierna el proceso es la polarización por concentración., Se observa un comportamiento similar que el plomo sin embargo a altas concentraciones la diferencia es más marcada, esto debido a que las concentraciones de manganeso son mayores a la del plomo acrecentando más aun la concentración en la capa límite de la membrana.

4.4.2.3. Evaluación de la remoción de sales mediante análisis de conductividad.

El comportamiento del sistema mediante la conductividad, se detallan en las tablas 45, 46 y 47.

Tabla 45: Análisis del rechazo de sales por conductividad del manganeso para la concentración baja

Muestra	Tiempo de toma (operación)	Conductividad (us/cm) – permeado	Ph	Conductividad en el ingreso (60 litros) – us/cm	Conductividad en el permeado (us/cm)	% de remoción	Presión (Pas)	Nivel de Caudal
1	30	9.41	7.66	1027	1017.59	99.08%	5E05	bajo
2	40	8.43	7.19	1027	1018.57	99.18%	7.5E05	medio
3	40	8.44	7.22	1027	1018.56	99.18%	10E05	alto

Tabla 46: Análisis del rechazo de sales por conductividad del manganeso para la concentración media

Muestra	Tiempo de toma (operación)	Conductividad (us/cm) – permeado	Ph	Conductividad en el ingreso (60 litros) – us/cm	Conductividad en el permeado (us/cm)	% de remoción	Presión (Pas)	Nivel de Caudal
1	30	43.1	5.89	4560	4516.9	99.05%	5E05	medio
2	30	43.2	5.85	4560	4516.8	99.05%	7.5E05	bajo
3	30	43.9	5.92	4560	4516.1	99.04%	10E05	alto

Tabla 47: Análisis del rechazo de sales por conductividad del manganeso para la concentración alta

Muestra	Tiempo de toma (operación)	Conductividad (us/cm) – permeado	Ph	Conductividad en el ingreso (60 litros) – us/cm	Conductividad en el permeado (us/cm)	% de remoción	Presión (Pas)	Nivel de Caudal
1	40	90.8	5.91	8720	8629.2	98.96%	5E05	bajo
2	30	83.8	5.82	8720	8636.2	99.04%	7.5E05	medio
3	30	86.5	5.84	8720	8633.5	99.01%	10E05	alto

El manganeso muestra un comportamiento similar al plomo, aunque el porcentaje de rechazo disminuye con cada concentración de metal, se observa un rechazo favorable del sistema.

4.4.2.4. Evaluación del índice de remoción del Mn, mediante analítica química.

Los resultados del análisis químico respecto a las concentraciones del manganeso y el NaCl en el agua tanto en el ingreso del sistema como en el permeado, se detallan en la tabla 48 y 49.

Tabla 48: Analíticas del manganeso

Nivel y Presión de trabajo (Pa) E+05	MANGANESO			
	Ingreso/analítica (mg/l)	Permeado/analítica (mg/l)	Permitido/norma (mg/l)	Rechazo %
C1-5	1.59E+00	2.72E-03	0.1	99.83%
C1-7.5	1.57E+00	2.59E-03	0.1	99.83%
C1-10	1.57E+00	3.11E-03	0.1	99.80%
C2-5	9.38E+00	1.95E-03	0.1	99.98%
C2-7.5	9.38E+00	1.35E-03	0.1	99.99%
C2-10	9.27E+00	1.30E-03	0.1	99.99%
C3-5	1.69E+01	1.47E-02	0.1	99.91%
C3-7.5	1.66E+01	7.35E-03	0.1	99.96%
C3-10	1.60E+01	8.73E-03	0.1	99.95%

Los resultados muestran que en general el nivel de rechazo es óptimo con porcentajes superiores al 99%.

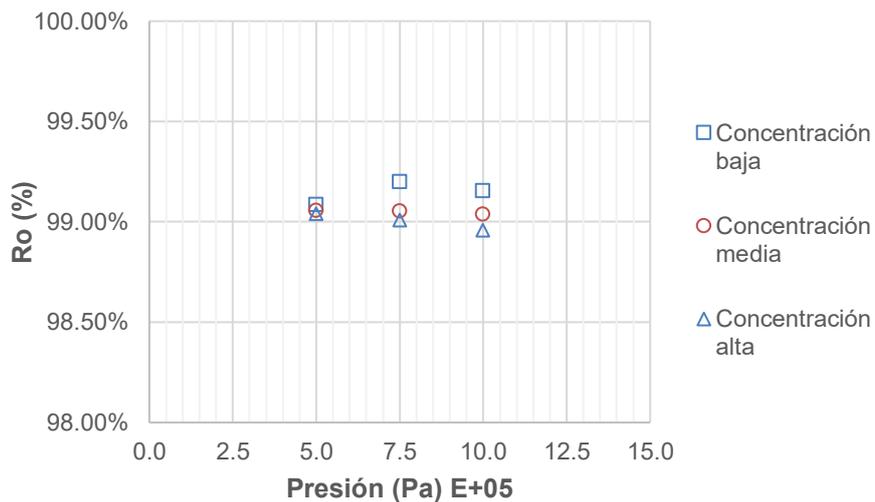
Tabla 49: Analíticas del NaCl en combinación con el manganeso

Presión (Pas)	Concentración	NaCl en combinación con el Mn		
		Ingreso/analítica (mg/l)	Permeado/analítica (mg/l)	Rechazo %
5.00E+05	Baja	505.80	4.62E+00	99.086%
7.50E+05	Baja	505.80	4.04E+00	99.201%
1.00E+06	Baja	505.80	4.27E+00	99.155%
5.00E+05	Media	2245.80	2.12E+01	99.055%
7.50E+05	Media	2245.80	2.13E+01	99.053%
1.00E+06	Media	2245.80	2.16E+01	99.037%
5.00E+05	Alta	4294.60	4.47E+01	98.959%
7.50E+05	Alta	4294.60	4.13E+01	99.039%
1.00E+06	Alta	4294.60	4.26E+01	99.008%

4.4.2.5. Efecto de la presión ΔP sobre el rechazo del soluto R_o

De manera análoga al plomo, las tasas de rechazo del soluto son superiores al 99%, por lo que el proceso de OI permite obtener aguas seguras para la remoción del manganeso con concentraciones por debajo de los límites permitidos. La figura 63 muestra este comportamiento.

Figura 63: Efecto de la presión ΔP sobre el índice de rechazo R_o



En términos generales el rechazo R_o del soluto es mayor al 99% lo que muestra un comportamiento adecuado del sistema. A diferencia del plomo, se observa que para las 3 concentraciones el rechazo del manganeso tiene una tendencia a disminuir, si bien los índices son altos, la concentración por polarización en la capa límite de la membrana se acrecentó en este metal debido a las altas concentraciones de este.

4.4.2.6. Efecto de concentración del soluto C_f sobre el J_v y el R_o

Las figuras 64 y 65 muestran el comportamiento del sistema respecto al aumento de la concentración C_f del manganeso.

Figura 64: Efecto de la concentración C_f sobre el J_v

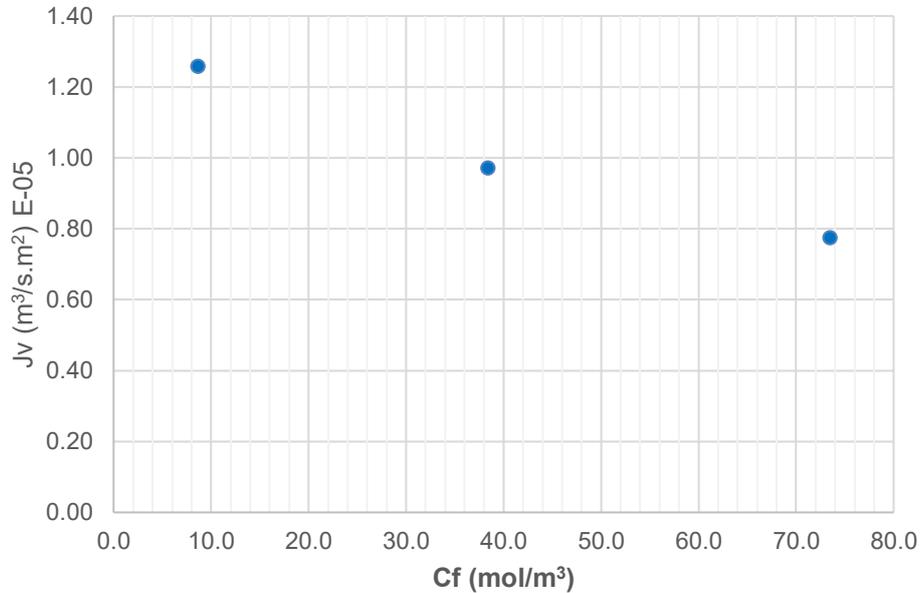
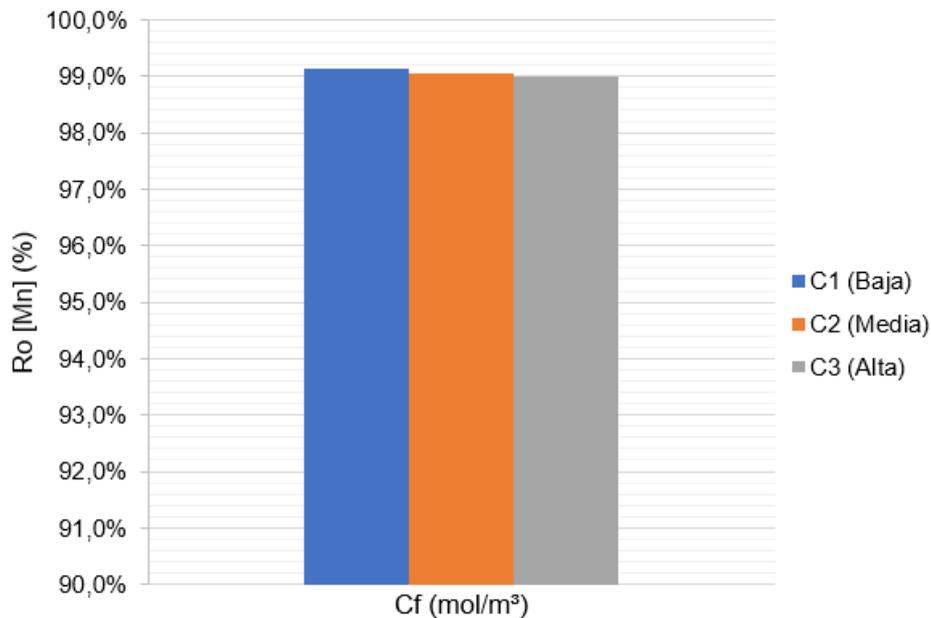


Figura 65: Efecto de la concentración C_f sobre el rechazo R_o



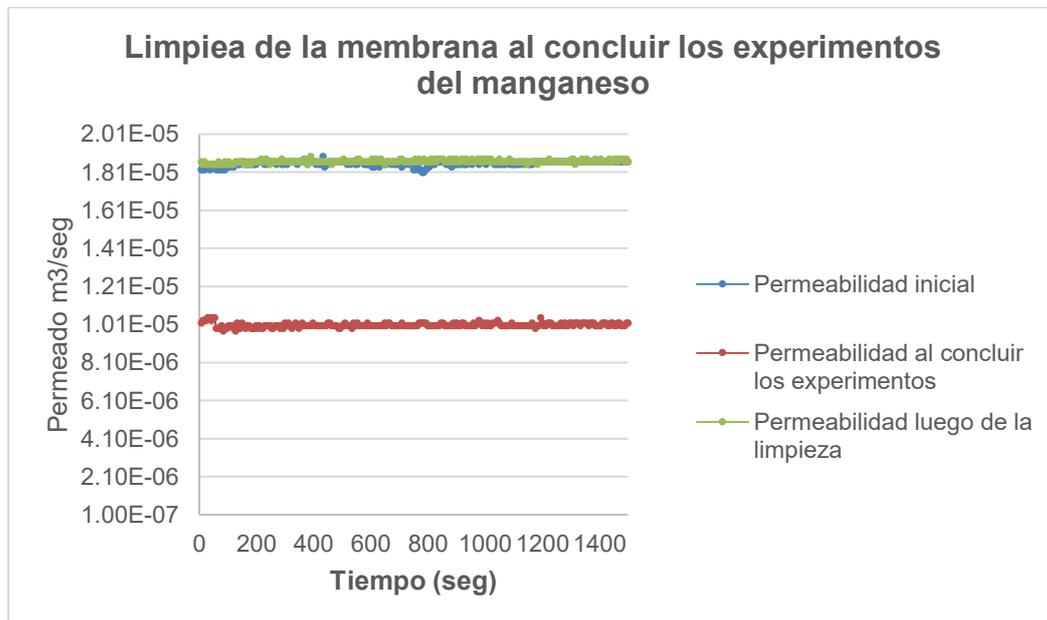
Las altas concentraciones del manganeso respecto a las que tiene el plomo muestran tendencias más claras, se observa que ante el aumento de la concentración del soluto C_f , el J_v disminuye. Esto se explica por la disminución en la transferencia de masa y la concentración de polarización cerca de la capa límite de la membrana. En la figura 64 se observa una disminución de R_o , si bien los rechazos son superiores al 99%, este

comportamiento se debe a que a medida que aumenta la concentración el proceso de CP cerca de la capa límite de la membrana produce una disminución en el rechazo del soluto.

4.4.2.7. Limpieza de las membranas luego de los experimentos con manganeso

Los resultados de la limpieza y recuperación de la membrana se muestran en la figura 66.

Figura 66: Limpieza membrana luego de experimentos del manganeso



Se observa que al finalizar los experimentos el permeado cae hasta un 54%. Al finalizar los 3 ciclos de limpieza con agua destilada la membrana recupera hasta cerca el 100% del permeado, al igual que en el caso del plomo no ha sido necesario utilizar ácido cítrico en el proceso.

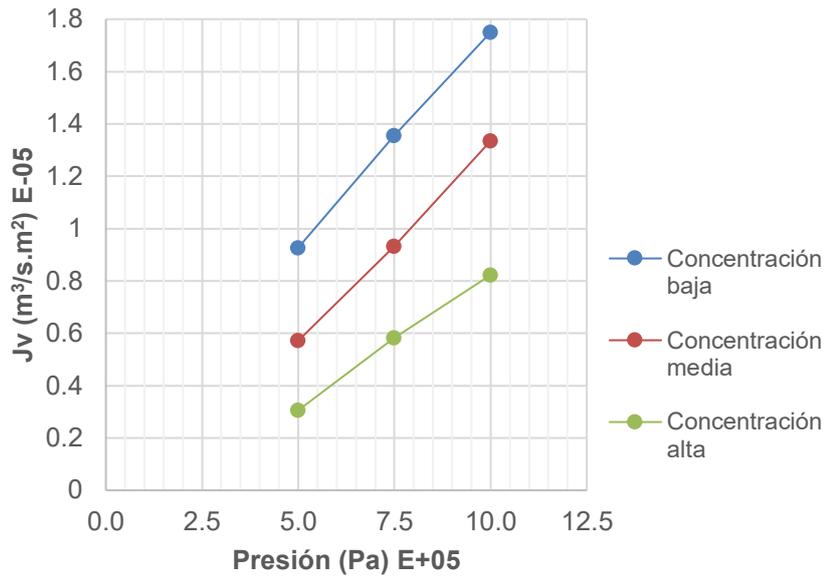
4.4.3. Análisis y evaluación del hierro.

Para el caso del hierro los resultados son los siguientes.

4.4.3.1. Evaluación del comportamiento del Flux

El comportamiento del flux para cada nivel de concentración del hierro luego de las diferentes corridas experimentales se muestra en la figura 67.

Figura 67: Comportamiento del J_v respecto a la presión ΔP

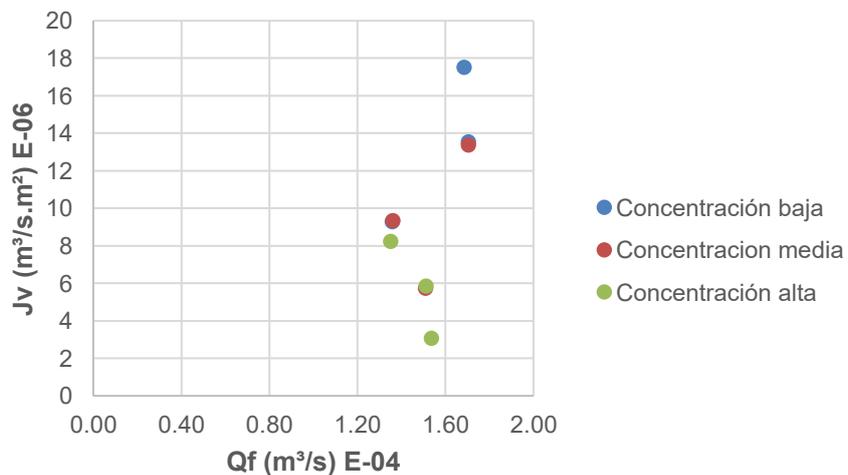


Análogamente al plomo y manganeso, el comportamiento de separación del hierro y el J_v es el esperado para un proceso de OI. Se puede evidenciar que con bajas concentraciones el flux muestra resultados y tendencias similares en los 3 metales, sin embargo, con medias y altas concentraciones el flux decae para el hierro respecto a los otros metales de manera significativa. Esto, debido a la dificultad en el proceso de transferencia de masa cerca de la superficie de la membrana que se manifiesta con mayor grado para el hierro. La tabla resumen de los resultados experimentales se encuentra en el anexo 2.14.

4.4.3.2. Efecto del Flujo de alimento Q_f en el J_v

Considerando los caudales de alimentación, el comportamiento del flux se muestra en la figura 68.

Figura 68: Comportamiento del J_v respecto a la variación de Q_f



En el caso del hierro, el comportamiento del flux en concentraciones bajas es similar al plomo y manganeso, pero muestra una mayor caída del flux con concentraciones altas, esto ratifica el fenómeno de concentración del soluto cerca de la capa límite de la membrana originando una menor transferencia de masa.

4.4.3.3. Evaluación de la remoción de sales mediante análisis de conductividad.

El análisis por conductividad se muestra en las tablas 50, 51 y 52:

Tabla 50: Análisis del rechazo de sales por conductividad del hierro para la concentración baja

Muestra	Tiempo de toma (operación)	Conductividad (us/cm) – permeado	Ph	Conductividad en el ingreso (60 litros) – us/cm	Conductividad en el permeado (us/cm)	% de remoción	Presión (Pas)	Nivel de Caudal
1	30	9.6	6.02	971	961.45	99.02%	5E05	bajo
2	30	9.3	5.37	971	961.68	99.04%	7.5E05	medio
3	30	8.9	5.49	971	962.08	99.08%	10E05	alto

Tabla 51: Análisis del rechazo de sales por conductividad del hierro para la concentración media

Muestra	Tiempo de toma (operación)	Conductividad (us/cm) – permeado	Ph	Conductividad en el ingreso (60 litros) – us/cm	Conductividad en el permeado (us/cm)	% de remoción	Presión (Pas)	Nivel de Caudal
1	30	48	4.47	5030	4982	99.05%	5E05	bajo
2	30	49.9	4.61	5030	4980.1	99.01%	7.5E05	medio
3	30	49.6	4.41	5030	4980.4	99.01%	10E05	alto

Tabla 52: Análisis del rechazo de sales por conductividad del hierro para la concentración alta

Muestra	Tiempo de toma (operación)	Conductividad (us/cm) – permeado	Ph	Conductividad en el ingreso (60 litros) – us/cm	Conductividad en el permeado (us/cm)	% de remoción	Presión (Pas)	Nivel de Caudal
1	20	125	4.04	9650	9525	98.70%	5E05	alto
2	20	105.4	3.94	9650	9544.6	98.91%	7.5E05	medio
3	20	112.5	3.84	9650	9537.5	98.83%	10E05	bajo

El hierro muestra un comportamiento similar al plomo y manganeso para las primeras concentraciones, sin embargo, para la concentración más alta el rechazo se encuentra cerca del 99%.

4.4.3.4. Evaluación del índice de remoción del Fe, mediante analítica química.

Los resultados de las concentraciones del He y NaCl mediante analítica se detallan en la tabla 53 y 54.

Tabla 53: Analíticas del hierro

Nivel y Presión de trabajo (Pa) E+05	HIERRO			
	Ingreso/analítica (mg/l)	Permeado/analítica (mg/l)	Permitido/norma (mg/l)	Rechazo %
C1-5	9.95E+00	2.43E-04	0.2	99.998%
C1-7.5	1.02E+01	1.16E-03	0.2	99.989%
C1-10	9.95E+00	4.19E-04	0.2	99.996%
C2-5	4.75E+01	7.86E-03	0.2	99.983%
C2-7.5	4.90E+01	3.95E-03	0.2	99.992%
C2-10	4.79E+01	4.00E-03	0.2	99.992%
C3-5	7.81E+01	5.09E-04	0.2	99.999%
C3-7.5	7.77E+01	1.66E-03	0.2	99.998%
C3-10	8.13E+01	1.13E-03	0.2	99.999%

Los resultados muestran que en general el nivel de rechazo del metal es óptimo con porcentajes superiores al 99% en la mayoría de los casos.

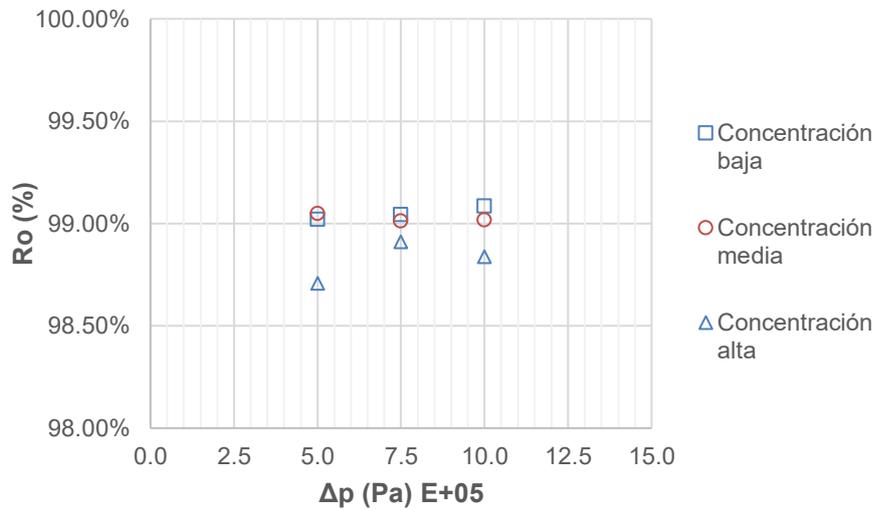
Tabla 54: Analíticas del NaCl en combinación con el hierro

Presión (Pas)	Concentración	HIERRO		
		Ingreso/analítica (mg/l)	Permeado/analítica (mg/l)	Rechazo %
5.00E+05	Baja	478.22	4.70E+00	99.016%
7.50E+05	Baja	478.22	4.59E+00	99.040%
1.00E+06	Baja	478.22	4.39E+00	99.081%
5.00E+05	Media	2477.28	2.36E+01	99.046%
7.50E+05	Media	2477.28	2.46E+01	99.008%
1.00E+06	Media	2477.28	2.44E+01	99.014%
5.00E+05	Alta	4752.63	6.16E+01	98.705%
7.50E+05	Alta	4752.63	5.19E+01	98.908%
1.00E+06	Alta	4752.63	5.54E+01	98.834%

4.4.3.5. Efecto de la presión ΔP sobre el rechazo del soluto Ro

La figura 69 muestra el comportamiento del rechazo del soluto a distintas presiones de operación.

Figura 69: Efecto de la presión ΔP sobre el índice de rechazo R_o



El rechazo del soluto de hierro muestra índices de R_o mayores al 98%. Tiene un comportamiento similar en los niveles bajos y medios, sin embargo, nuevamente se puede apreciar que para los niveles altos de concentración el rechazo disminuye por efecto de la concentración en la capa límite de la membrana.

4.4.3.6. Efecto de concentración del soluto C_f sobre el J_v y el rechazo R_o

Las figuras 70 y 71 ilustra el comportamiento del rechazo y el flux ante el aumento de la concentración de hierro.

Figura 70: Efecto de la concentración C_f sobre el J_v

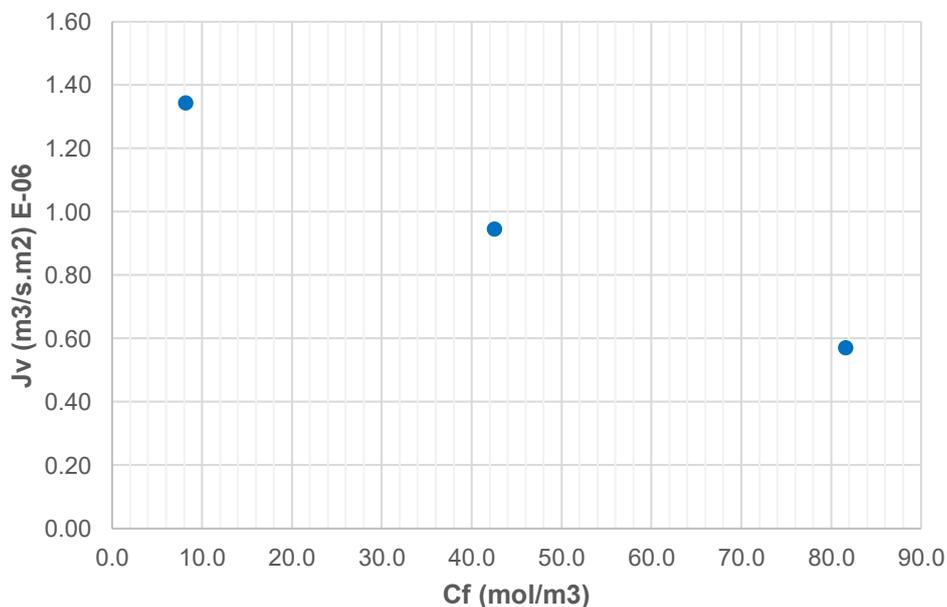
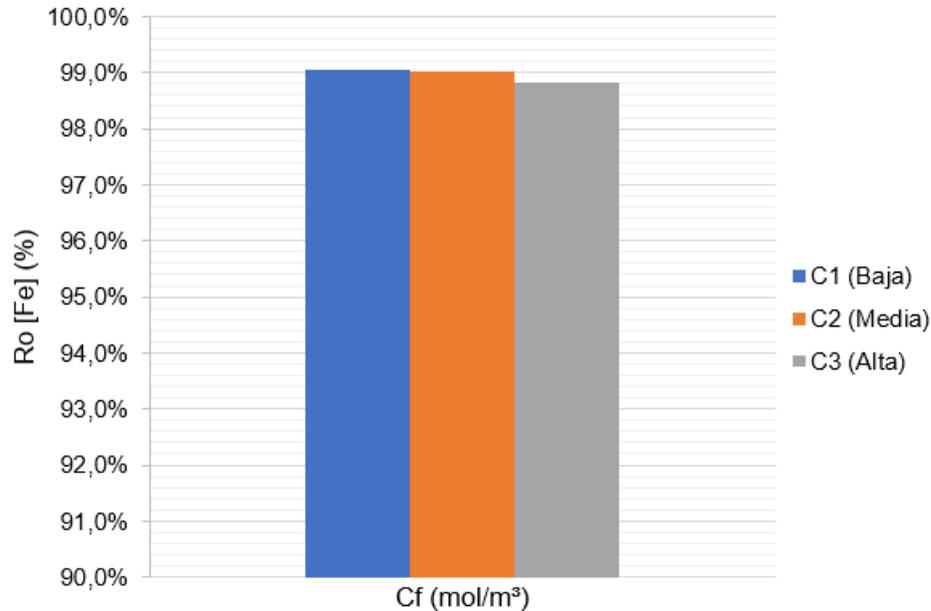


Figura 71: Efecto de la concentración C_f sobre el rechazo R_o

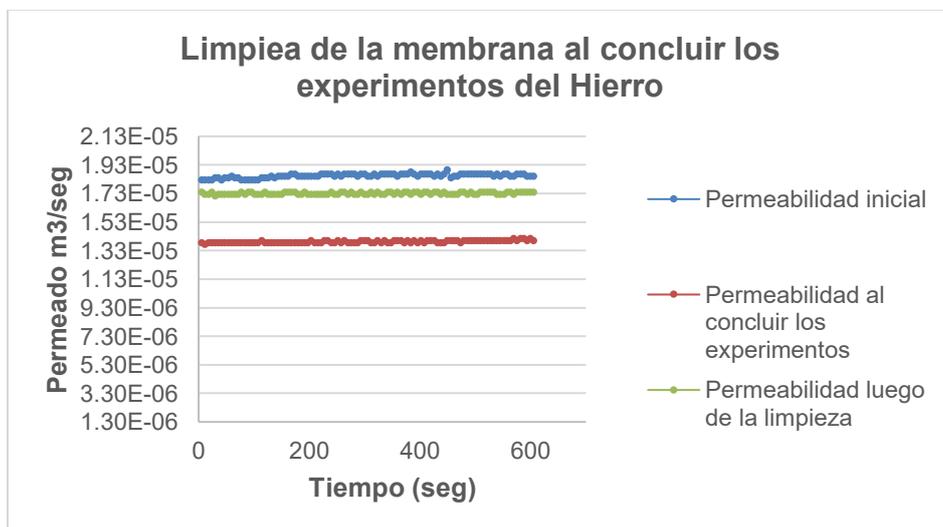


Las concentraciones de hierro son las más altas de los tres metales analizados, esto genera que el flux a mayores concentraciones muestra caídas mayores, sin embargo, los rechazos permanecen con tasas mayores al 98%. Esto, ratifica que en la medida que aumenta la concentración decae la transferencia de masa y aumenta la concentración en la capa límite de la membrana generando la concentración por polarización.

4.4.3.7 Limpieza de las membranas luego de los experimentos con hierro

Los resultados de la limpieza al concluir con los experimentos con el hierro se muestran en la figura 72.

Figura 72: Limpieza membrana luego de experimentos del hierro



El ensuciamiento de la membrana luego de trabajar con el hierro muestra un comportamiento diferente al plomo y manganeso, luego de concluir con los experimentos el permeado disminuye en un 25%, sin embargo, la limpieza ha requerido la utilización de ácido cítrico en el tercer ciclo de limpieza, logrando recuperar la permeabilidad hasta un 94%.

En el anexo 2.15 se detallan los resultados de las analíticas realizadas a las muestras obtenidas durante el proceso de separación de los metales del permeado y concentrado para el Pb, Mn y He.

4.4.4. Validación del modelo CP

En los siguientes apartados se detalla la simulación y validación del modelo (Villena, et al. 2022b).

4.4.4.1. Características de la membrana y su operación

Como se indicó, la membrana utilizada en el proyecto es de configuración en espiral compuesta de poliamida modelo ULP-2540 marca KeenSem de procedencia China, la tabla 55 detalla las características técnicas de la misma, en el anexo 2.16 se adjunta la ficha técnica de la membrana.

Tabla 55: Características de la membrana

Tipo	Modelo	Características
Propiedades	ULP-2540	
	Composición	Poliamida
	Capacidad de permeado (m ³ /día)	2.84
	Área efectiva de la membrana (m ²)	2.5
	Índice de recuperación (%)	8
	Espesor efectivo de la membrana (µm)	0.25
	Diámetro de poro de la membrana (µm)	<0.002
Condiciones de uso	Presión máxima (Mpa)	4.14
	Máxima temperatura (°C)	45
	Flujo máximo (m ³ /hr)	1.4

Fuente: Características del proveedor

El funcionamiento de la planta piloto consiste en un tanque de almacenamiento del agua sintética conectado a una bomba de alimentación con una válvula para regular el ingreso al sistema. La membrana dispone de un manómetro al ingreso y otro a la salida del concentrado que permiten la verificación de las presiones de trabajo. Se tiene una válvula tipo aguja a la salida del concentrado para regular el caudal de ingreso y dos sensores de flujo para la medición de los caudales con pulsos cada 6 segundos. La bomba tiene además un regulador de frecuencia para la manipulación de las presiones, a la salida del permeado y concentrado se dispone de mangueras para la toma de muestras.

4.4.4.2. Alimentación del agua sintética

Las soluciones (aguas sintéticas) fueron transferidas a la planta piloto desde el tanque de alimentación mediante la bomba de alimentación y un sistema cerrado. Luego de iniciado el experimento con duraciones aproximadas de 30 minutos por corrida experimental, se tomaron muestras del permeado y concentrado en cantidades de 100 ml cada muestra. Las muestras se sometieron a analíticas para evaluar el efecto de separación de los metales en el sistema a través de dos procesos, el primero por conductividad y el segundo utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica.

4.4.4.3. Cálculo de parámetros no lineales

Para el proceso de validación del modelo ha sido necesario primeramente estimar el coeficiente de reflexión σ mediante ajuste de curvas utilizando la aplicación curve fitting del matlab. La tabla 56 detalla los coeficientes encontrados para cada metal y concentración:

Tabla 56: Coeficiente de reflexión " σ "

Metales	Concentración	σ
plomo	Baja	0.9900
	Media	0.9917
	Alta	0.9921
manganeso	Baja	0.9905
	Media	0.9908
	Alta	0.9893
hierro	Baja	0.9900
	Media	0.9907
	Alta	0.9868

El cálculo de los parámetros no lineales como la constante de permeabilidad hidráulica L_p y el coeficiente de transferencia de masa k se muestran en la tabla 57. Estos, para las distintas combinaciones y concentraciones del Metal+NaCl.

Tabla 57: Parámetros no lineales del modelo

Metales	Concentración	σ	L_p ($m^3/s.m^2.Pa$)	K (m/s)
plomo	Baja	0.9900	1.865E-11	1.15E-05
	Media	0.9917	1.6976E-11	51.56E-04
	Alta	0.9921	1.5528E-11	69.45E-04
manganeso	Baja	0.9905	1.8162E-11	1.52E-05
	Media	0.9908	1.5059E-11	67.36E-04
	Alta	0.9893	1.1144E-11	68.14E-04
hierro	Baja	0.9900	2.0376E-11	1.04E-05
	Media	0.9907	1.4697E-11	30.96E-04
	Alta	0.9868	1.1668E-11	2.13E-05

4.4.4.4. Curvas de validación: comportamiento del flux experimental vs. Flux teórico

Con los parámetros obtenidos en la tabla anterior y combinándolos con la ecuación 55 se calculó el J_v (valor teórico). Los resultados entre el J_v teórico y el J_v experimental se muestran en los siguientes apartados

4.4.4.4.1. Validación del modelo para el plomo

Las figuras 73-74-75, muestran la validación del modelo comparando el comportamiento flux experimental respecto al teórico, en los anexos 2.17, 2.18 y 2.19 se encuentran los scripts del matlab para el cálculo de los parámetros y del J_v teórico.

Figura 73: Flux Teórico vs Flux Experimental del Pb: concentración baja

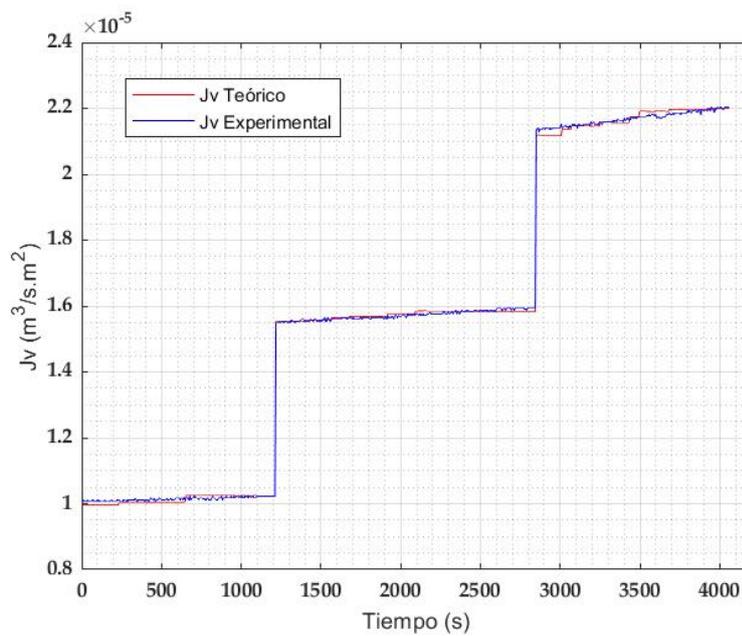


Figura 74: Flux Teórico vs Flux Experimental del Pb: concentración media

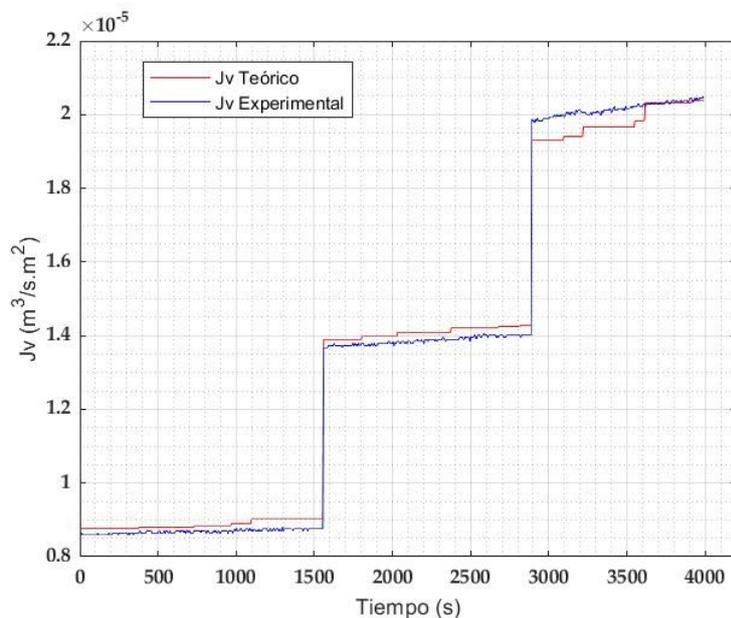
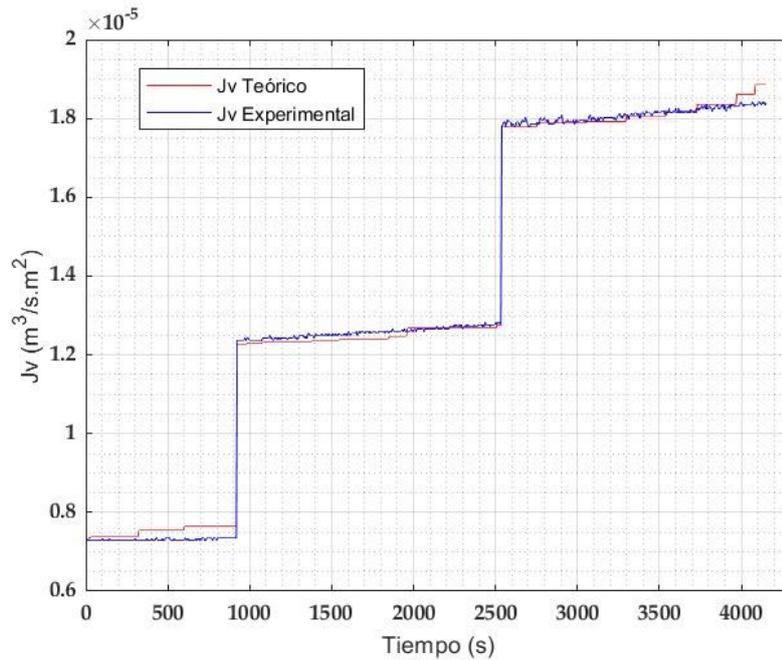


Figura 75: Flux Teórico vs Flux Experimental del Pb: concentración alta



El modelo muestra un ajuste adecuado para el comportamiento del plomo. Las máximas diferencias entre los valores teóricos y experimentales son del 3.0% y 5.4% que se generan en las concentraciones media y alta, lo cual es normal en el efecto de Concentración-Polarización, considerando que los flujos disminuyen cuando las concentraciones aumentan. Esto, debido a la concentración del soluto en la capa cercana a la membrana.

4.4.4.2. Validación del modelo para el manganeso

Las figuras 76-77-78, muestran la validación del modelo comparando el comportamiento flux experimental respecto al teórico, en los anexos 2.20, 2.21 y 2.22 se encuentran los scripts del matlab para el cálculo de los parámetros y del J_v teórico.

Figura 76: Flux Teórico vs Flux Experimental del Mn: concentración baja

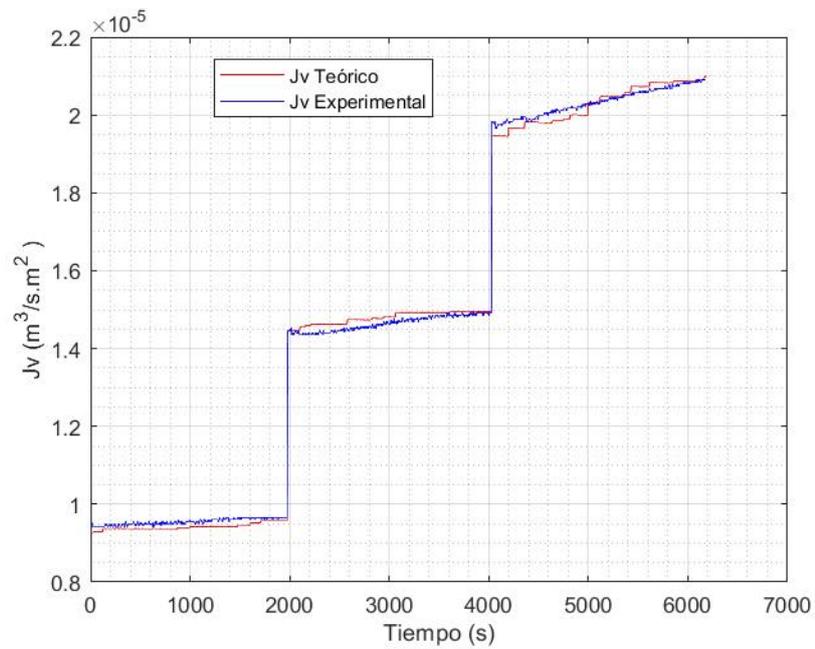


Figura 77: Flux Teórico vs Flux Experimental del Mn: concentración media

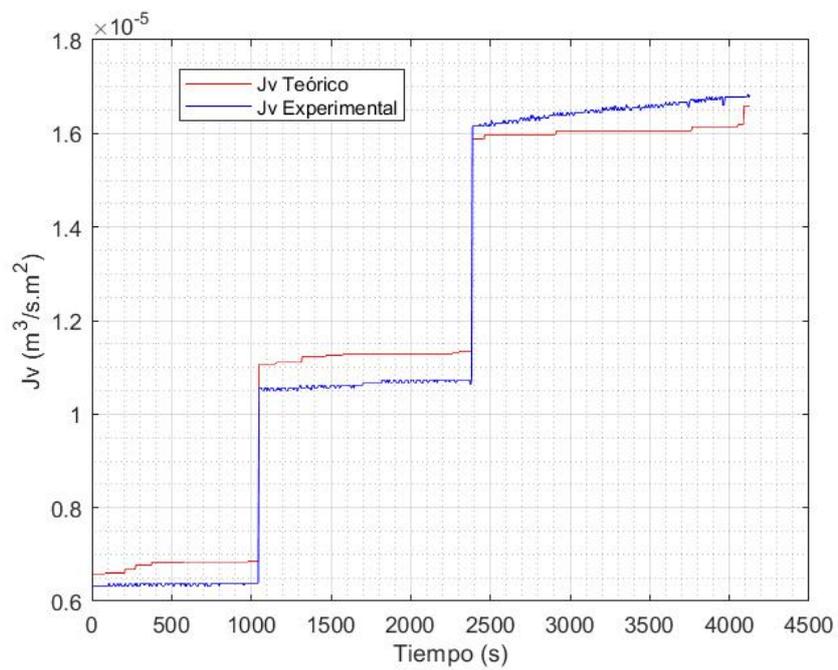
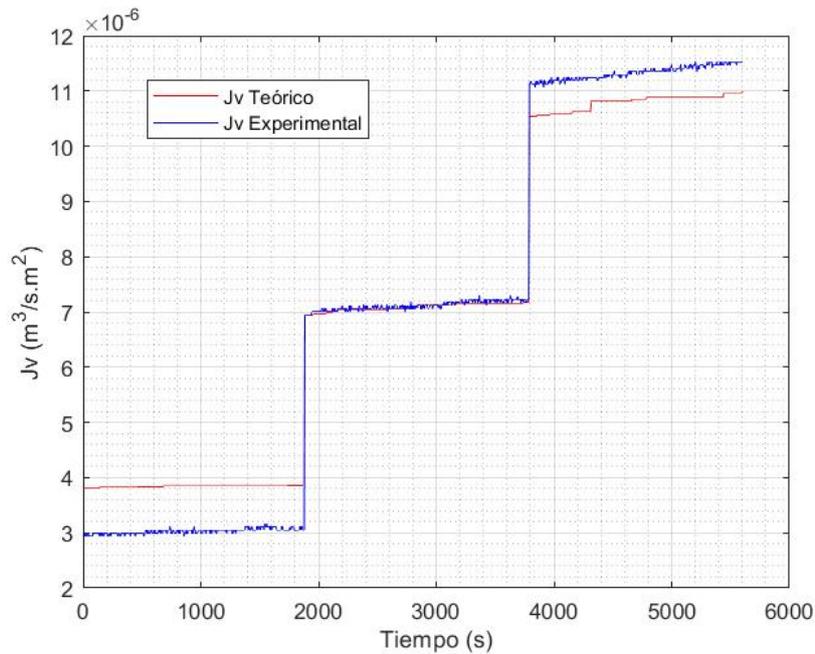


Figura 78: Flux Teórico vs Flux Experimental del Mn: concentración alta



Para el caso del manganeso, el modelo muestra un ajuste adecuado, donde los mayores errores se muestran en las concentraciones media y alta con un 18% de diferencia a bajas presiones.

4.4.4.2. Validación del modelo para el hierro

Las figuras 79-80-81, muestran la validación del modelo comparando el comportamiento flux experimental respecto al teórico, en los anexos 2.23, 2.24 y 2.25 se encuentran los scripts del matlab para el cálculo de los parámetros y del J_v teórico.

Figura 79: Flux Teórico vs Flux Experimental del Fe: concentración baja

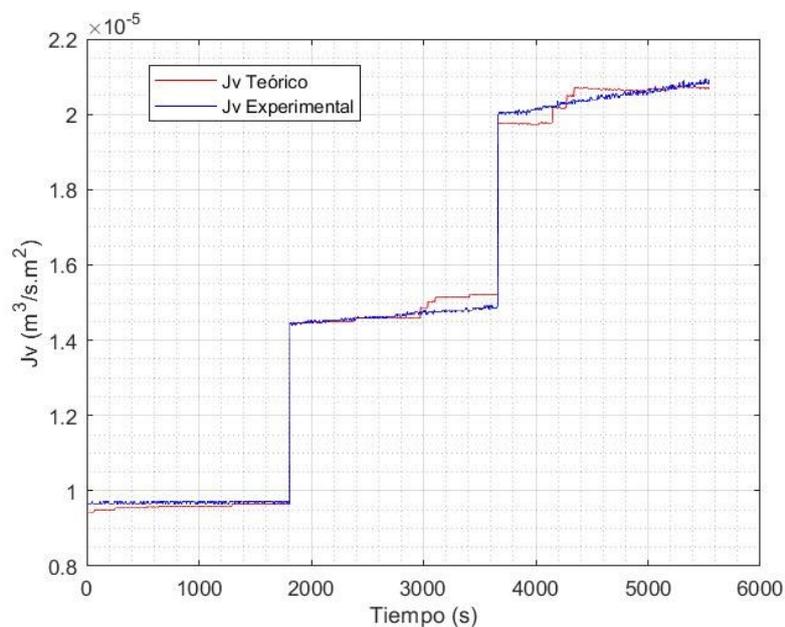


Figura 80: Flux Teórico vs Flux Experimental del Fe: concentración media

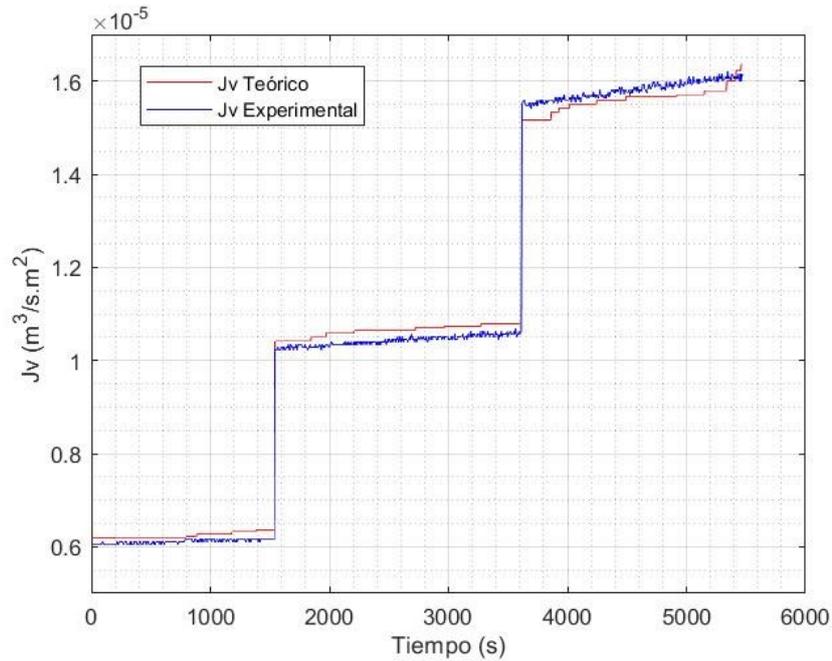
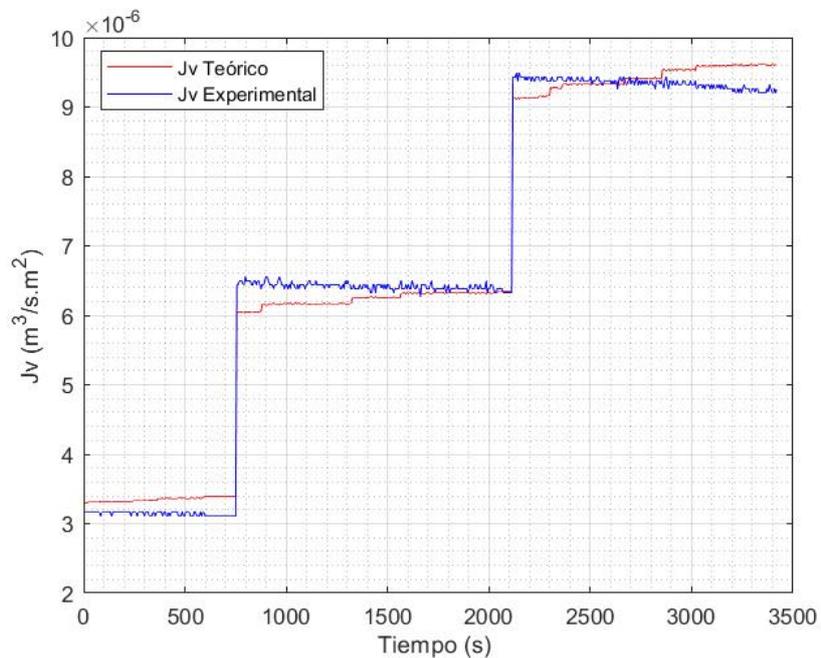


Figura 81: Flux Teórico vs Flux Experimental del Fe: concentración alta



De manera similar al plomo y manganeso el modelo para el hierro muestra un ajuste adecuado, siendo la concentración alta la que mayor diferencia muestra en el comportamiento, con diferencias máximas del 7.6% en presiones medias.

4.5. Análisis de las partes interesadas en la alta cuenca del Guadalquivir

El análisis de las partes interesadas que se presenta en esta investigación se desarrolló en el marco de la participación ciudadana en la gestión del agua de la alta cuenca del Guadalquivir de la ciudad de Tarija, Bolivia. Tiene como propósito el facilitar la participación

pública en la gestión del agua, siguiendo las sugerencias y metodologías planteadas por los diferentes autores.

Bajo las metodologías y enfoques desarrollados anteriormente, se presentan los resultados del análisis cualitativo y cuantitativo de las partes interesadas.

4.5.1. Análisis Cualitativo

4.5.1.1. Identificación de los principales problemas en la cuenca y matriz de suposiciones

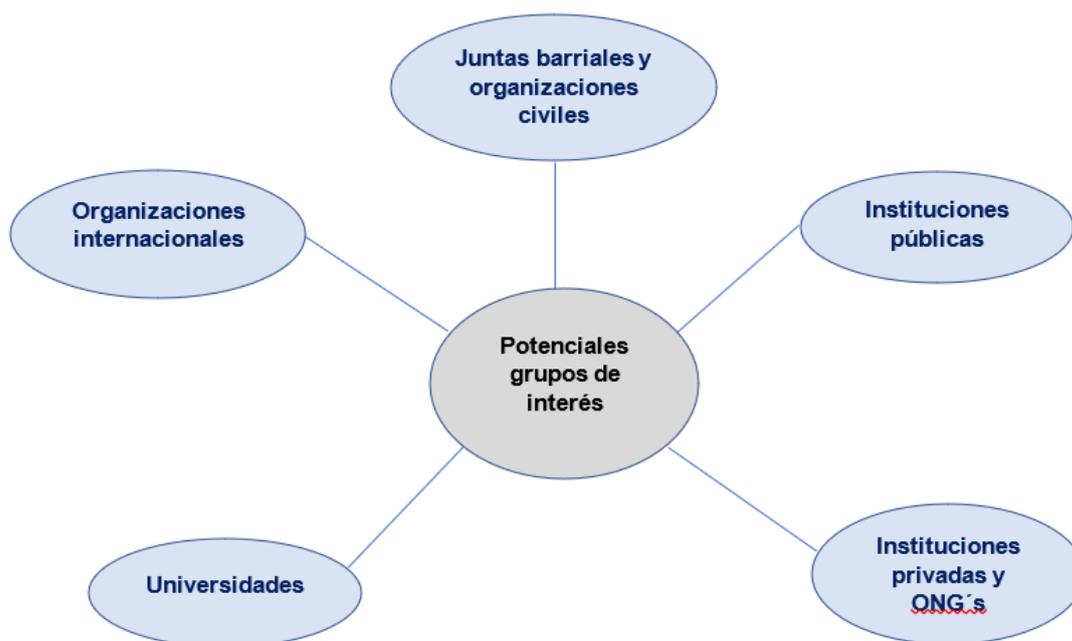
Los principales temas que abordan la calidad y cantidad de agua en el área de estudio fueron identificados por funcionarios expertos en el sector del agua y académicos de las universidades locales de Tarija. La tabla 58 muestra los principales problemas y políticas que permitirían solucionarlos.

Tabla 58: Principales problemas y políticas en el área de estudio

Problemas	Políticas	Observaciones
Contaminación de fuentes de agua	Regulaciones locales de control	Las principales fuentes superficiales tienen altas sospechas de contaminación por metales pesados
Paralización de fuentes de agua	Nuevas tecnologías de purificación de agua	La eliminación de los metales pesados requiere tecnologías más efectivas como el tratamiento con membranas – Ósmosis Inversa
Desinformación	Diseño de estrategias de comunicación para el manejo del agua	La falta de información técnica impide la implementación de nuevos proyectos
Infraestructura antigua y obsoleta	Mejora y construcción de nueva infraestructura del sector agua y saneamiento	La infraestructura actual está obsoleta y, por lo tanto, es ineficiente.
Interferencia política	Estrategias y vínculos entre las partes interesadas	Las disputas políticas truncan la posibilidad de nuevos proyectos
Salud pública	Prevención en el consumo de agua	Mejorar los sistemas de desinfección en origen y las políticas preventivas

A partir de la identificación de los principales problemas se construye el árbol de suposiciones propuesto en la metodología ABASS de Baccar et al., (2021). Se pueden extraer los principales efectos que provoca el proceso de contaminación del agua, a través de cadenas causales se visualizan los productos que tienen consecuencias negativas. Además, se

Figura 83: Principales grupos de interés



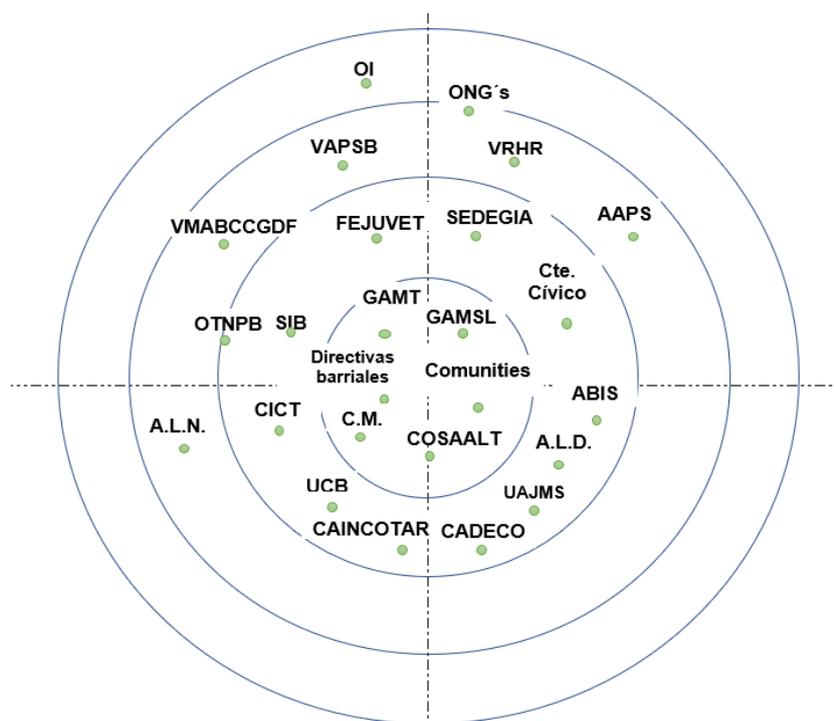
Se observa que unos de los grupos más importantes son las juntas vecinales y sus autoridades que representan a los distintos barrios de la ciudad. Las instancias públicas se caracterizan por los niveles estatal, nacional, departamental y local o municipal. Al mismo tiempo, las universidades y entidades privadas juegan un papel técnico en las decisiones. Los organismos internacionales son esenciales en la financiación de proyectos. Las ONG's son organizaciones que tienen una participación en el sector.

4.5.1.3. Identificación de las partes interesadas e involucradas en la gestión del agua en Tarija

Para el análisis de los principales involucrados en la gestión y manejo del agua, se consideró la normativa legal vigente en Bolivia. Se identificaron las instituciones que participan en la gestión del agua en Tarija y, la experiencia obtenida durante estas últimas décadas. Por otro lado, se consideraron también las distintas instituciones públicas y privadas, así como organizaciones sociales, cívicas, personas particulares y profesionales, que tienen una participación activa en la toma de decisiones en proyectos de agua y saneamiento.

Bajo el enfoque de la EC, (2003) y Lupo, P. (2009) , las partes interesadas identificadas han sido ordenadas siguiendo el mapa de órbitas de interés desde el punto de vista nacional, departamental, local e internacional. La figura 84 muestra la identificación de las siguientes instancias.

Figura 84: Identificación de las partes interesadas mediante el enfoque de órbitas de participación



La gráfica permite identificar grupos de partes interesadas según el ámbito geográfico de participación.

- a) Nivel Nacional: En el marco de la Constitución Política del Estado y las leyes que rigen el manejo del agua en Bolivia, las instituciones nacionales encargadas de la regulación y preservación del agua son.
 - La Asamblea Legislativa Plurinacional: cuya tuición de dictar leyes nacionales pueden jugar un rol fundamental en ciertas legislaciones del proyecto: A.L.N.
 - Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA) del cual forma parte los siguientes Viceministerios que tienen intervención en el proyecto.
 - Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico: VAPSB.
 - Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego: VRHR.
 - Viceministerio de Medio Ambiente Biodiversidad Cambio Climático y de Gestión de Desarrollo Forestal: VMABCCGDF.
 - Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico: AAPS.
 - La Oficina Técnica Nacional para los ríos Pilcomayo y Bermejo – OTNPB, es una instancia nacional que opera únicamente en Tarija. Se encarga de la gestión de las

cuencas internacionales del Bermejo donde forma parte el Guadalquivir, sin embargo, puede ser identificada también como una instancia departamental.

b) Nivel Departamental.

- La Asamblea Legislativa Departamental, que puede generar normas departamentales en torno al proyecto. A.L.D.
- Gobierno Autónomo Departamental de Tarija a través del Servicio Departamental de Gestión Integral del Agua – SEDEGIA.
- Instituciones de educación superior que desarrollan proyectos académicos de investigación en el marco de la gestión del agua en la cuenca del Guadalquivir.
 - La Universidad Autónoma Juan Misael Saracho: UAJMS
 - Universidad Católica Boliviana: UCB
- Federación de Juntas Vecinales de Tarija – FEDJUVE.
- Cámara de la construcción de Tarija: CADECO.
- Cámara de industria y Comercio: CAINCOTAR.
- Comité Cívico de Tarija y San Lorenzo: Cte. Cívico.
- La Sociedad de Ingenieros de Bolivia: SIB.
- Los colegios profesionales del área como.
 - Colegio de Ingenieros Civiles: CICT
 - Asociación Boliviana de Ingeniería Sanitaria: ABIS.

c) Nivel Local o Municipal.

- Los Consejos Municipales, que regulan y norman en el ámbito local y municipal: C.M.
- Gobiernos Autónomos Municipales de Tarija y San Lorenzo: GAMT y GAMSL.
- Empresas o entidades Operadoras del servicios de agua y saneamiento.

Para el Municipio de Tarija es la Cooperativa de Servicios de Agua y Alcantarillado de Tarija [COSAALT.

Para el Municipio de San Lorenzo se encuentran los Operadores en forma de Comités de Agua y Alcantarillado en San Lorenzo o el propio municipio que a través de una instancia municipal realizan la administración del servicio: Adm. SL

Instancias de control social legalmente constituidas como las; Directivas barriales, Presidentes de Barrio.

Comunidades campesinas.

Organismos internacionales de apoyo y financiamiento externo: BID, BM, SNV, etc.: O.I.

ONG's, que operan en Bolivia y en el departamento. Existen ONG's que solo trabajan en el departamento, estas operan con recursos internacionales por lo que son consideradas como organismos internacionales. También pueden ser identificadas como instancias departamentales.

4.5.1.4. Clasificación de las partes interesadas en la gestión del agua en Tarija

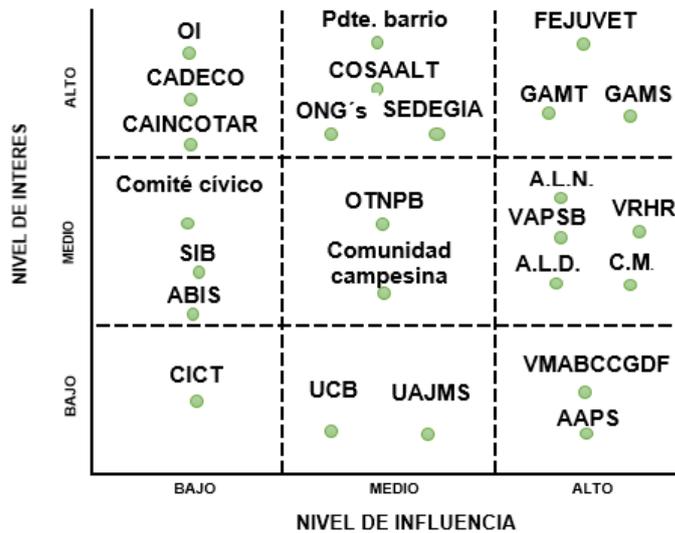
El Ministerio de Medio Ambiente, Gobierno Departamental y Gobiernos Municipales a través de sus distintas reparticiones son consideradas como actores decisivos. Sin embargo, a partir de los debates sociales suscitados en los últimos años en el departamento de Tarija se identificaron otras instancias importantes que juegan un rol decisivo en la gestión del agua, tal es el caso de las juntas vecinales, comité cívico, ONG's, Organismos Internacionales, etc.

Las sociedades y colegios profesionales, universidades tienen una participación técnica y académico importante en el desarrollo y ejecución de los proyectos. Las cooperativas o entidades prestadoras de servicios tienen el mayor grado de interés, pero al tener un carácter privado su influencia en la ejecución tiene un nivel medio.

Por su lado, las cámaras de la construcción o de industrias si bien no tienen una alta influencia en la toma de decisiones, tienen un alto interés comercial.

En base a las metodologías de identificación se clasificaron las partes interesadas a partir del grado de interés e influencia en el proyecto. La figura 85 detalla la matriz de identificación de las partes interesadas en función al nivel mínimo, medio y máximo de influencia e interés.

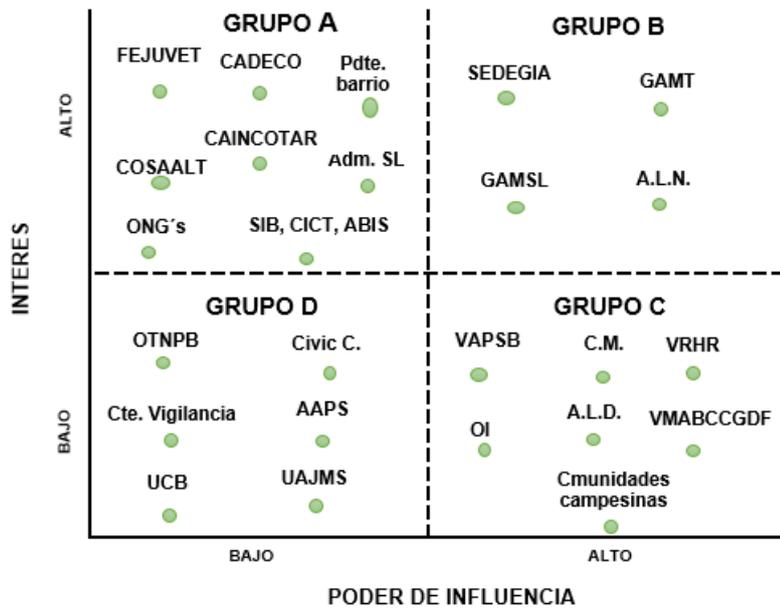
Figura 85: Identificación y clasificación de las partes interesadas por nivel de interés e influencia



Se identifican 9 grupos de interés, la FEJUVE y los gobiernos municipales de Tarija y San Lorenzo, con una mayor influencia e interés en el proyecto. Los viceministerios y las asambleas legislativas nacional, departamental y local, tienen una influencia alta, pero no tienen un mayor interés particular en el proyecto. Mientras que las sociedades civiles como los colegios profesionales, el comité cívico e instancias privadas como las cámaras de comercio y construcción son las que menos influencia tienen, pero muestran un alto interés comercial en el proyecto. En un nivel medio está COSAALT, el SEDEGIA y ONG's, la OTNPB comunidades campesinas, que muestran un alto interés en el proyecto, pero la influencia en el mismo es media. Las Universidades juegan un rol asesor técnico cuya participación es esporádica.

En función a los niveles de interés e influencia, es necesario reagrupar las partes interesadas considerando el grado de poder o importancia legal, económica y política ejecución del proyecto y el grado de interés en que se desarrolle el mismo. La figura 86, muestra esta clasificación distribuida en los 4 grupos de interés.

Figura 86: Matriz de Clasificación por interés y poder de las partes interesadas



Identificadas, se clasifican en 4 grupos de acuerdo con el poder e interés en el proyecto. En el grupo A se ubican las instancias privadas como la CADECO, CAINCOTAR, los colegios profesionales y ONG's que no tienen ningún poder de decisión en el proyecto, pero un alto interés comercial en los mismo. COSAALT, La FEDJUVE y los barrios, tienen un interés importante en la ejecución del proyecto, pero el nivel de poder es relativamente bajo.

El grupo B, formado por los gobiernos municipales y la gobernación, muestran un alto poder de decisión e interés. El grupo C conformado por los Viceministerios del área y las comunidades campesinas donde se encuentran las fuentes de agua, no muestran alto interés, pero el poder de decisión es alto.

Finalmente tenemos el grupo D, cuyo interés y poder es bajo, esto debido a que principalmente están conformados por instancias académicas y reguladoras.

La tabla 59 clasifica a las partes interesadas en función a escalas de atributos de acuerdo con el poder, legitimidad, urgencia y proximidad al proyecto.

Tabla 59: Clasificación de las partes interesadas a partir de atributos y escalas

Parte interesadas	Poder	Legitimidad	Urgencia	Proximidad	Escala final	Clasificación	Intervención
VRHR	4.5	3.5	3.5	3.5	4	Definitiva	Colabora
VMACCGD	4	3.5	3.5	2	3	Expectante	Pensamiento
VMPSB	4	3.5	3.5	2	3	Expectante	Pensamiento
SEDEGIA	4	4	4	4	4	Definitiva	Colabora
GAMT	4	3.5	4	4	4	Definitiva	Colabora
GAMS L	3.5	3.5	4	4	4	Definitiva	Colabora
AAPS	1	3	0	1	1	Latente	Pensamiento
FEJUVET	3.5	3.5	3.5	3.5	4	Definitiva	Colabora
BARRIOS	3.5	4.5	5	5	4	Definitiva	Colabora
COSAALT	2	3.5	5	4	3	Expectante	Conocimiento
ONG's	0	2	3	2	1	Latente	Pensamiento
OI	1	3	3	1	2	Latente	Pensamiento

Parte interesadas	Poder	Legitimidad	Urgencia	Proximidad	Escala final	Clasificación	Intervención
C. CIVICO	1	3	2	2	1	Latente	Pensamiento
UCB	0	3.5	1	1	1	Latente	Pensamiento
UAJMS	0	3.5	1	1	1	Latente	Pensamiento
SIB	0	3	1	1	1	Latente	Pensamiento
CICT	0	3	1	1	1	Latente	Pensamiento
ABIS	0	3	1	1	1	Latente	Pensamiento
OTNPB	1	3	3	2.5	2	Latente	Pensamiento
C. CAMP.	3.5	3.5	4	5	4	Definitiva	Conocimiento
CADECO	0	1	5	2	1	Latente	Pensamiento
CAINCOT	0	1	5	2	1	Latente	Pensamiento
A.L.N.	5	5	3	3	4	Definitiva	Colabora
A.L.D.	5	5	3	3	4	Definitiva	Colabora
C.M.	5	5	3	3	4	Definitiva	Colabora

Los atributos de cada parte interesadas que se detallan en la tabla permiten establecer 3 grandes grupos de intervención y participación en el proyecto.

Las instancias ejecutivas como los viceministerios, municipios y gobernación tienen una participación definitiva en el proyecto y una intervención colaborativa. Las instancias legislativas a nivel nacional, departamental y local deben participar activa y definitivamente toda vez que este tipo de proyectos pueden requerir de legislaciones especiales para su implementación. Las comunidades campesinas tienen una participación definitiva por estar ubicadas las fuentes en sus territorios, su intervención solamente es de conocimiento y no de colaboración.

En el otro grupo se encuentran otras instancias ejecutivas del nivel ejecutivo nacional como los viceministerios de medio ambiente y el de saneamiento básico que tienen una participación expectante. La cooperativa de servicios básico de Tarija, si bien es la más interesadas que el proyecto se ejecute, pero como instancia privada sólo puede tener una participación expectante.

Finalmente tenemos el tercer grupo con una participación latente como las instancias privadas y académicas y la oficina técnica cuya atribución es a nivel de macro cuenca y no puede intervenir directamente en el proyecto.

4.5.1.5. Relacionamiento entre las partes interesadas

La experiencia boliviana muestra que las diferencias políticas entre los diferentes niveles de gobierno y el empoderamiento social de las instancias de fiscalización como las federaciones de juntas vecinales, barriales, campesinas, profesionales y gremiales, etc., hace difícil la concreción de proyectos de orden social y de servicios básicos y, más aún cuando los niveles de gobierno nacional, departamental y municipal tienen lineamientos políticos contrarios. La implementación de un proyecto como el planteado en esta tesis puede tener estos problemas y generar un escenario adverso si no lo identificamos y trazamos estrategia de relacionamiento entre las distintas partes interesadas en el mismo.

Reed, et al. (2009), Gray, (1985) y Borrini-Feyerabend et al., (2007), señalan que la colaboración e interrelación entre las partes interesadas, tanto antiguas como nuevas, es aparentemente esencial para una eficaz acción. Esto, permite resolver un conjunto de problemas que ninguno puede resolver de manera individual.

En aplicación al enfoque de Reed et al. (2009), el relacionamiento de las partes interesadas con el proyecto puede ser analizado desde el punto de vista cualitativo y cuantitativo.

Para el análisis cualitativo, se realizaron entrevistas personales semiestructuradas, redes sociales e información proveniente de medios de prensa e información obtenida de instituciones públicas como la gobernación de Tarija, COSAALT, Gobiernos municipales, etc. Las entrevistas se las realizaron de manera flexible lo que ha permitido que el entrevistado pueda responder en el orden y de la manera que elijan. Se realizaron preguntas abiertas centradas en aspectos claves como los recursos hídricos en Tarija, contaminación del agua de fuentes de abastecimiento, sistemas de potabilización como la osmosis inversa y otros temas relacionados con la institucionalidad en el departamento.

Esta información ha permitido reorientar los temas y debatir sobre los impactos que genera el proyecto en la población. Asimismo, ha permitido además que las partes interesadas entrevistadas puedan identificar actores adicionales o aquellas partes interesadas que afecten o puedan ser afectadas por la ejecución del proyecto. Esto ha permitido identificar las 25 instancias como partes interesadas, clasificarlas y analizarlas.

Utilizando las metodologías descritas, se ha podido determinar las relaciones existentes y potenciales entre las diferentes partes interesadas, así como las limitaciones y distanciamiento entre ellas. Se considera el trabajo colaborativo entre las partes interesadas y la proximidad que pueda existir. Es importante señalar que muchos actores tienen preponderancia en el poder político, mientras que otras en el factor económico, sin embargo, es importante considerar la influencia profesional y técnica que juegan muchas instancias que son fundamentales en el momento de definir las metas y objetivos del proyecto.

Este análisis ha permitido determinar que partes interesadas tienen muy poca influencia en las determinaciones y que en algún momento pueden ser excluidas de la toma de decisiones.

Cuantitativamente Reed et al. (2009) señala que la combinación de los conocimientos entre las instancias políticas que regulan y formulan leyes, administrativas y ejecutivas que ejecutan las inversiones, las académicas, técnicas y profesionales que aportan con información técnica y sociales y cívicas que generan el debate social, canalizan e identifican las mejores opciones. Además, señala las formas de adaptarse, canalizar y aceptar la ejecución del proyecto, a través de regulaciones especiales, recursos específicos, diseños técnicos sostenibles y debates cívicos proactivos.

Como resultado de este proceso de entrevistas y análisis de la información, se logró identificar 25 instancias u organizaciones interesadas en el proyecto y permitió caracterizar en 4 grupos de partes interesadas y como se relacionan unas con otras, considerando la influencia, poder e interés en el proyecto.

La tabla 60, destaca este trabajo de interrelación entre las partes interesadas que permite elaborar estrategias de trabajo colaborativo para lograr la implementación del proyecto de la mejor manera posible, evitando problemas de tipo social, político y económico.

Tabla 60: Interés-Influencia y relacionamiento entre partes interesadas

Parte Interesada	Interés/Apuesta	Influencia sobre el uso del agua	Percepción y acercamiento al proyecto	Relación interesados	Clave con otros	Cargos de contacto
VRHR	Moderadamente	Alta	Media	SEDEGIA-GM's-OTNPB		Ministro V.Min.
VMACCGD	Moderadamente	Alta	Media	SEDEGIA-GM's-OTNPB		Ministro V.Min.
VMPBSB	Moderadamente	Alta	Media	SEDEGIA-GM's-OTNPB		Ministro V.Min.
SEDEGIA	Alto	Media	Alta	VM's-GM's-OTNPB		Gobernador
GAMT	Alto	Alta	Alta	COSAALT-S-FEJUVE-BARRIOS.C.C.		Alcalde Tarija
GAMSL	Alto	Alta	Alta	FEJUVE-BARRIOS.C.C.		Alcalde S. Lorenzo
AAPS	Poco	Baja	Baja	COSAALT		Autoridad
FEJUVET	Moderadamente	Media	Alta	GM's-BARRIOS-COSAALT		Pdte. FEJUVE
BARRIOS	Alto	Alta	Alta	FEJUVE-COSAALT-GM's		Pdte. Barrio
COSAALT	Alto	Alta	Alta	GM's-SEDEGIA		Gerente
ONG's	Alto	Baja	Alta	GM's-SEDEGIA		Director
OI	Moderadamente	Baja	Media	GM's-SEDEGIA		Responsable
C. CIVICO	Poco	Baja	Baja	GM's-SEDEGIA-VM's		Presidente C.Civ.
UCB	Moderadamente	Baja	Media	GM's-SEDEGIA		Rector
UAJMS	Moderadamente	Baja	Media	GM's-SEDEGIA		Rector
SIB	Poco	Baja	Media	GM's-SEDEGIA		Pdte. SIB
CICT	Poco	Baja	Media	GM's-SEDEGIA		Pfte. CICT
ABIS	Moderadamente	Baja	Media	GM's-SEDEGIA		Pdte. ABIS
OTNPB	Moderadamente	Media	Alta	GM's-SEDEGIA-VM's		Director
C.CAMP.	Poco	Alta	Media	GM's-FEJUVE-BARRIOS		Corregidor
CADECO	Poco	Baja	Baja	GM's-SEDEGIA		Pdte. CADECO
CAINCOT	Poco	Baja	Baja	GM's-SEDEGIA		Pdte. CAINCOTAR
A.L.N.	Poco	Alta	Media	GM's-SEDEGIA		Parlamentarios
A.L.D.	Poco	Alta	Media	SEDEGIA		Asambleistas
C.M.	Moderadamente	Alta	Media	GM's		Concejales

La interrelación o el relacionamiento entre las partes interesadas, permite identificar los grupos que se conforman entre las partes interesadas que en muchos casos pueden ser beneficiosos para el proyecto. Algunos casos pueden resultar perjudiciales para el proyecto, sobre todo considerando los grupos de interés político y económico.

La relación entre los niveles de Gobierno Departamental y Local con el Nacional es necesario e imperativo, considerando las competencias que tienen cada uno y la asignación de recursos económicos. Por la constitución el ejecutivo nacional a través del Ministerio de Medio Ambiente y Aguas y sus viceministerios tienen la tuición y competencia de intervenir en proyectos relacionados con recursos hídricos, lo que obliga que las gobernaciones y municipios trabajen de manera coordinada con esta instancia nacional, no solamente para una eventual aprobación del proyecto sino también para la asignación de recursos económicos.

A nivel departamental y local la federación de juntas vecinales-FEJUVE, los barrios y sus directorios y la cooperativa de agua y saneamiento-COSAALT, es identificada como un grupo de correlación de intereses importante.

Las instancias privadas como las cámaras de construcción e industria y las asociaciones de ingenieros tienen un interés comercial natural, que ha permitido agruparlos en un grupo de correlación de intereses.

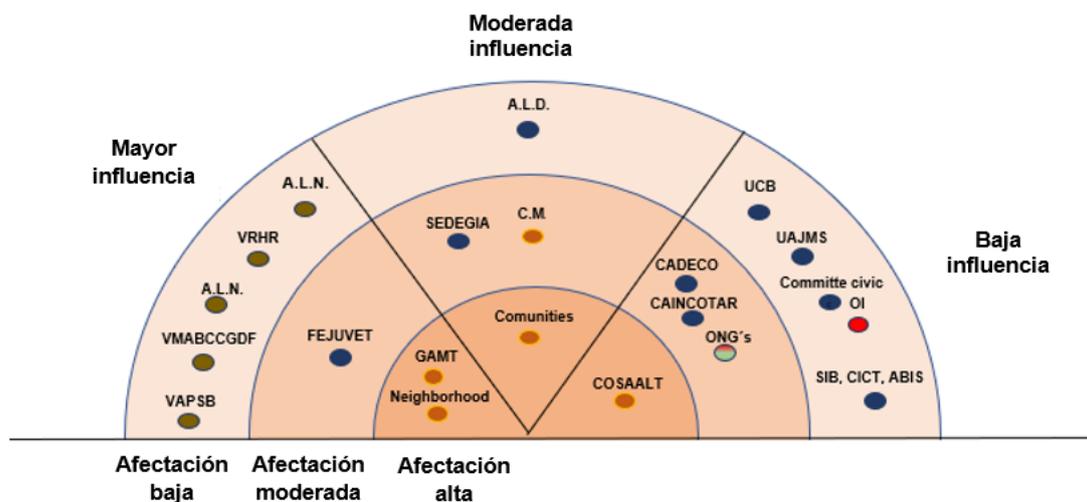
La constitución boliviana señala que todo proyecto o iniciativa debe tener un proceso de consulta con las comunidades campesinas donde están ubicadas las fuentes de agua, por lo que las instancias públicas departamentales y municipales deben estar vinculadas y relacionadas con estas instancias campesinas.

Finalmente, los órganos legislativos tienen un peso político muy importante por lo que cualquier instancia ejecutiva debe tener una relación directa con parlamentarios y legisladores para la gestión y trámite de normas en torno al proyecto.

4.5.1.6. Afectación

La figura 87 muestra el grado de involucramiento de los diferentes actores en función del nivel de influencia que tienen en la toma de decisiones en torno al proyecto.

Figura 87: Diagrama de afectación



Los efectos deben verse desde los aspectos político, social y económico. Las instancias nacionales de los niveles ejecutivo y legislativo tienen un alto nivel de influencia en las decisiones, pero el nivel de afectación es bajo en caso de que el proyecto no se materialice. Por otro lado, se puede apreciar que instancias locales como barrios, comunidades, la Municipalidad o la empresa operadora son las más afectadas. Esto se explica porque no

cuenta con un proyecto de depuración adecuado; la consecuencia directa es para los barrios y la gente.

A nivel departamental, las entidades privadas pueden tener poca influencia, pero un impacto alto o medio porque los proyectos generan un movimiento económico. En otro ámbito se encuentran las universidades o instituciones colegiadas cuya afectación es baja al igual que la influencia.

4.5.2. Análisis cuantitativo – Análisis de Redes Sociales

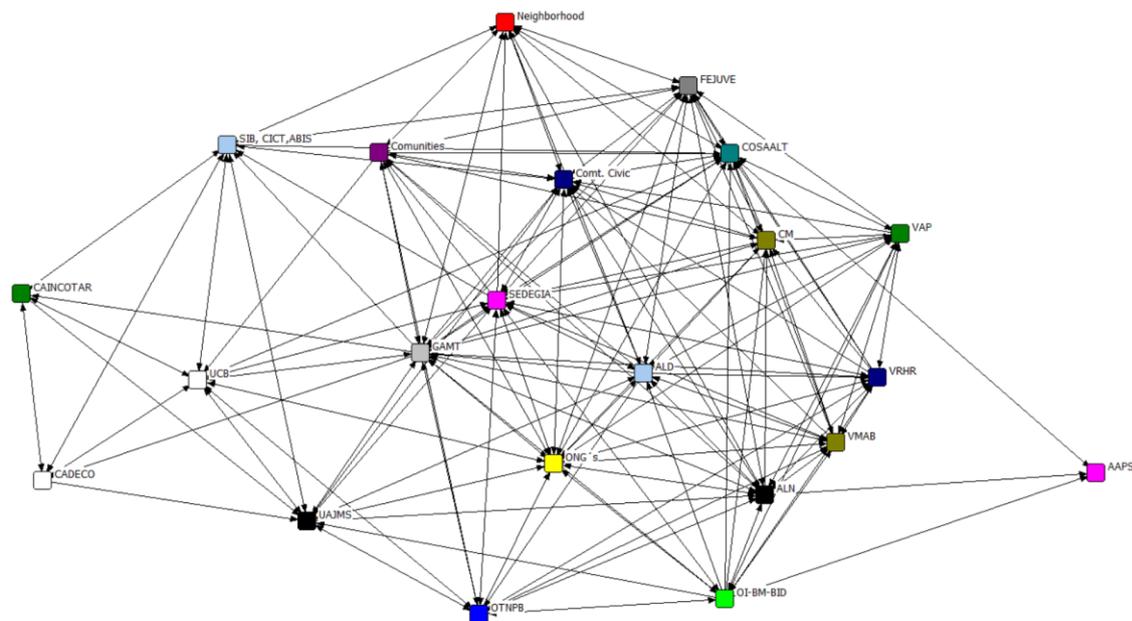
Para este análisis, lo primero ha sido definir atributos a cada actor para construir las redes sociales y permitan un análisis del grado de comunicación e interconectividad entre las partes interesadas. Se les colocó un color distintivo para cada actor; la tabla 61 muestra los atributos de cada nivel de participación.

Tabla 61: Atributos

Sector	Attribute
Organismos Internacionales (OI-BM-BID)	
ONG's	
Nivel central del sector público (ALN)	
Nivel central del sector público (VRHR)	
Nivel central del sector público (AAPS)	
Nivel central del sector público (VMAB)	
Nivel central del sector público (VAP)	
Nivel central del sector público (OTNPB)	
Nivel departamental del sector público (ALD)	
Nivel departamental del sector público (SEDEGIA)	
Nivel local del sector público (CM)	
Nivel local del sector público (GAMT)	
Sector privado (CADECO)	
Sector privado (CAINCOTAR)	
Instituciones académicas – universidades (UCB)	
Instituciones académicas – universidades (UAJMS)	
Instancias técnicas (SIB, CICT, ABIS)	
Instancias civiles (Comité Cívico)	
Instancias sociales (FEJUVE)	
Instancias sociales (Barrios)	
Instancias sociales (COSAALT)	
Instancias sociales (Comunidades)	

La figura 88 ilustra la red de interacción y conectividad entre las diversas partes interesadas.

Figura 88: Red Social de las partes interesadas



La red muestra una interacción media entre todas las partes interesadas; esto ratifica la polarización existente en el medio, ya sea por factores políticos o por los roles de cada partido en la sociedad. Sin embargo, la interacción más significativa se da entre el nivel político departamental, el GMT y FEJUVE con los barrios, y COSAALT son los que más intercambian información. La historia de la administración pública es la que muestra mayor homofilia (Ma et al., 2015). La AAPS no intercambia información excepto con COSAALT. El sector privado tiene poca interconectividad con el sector público pero mayor interconectividad entre sus contrapartes.

Los resultados estadísticos muestran que la densidad de la red es 0,872, es decir que el 87% de los interesados muestran algún tipo de relación o vínculo con el resto. Se generan cuatrocientos tres bonos con un promedio de 18 bonos. Los de más extraordinaria centralidad y poder en la red son el GM, SEDEGIA y FEJUVE, y las Organizaciones Interesadas. En otro análisis, los de mayor grado de relación nuevamente muestra que a las OI, GM, SEDEGIS y FEJUVE les sigue otro grupo de actores esenciales como son las Comunidades y COSAALT las asambleas legislativas y los viceministerios, las universidades e instituciones colegiadas. Al igual que el SIB, muestran una relación significativa. Sin embargo, las instancias privadas tienen el nivel más bajo de conexión. En el anexo 4.1 se detalla la matriz de identificación de atributos para la generación de la red social, y en el anexo 4.2 se detallan los resultados estadísticos obtenidos del software UCINET.

CAPITULO V: CONCLUSIONES

Los resultados evidencian la vulnerabilidad de la cuenca y los problemas de cantidad y calidad del agua destinada al uso humano.

El balance hídrico muestra déficit de agua en épocas de estiaje, alcanzando los niveles más bajos de abastecimiento entre mayo a diciembre, esto debido fundamentalmente a que fuentes superficiales como el embalse de San Jacinto y Huacata se encuentran paralizados en su producción de agua de consumo por la contaminación de metales pesados.

El monitoreo realizado a las principales fuentes de agua confirma de manera preliminar la contaminación del agua y la presencia de plomo, manganeso y hierro. Los embalses de San Jacinto y Huacata muestran niveles de concentración muy superiores a los permitidos por la Normativa Boliviana y estándares internacionales. Mientras que el plomo tiene concentraciones superiores al 50% respecto a los máximos admisibles, las concentraciones del manganeso y hierro son hasta 800% superiores.

Para el proceso experimental se montó una planta piloto de osmosis inversa en los laboratorios de la UCB – sede Tarija utilizando una membrana semipermeable de poliamida, compuesta y de configuración en espiral tipo ULP2540 marca Kensem de procedencia China. Se utilizaron aguas sintéticas con diferentes concentraciones de metales, combinados con NaCl, este último simula la presencia de otros componentes multivalentes presentes en el agua.

Los niveles de rechazo del plomo, manganeso y hierro son superiores al 99% en todos los casos. Se utilizaron dos medios de verificación; midiendo la conductividad durante las corridas experimentales y el segundo por analítica química. Para el efecto se utilizó un espectrofotómetro de emisión óptica con plasma de acoplamiento inductivo. Los resultados han confirmado la eficiencia en el proceso de tratamiento de agua potable por OI.

Los resultados muestran que, a bajas presiones y concentraciones de los metales, el comportamiento del flux es lineal, y la membrana no presenta compactación física. Por otro lado, a altas concentraciones, el flujo tiene un comportamiento diferente debido a la dificultad en el proceso de transferencia de masa por CP cerca de la superficie de la membrana.

Para bajas concentraciones las diferencias es del 3% entre el Pb y Mn y 1% entre el Pb y Fe, para concentraciones medias la diferencia entre el Pb y Mn es del 9% y 11% entre el Pb y Fe; mientras que para altas concentraciones la diferencia entre el plomo y manganeso es de 15% y con el hierro 17%.

Para las concentraciones bajas y medias el flux en el plomo disminuye en un 11%, mientras que para las concentraciones altas este desciende hasta 23%. En el manganeso se observa

que, con bajas y medias concentraciones el flux disminuye hasta un 24%, sin embargo, para las altas se observa una disminución de hasta el 50%. Para el hierro, el flux disminuye cerca de un 30% con concentraciones medias y, hasta un 60% para concentraciones altas.

El comportamiento del rechazo muestra una tendencia uniforme en concentraciones bajas y medias, sin embargo, para altas concentraciones el rechazo muestra una leve caída por efecto de la concentración de los solutos en la capa límite de la membrana. Si bien todos los índices de rechazo son superiores al 99%, para altas concentraciones se verifica que la CP tiene una alta influencia en el proceso.

El aumento de las concentraciones de los solutos confirma que a bajas concentraciones la transferencia de masa a través de la membrana disminuye, siendo este fenómeno que gobierna el proceso. Sin embargo, a altas concentraciones es el fenómeno de la CP quien gobierna, esto debido a que a medida que el soluto aumenta, este se acumula en la capa límite de la membrana.

Se desarrolló un modelo matemático novedoso, basado en el modelo de Concentración-Polarización de Spiegler y Kedem. El modelo ha sido desarrollado con diferentes concentraciones de los metales y se incluyó un factor de ajuste de temperatura de Arrhenius que permite una predicción precisa del rendimiento del proceso. La selección de las concentraciones permitió construir un modelo que permite diseñar instalaciones con alta conversión (>80%). Con ello se podrá optimizar el proceso desde el punto de vista de la eficiencia energética en futuras obras.

La validación del modelo muestra que los máximos errores relativos entre el J_v teórico y el J_v experimental en Pb se dan con concentraciones y presiones altas, alcanzando un error del 5,4%. Mientras que para el manganeso el error relativo máximo se genera con la concentración alta en un 18%, al igual que para y hierro donde el máximo error relativo está en la mayor concentración con un 7.6%.

Las condiciones de operación del modelo como presión, concentración de contaminantes y efectos de la temperatura, y los resultados obtenidos en el rechazo de Pb, Mn y Fe, muestran que a futuro se puede desarrollar un diseño industrial en la cuenca de estudio con eficiencia energética y procesos operativos económicos y sostenibles.

Se identificaron 25 partes interesadas entre instituciones públicas, privadas, cívicas/sociales y profesionales que participan activamente en la gestión de los recursos hídricos de la cuenca. El análisis y naturaleza de cada una de ellas ha permitido agruparlas en función al interés, influencia y poder que pueden ejercer en torno a la gestión y ejecución del proyecto.

Mientras que instancias ejecutivas como los viceministerios, gobernaciones y municipios que tienen tuición y responsabilidad directa en la gestión del proyecto, las instancias legislativas en los distintos niveles de gobiernos juegan un rol político y legislativo fundamental para su concreción, haciendo necesario que ambos poderes del estado tengan una relación definitiva y colaborativa.

Se identifican niveles públicos y privados intermedios con alto interés e influencia en el proyecto. Las juntas vecinales y las empresas prestadoras de servicios generan un vínculo natural por el interés y ejecución del proyecto. Por otro lado, se identificaron instancias privadas con intereses comerciales naturales que tendrán una participación importante en la ejecución del proyecto que deben ser tomadas en cuenta durante las gestiones.

Los organismos internacionales y ONG´s juegan un rol técnico y económico en las gestiones del proyecto, fundamentalmente en las decisiones técnicas que se tomen en torno al mismo. Es importante señalar que convenios internacionales con organismos como el Banco Mundial o el BID, tienen sus propias normas de diseño, licitación y ejecución de proyectos que están por encima de la legislación nacional y deben ser cumplidos para el financiamiento de los proyectos.

Finalmente, los barrios y comunidades campesinas a través de sus autoridades legalmente establecidas tienen una participación clave en las definiciones de los proyectos. La decisión de ejecutar un proyecto o ubicar una determinada obra en un barrio, zona o territorio rural/campesino, requerirá de la aprobación y aceptación de estas. El vínculo y relación con estas instancias debe ser continuo y definitivo, informando adecuadamente y de manera oportuna las decisiones técnicas que se tomen en el proyecto.

El problema de los metales pesados en las aguas superficiales denota un riesgo para la salud pública mundial. Sin embargo, no se puede ignorar el factor económico que está directamente relacionado con la aplicabilidad de diferentes tecnologías para eliminar iones metálicos del agua. En este sentido, el desafío a corto plazo es desarrollar u optimizar procesos, como la ósmosis inversa, para hacerla ecoeficiente y así lograr la sostenibilidad dentro del proceso. Esto garantizaría una mayor implementación de la tecnología de OI en los países en desarrollo, que tienen problemas con el agua contaminada con metales pesados tóxicos.

En el anexo 5.1 y 5.2 se detallan las publicaciones en revistas y congresos de los diferentes resultados obtenidos durante la investigación.

Referencias

- Abdullah, N., Yusof, N., Lau, W.J., Jaafar, J. and Ismail, A.F. 2019. Recent trends of heavy metal removal from water/wastewater by membrane technologies. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 76, 17-38. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1226086X19301194>. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.03.029>
- Abubakar, I.R. 2016. Quality dimensions of public water services in Abuja, Nigeria. *Util. Policy* 38, 43–51. Obtenido de: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957178715301399?casa_token=gamM1VdBfxcAAAAA:ok6YIVDUU6NtmwgbewKCwvQRr6iJ6tGehESf646T63RhapRyw8KQTzU_9uOIYSQH2OWW8R97WeX2. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2015.12.003>
- Abbas, A., 2016. Model predictive control of a reverse osmosis desalination unit. *Desalination*. 194, 268-280. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.10.033>.
- Aggens, L. 1998. Identifying different levels of public interest in participation. In *Public Involvement Techniques: A Reader of Ten Years Experience at the Institute for Water Resources*, prepared by Creighton, J. L., Delli Priscoli, J. & Dunning, C. M. IWR-USACE, Alexandria, Virginia, IWR Research Report 82_R-1,. Obtenido de: [https://scholar.google.com.bo/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&q=Aggens%2C+L.+1998.+Identifying+different+levels+of+public+interest+in+participation.+In+Public+Involvement+Techniques%3A+A+Reader+of+Ten+Years+Experience+at+the+Institute+for+Water+Resources%2C+prepared+by+Creighton%2C+J.+L.%2C+Delli+Priscoli%2C+J.+%26+Dunning%2C+C.+M.+IWR-USACE%2C+Alexandria%2C+Virginia%2C+IWR+Research+Report+82_R-1&btnG=.](https://scholar.google.com.bo/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&q=Aggens%2C+L.+1998.+Identifying+different+levels+of+public+interest+in+participation.+In+Public+Involvement+Techniques%3A+A+Reader+of+Ten+Years+Experience+at+the+Institute+for+Water+Resources%2C+prepared+by+Creighton%2C+J.+L.%2C+Delli+Priscoli%2C+J.+%26+Dunning%2C+C.+M.+IWR-USACE%2C+Alexandria%2C+Virginia%2C+IWR+Research+Report+82_R-1&btnG=)
- Agrobolivia, 2011. <https://agrobolivia.files.wordpress.com>. Obtenido de <https://agrobolivia.files.wordpress.com/2011/03/docppver3.pdf>.
- Ahmed, F., Hashaikh, R., Diabat, A., Hilal N. (2019). Mathematical and optimization modelling in desalination: State-of-the-art and future direction. *Desalination*. 469, 114092. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114092>
- Akpor, O.B., and M. Muchie. 2010. "Remediation of Heavy Metals in Drinking Water and Wastewater Treatment Systems: Processes and Applications." *International Journal of Physical Sciences* 5 (12): 1807–1817. Obtenido de: <https://academicjournals.org/journal/IJPS/article-abstract/00E529A31916>. <https://doi.org/10.5897/IJPS.9000482>
- Algreiri, A. H., & Abdulmajeed, Y. R. (2016). Removal of Heavy Metals from Industrial Wastewater by Using RO Membrane. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*. 17(4), 125–136. Retrieved from <https://ijcpe.uobaghdad.edu.iq/index.php/ijcpe/article/view/239>
- Al-Musharafi, S.K., I.Y. Mahmoud, and S.N. Al-Bahry. 2012. "Heavy Metal Contamination from Treated Sewage Effluents. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 164: 381–89. Obtenido de: [https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&q=Al-Musharafi%2C+S.K.%2C+I.Y.+Mahmoud%2C+and+S.N.+Al-Bahry.+2012.+%E2%80%9Cheavy+Metal+Contamination+from+Treated+Sewage+Effluents.+WIT+Transactions+on+Ecology+and+the+Environment.+164%3A+381%E2%80%93389.Al-Musharafi%2C+S.K.%2C+I.Y.+Mahmoud%2C+and+S.N.+Al-Bahry.+2012.+%E2%80%9Cheavy+Metal+Contamination+from+Treated+Sewage+Effluents.+WIT+Transactions+on+Ecology+and+the+Environment.+164%3A+381%E2%80%93389.&btnG=.](https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&q=Al-Musharafi%2C+S.K.%2C+I.Y.+Mahmoud%2C+and+S.N.+Al-Bahry.+2012.+%E2%80%9Cheavy+Metal+Contamination+from+Treated+Sewage+Effluents.+WIT+Transactions+on+Ecology+and+the+Environment.+164%3A+381%E2%80%93389.Al-Musharafi%2C+S.K.%2C+I.Y.+Mahmoud%2C+and+S.N.+Al-Bahry.+2012.+%E2%80%9Cheavy+Metal+Contamination+from+Treated+Sewage+Effluents.+WIT+Transactions+on+Ecology+and+the+Environment.+164%3A+381%E2%80%93389.&btnG=) <https://doi.org/10.2495/WP120331>

- AlSawafthah, N., Abuwatfa, W., Darwish, N. and Hussein, G. 2021. A Comprehensive Review on Membrane Fouling: Mathematical Modelling, Prediction, Diagnosis, and Mitigation. *Water*. 13, 1327. Obtenido de: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/9/1327>. <https://doi.org/10.3390/w13091327>
- Alvizuri, P., Villena, E., Micó, B., Lora, J., Torregrosa-López, J., Lo-Iacono-Ferreira, V. 2022. On the Road to Sustainable Water Supply: Reducing Public Health Risks and Preserving Surface Water Resources in the Milluni Micro-Basin, Bolivia. *Environments*. 9(1):4. <https://doi.org/10.3390/environments9010004>
- Alvizuri, P., Villena, E., Avendaño, N., Lo-Iacono-Ferreira, V., Torregrosa-López, J., Lora, J. 2022b. Contamination of water supply sources by heavy metals: The price of development in Bolivia, a Latin American reality. *Water*.
- Alvarado, C., Barahona-Palomo, M. 2017. Comparación de tres métodos de infiltración para calcular el balance hídrico del suelo, en la cuenca del río Suquiapa, El Salvador. Cuadernos de investigación Universidad Estatal a Distancia – UNED, 9, 23-33. Obtenido de: https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&q=Alvarado%2C+Barahona-Palomo%2C+M.+2017.+Comparaci%C3%B3n+de+tres+m%C3%A9todos+de+infiltraci%C3%B3n+para+calcular+el+balance+h%C3%ADrico+del+suelo%2C+en+la+cuenca+del+r%C3%ADo+Suquiapa%2C+El+Salvador&btnG=
- Andreozzi, R., Caprio, V., Insola, A., and Marotta, R. (1999). Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery. *Catalysis today*, 53(1), 51-59. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920586199001029>
- Ankeny, M.D., Ahmed, M., Kaspar, T.C., and Horton R. 1991. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity [Abstract]. *Soil Science Society of America Journal*, 55, 467–470. Doi: 10.2136 / sssaj1991.03615995005500020028x.
- Aramijo, C. and Condorhuaman, C. 2012. Simulación dinámica de sistemas de osmosis inversa. *Rev. Per. Quim. Ing. Química*. 15, 21-34: Obtenida de: <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/quim/article/view/4758>.
- Assens, J. y Montorioal, J. 1957. Sobre el papel desempeñado por el efecto salino en la génesis de ciertas cavidades kársticas desarrolladas en las líneas de costa. *RVII*(1), 81-88. Obtenido de: <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/4623>.
- Assouline, S. 2013. Infiltration into soils: Conceptual approaches and solutions. *Water Resources Research*, 49, 1755-1772. Doi:10.1002/wrcr.20155. Obtenido de: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wrcr.20155>
- Atab, M., Smallbone, A. and Roskilly, A. 2018. A hybrid reverse osmosis/adsorption desalination plant for irrigation and drinking water. *Desalination*, 444, 44–52. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916417327030>. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.07.008>
- Baccar, M., Bergez, J.-E., Couture, S., Sekhar, M., Ruiz, L. & Leenhardt, D. (2021). Building Climate Change Adaptation Scenarios with Stakeholders for Water Management: A Hybrid Approach Adapted to the South Indian Water Crisis. *Sustainability*, 13, 8459. <https://doi.org/10.3390/su13158459>.
- BID-Banco Interamericano de Desarrollo, (2019). Sistema HydroBID. Obtenido de: <http://sp.hydrobidlac.org/>.
- Bianchi, R.R., Kossoudji, S.A., 2001. Interest Groups and Organizations as Stakeholders. *Social Development Papers* 35. World Bank, Washington, DC. Obtenido de: https://scholar.google.com.bo/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&q=Bianchi%2C+R.R.%2C+Kossoudji%2C+S.A.%2C+2001.+Interest+Groups+and+Organizations

+as+Stakeholders.+Social+Development+Papers+35.+World+Bank%2C+Washingto
n%2C+DC.&btnG=

- Biggs, S. and Matsuert, H., 1999. An actor-orientated approach for strengthening research and development capabilities in natural resource systems. *Public Administration and Development* 19, 231-262. Obtenido de: [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/\(SICI\)1099-162X\(199908\)19:3%3C231::AID-PAD71%3E3.0.CO;2-E](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/(SICI)1099-162X(199908)19:3%3C231::AID-PAD71%3E3.0.CO;2-E).
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-162X\(199908\)19:3<231::AID-PAD71>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-162X(199908)19:3<231::AID-PAD71>3.0.CO;2-E)
- Boerlage, S.F.E., Kennedy, M.D., Witkamp, G.J., van der Hoek, J.C. and Schippers J.C. 1999. BaSO₄ solubility prediction in reverse osmosis membrane systems. *Journal of Membrane Science*. 159, 47-59. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376738899000526>.
[https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(99\)00052-6](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(99)00052-6)
- Boyd, R.S. 2010. "Heavy Metal Pollutants and Chemical Ecology: Exploring New Frontiers." *Journal of Chemical Ecology* 36 (1): 46–58. Obtenido de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10886-009-9730-5>.
<https://doi.org/10.1007/s10886-009-9730-5>
- Bodzek, M., Konieczny, K., & Kwiecińska, A. 2011. Application of membrane processes in drinking water treatment—state of art. *Desalination and Water Treatment*, 35:1-3, 164-184. Obtenido de: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.5004/dwt.2011.2435>. doi: 10.5004/dwt.2011.2435.
- Bonné, P.A.C., Hofman, J.A.M.H. and van der Hoek. J.P. 2000. Scaling control of RO membranes and direct treatment of surface water. *Desalination* 132, 109-119. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916400001405>.
[https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)00140-5](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)00140-5)
- Borgatti, S. P., Everett, M. G., & Johnson, J. C. 2013. *Analyzing Social Networks* (Vol. 3, Issue September). SAGE Publications Ltd.
- Borrini-Feyerabend, G., Pimbert, M., Farvar, M.T., Kothari, A., Renard, Y., 2007. *Sharing Power: a Global Guide to Collaborative Management of Natural Resources*. Earthscan, London
- Bouwer, H. 1969. Infiltration of water into nonuniform soil. *Journal Irrigation and Drainage Division*, 95, 451–462. <https://trid.trb.org/view/127380>.
- Box, G.E.P. y Hunter, J.S. 1961. 'Fractional Factorial Designs. Part I – II1, *Technometrics*, 3,311-351 y 449-458. Obtenido de: https://scholar.google.com.bo/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&q=Box%2C+G.E.P.+y+Hunter%2C+J.S.+1961.+%27Fractional+Factorial+Designs.+Part+I+-+II1%2C+Technometrics%2C+3%2C311-351+y+449-458&btnG=.
- Box, G.E.P. y Meyer, R.D. 1985. 'Studies in Quality Improvement I: Dispersion Effects from Fractional Designs', University of Wisconsin M.R.C. Tech. Report #2796. Obtenido de: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA153516>.
- Brakensiek, D., Engleman, R., and Rawls W. 1981. Variation within texture classes of soil water parametres. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 24, 335-339. Doi: 10.13031 / 2013.34253.
- Brooks R. and Corey A., 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Papers*, Colorado State University, Fort Collins. Colorado. Obtenido de:

https://mountainscholar.org/bitstream/handle/10217/61288/HydrologyPapers_n3.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

- Cabero, J. 2015. Proceso de desalación de agua de mar mediante un sistema de osmosis inversa de muy alta conversión en tres etapas de recirculación de permeado y doble sistema de recuperación de. Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco, Obtenida de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=112156>.
- Carsel, R. F. & Parrish, R.S. 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resource Research*, 24, 755-769. Obtenido de: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/WR024i005p00755>.
<https://doi.org/10.1029/WR024i005p00755>.
- Carrasco, V.M. 2003. Estudio del Comportamiento de las Membranas Permetec en una Planta Piloto Experimental de Ósmosis Inversa para la Reutilización de Aguas Residuales Urbanas. PhD thesis, Universidad de Cádiz.
- Caviedes D., Muñoz R., Perdomo A., Rodríguez D. and Sandoval I., 2015. Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. *Ingeniería y Región*. 13, 73-90. Obtenido de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5432290>.
- Centro de Cambio Global Universidad de Chile. 2009. Modelación hidrológica y de recursos hídricos con el modelo WEAP. Obtenido de: <https://cambioglobal.uc.cl/resultados-de-busqueda?searchword=weap&searchphrase=all>.
- CEDEX-Centro de Estudios y Experimentación. 2019. Cálculo hidrometeorológico de aportaciones y crecidas – CHAC. Ministerio de Obras Públicas del Gobierno de España. Obtenido de <http://ceh-flumen64.cedex.es/chac/>.
- Copa, I., y Villena, E. 2016. Estrategia para implementar un plan de acción de la gestión integral de los recursos hídricos y ambientales de la cuenca del Guadalquivir (tesis final de máster no publicada), Alcoy, España.
- Collick, A., Easton, Z., Ashagrie, T., Biruk, B., Tilahun, S., & Adgo, E. 2009. A simple semi-distributed water balance model for the Ethiopian highlands. *Hydrological Processes*, 23, 3718-3727. Obtenido de: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.7517>. DOI: 10.1002/hyp.7517
- Cooperativa de Agua Potable y Alcantarillado de Tarija – COSALTT, 2016. Informe de Gestion 2016, Tarija, Bolivia. Obtenido de: chrome-extension://efaidnbnmnibpcajpcgclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3a%2f%2f190.104.3.180%2fnoticia%2fdetalle_187_1.pdf&clen=3951651&chunk=true
- Cornelius, H., Faire, S., 1989. Everyone Can Win. How to Resolve Conflict. Simon & Shuster, Australia.
- Creighton, J. L., Delli Priscoli, J. & Dunning 1998. Public Involvement Techniques: A Reader of Ten Years Experience at the Institute for Water Resources, prepared by, C. M. IWR-USACE, Alexandria, Virginia, IWR Research Report 82_R-1
- Clarkson, M. Starik, M, Cochran, P. and Jones, T. 1994. Reflections on stakeholder theory. The Toronto Conference on Stakeholder Theory, Toronto, Centre for Corporate Social 33, 1, 82. Obtenido de: <https://www.proquest.com/openview/f77d16a32d015b50d078f5fb16996694/1/advanced>. DOI:10.1177/000765039403300105
- Clarkson, M.B.E., 1995. A stakeholder framework for analyzing and evaluating corporate social performance. *Academy of Management Review* 20, 65-91.

- Cüneyt N. and Éva À. 2011. Water Quality Monitoring in European and Turkish Rivers Using Diatoms. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 11, 329-337. Obtenido de: <https://dergipark.org.tr/en/pub/trjfas-ayrildi/issue/13273/160353>.
- Chan, B.K.C., and A.W.L. Dudeney. 2008. "Reverse Osmosis Removal of Arsenic Residues from Bioleaching of Refractory Gold Concentrates." *Minerals Engineering* 21 (4): 272–78. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687507002889>. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.10.003>
- Chen, L., Zhang, X., Cao, M., Pan, Y., Xiao, C., Wang, P., Liang, Y., Liu, G. and Cai, Y. 2021. Release of legacy mercury and effect of aquaculture on mercury biogeochemical cycling in highly polluted Ya-Er Lake, China. *Chemosphere*. 275,130011. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004565352100480X?via%3Dihub>. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130011>
- Chevalier, J.M., Buckles, D.J., 2008. *SAS2: a Guide to Collaborative Inquiry and Social Engagement*. Sage Publications.
- Chenghan, C. and Han, Q. 2019. Processes. A Mathematical Modeling of the Reverse Osmosis Concentration Process of a Glucose Solution. 7, 271, 2-12, Obtenido de: <https://www.mdpi.com/2227-9717/7/5/271>. Doi:10.3390/pr7050271.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. 1994. *Hidrología Aplicada*. Colombia: McGraw-Hill Interamericana S.A.
- Choi, Y.H., Kim, D.I., Kweon, J.H., Lee, S. and 2009. Evaluation of various pretreatment for particle and inorganic fouling control on performance of SWRO . *Desalination* 247 (2009) 137–147. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916409004949>. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.12.019>
- Chowdhury, S., M.A.J. Mazumder, O. Al-Attas, and T. Husain. 2016. "Heavy Metals in Drinking Water: Occurrences, Implications, and Future Needs in Developing Countries." *Science of the Total Environment* 569–570: 476–88. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969716313407>. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.166>.
- Chung, T., Zhang, S., Wang, K., Su, J., Ling, M., 2012. Forward osmosis processes: Yesterday, today and tomorrow. *Desalination*. 287, 78–81. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916410009392>. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.12.019>.
- Dawdy, D. 2007. Prediction versus Understanding. *Journal of Hydrologic Engineering*, 1. 1-3 Obtenido de: [https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2007\)12:1\(1\)?casa_token=wRH8VSAAsGX4AAAAA:5Ycb_MP8C_KkoDplmDWVYDTCTJA-tCB5On7JknYpa-rKKQIEbu8A4yGwY6-ZbZz5fYPP7YqpWdQA](https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:1(1)?casa_token=wRH8VSAAsGX4AAAAA:5Ycb_MP8C_KkoDplmDWVYDTCTJA-tCB5On7JknYpa-rKKQIEbu8A4yGwY6-ZbZz5fYPP7YqpWdQA)
- Das, B.M. 2004. *Principios de ingeniería de cimentaciones (5ta edición)*. México D.F.: Thomson.
- Decagon Devices Inc. 2016. Mini Disk Infiltrometer. Decagon Devices Inc. Versión mayo 31, 2016.
- Dale, A.P., Lane, M.B., 1994. Strategic perspectives analysis: a procedure for participatory and political social impact assessment. *Society and Natural Resources* 7, 253-267. Obtenido de: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/08941929409380863>. <https://doi.org/10.1080/08941929409380863>

- Dialynas, E., Diamadopoulos, E., 2009. Integration of a membrane bioreactor coupled with reverse osmosis for advanced treatment of municipal wastewater. *Desalination*. 238, 302-311. Obtenido de: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.01.046>
- Dourojeanni, A., Jouravlev, A., y Chávez, G., 2002. *Gestión del Agua a Nivel de Cuencas: Teoría y Práctica*. Chile: Naciones Unidas. Obtenido de: https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&q=Dourojeanni%2C+A.%2C+Jouravlev%2C+A.%2C+y+Ch%3%A1vez%2C+G.+2002.+Gesti%C3%B3n+del+Agua+a+Nivel+de+Cuencas%3A+Teor%C3%Ada+y+Pr%C3%A1ctica.+Chile%3A+Naciones+Unidas.&btnG=
- Dourojeanni, A., Jouravlev, A., 2001. Crisis de gobernabilidad en la gestión del agua. *Recursos naturales e infraestructura-CEPAL*. Chile: Naciones Unidas. Obtenido de: <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/6395>.
- Domenech, X and Peral, J; 2008. *Química Ambiental de Sistemas Terrestres*. Editorial Reverté. Barcelona, España. 239 pp.
- Domínguez Candela, I. (2018). Economía circular aplicada a aguas residuales del curtido mediante ósmosis directa.
- DD. 09 (2013). Aprobación del Plan Departamental del Agua de Tarija-Bolivia “Agua para todos y para siempre”. Obtenido de: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3a%2F%2F01.222.81.2%2F analisisNormativo%2FnormasPDF%2F6953.pdf&clen=888017&chunk=true>
- DS. 29894 (2009). Organización del Órgano Ejecutivo. La Paz-Bolivia. Obtenido de: <https://www.economiayfinanzas.gob.bo/decreto-supremo-n-29894.html>
- Duruibe, J., Jude N. Egwurugwu, and Ogwuegbu, M. 2007. “Heavy Metal Pollution and Human Biotoxic Effects.” *International Journal of Physical Sciences*. Vol. 2. Obtenido de: https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&q=Duruibe%2C+J.%2C+Jude+N.+Egwurugwu%2C+and+Ogwuegbu%2C+M.+2007.+%E2%80%9CHeavy+Metal+Pollution+and+Human+Biotoxic+Effects.%E2%80%9D+International+Journal+of+Physical+Sciences.+Vol.+2.+Obtenido+de%3A+&btnG=
- Eagleson, P.S. 1970. *Dynamic Hydrology*. New York. MacGraw Hill
- Emami, H., Shorafa, M. & Neyshabouri, M.R., 2012. Evaluation of Hydraulic Conductivity at Inflection Point of Soil Moisture Characteristic Curve as a Matching Point for some Soil Unsaturated Hydraulic Conductivity Models. *Science & Technology Agriculture & Natural Resource – Water and soils Science*, 16, 169-182. Obtenido de: https://jstnar.iut.ac.ir/browse.php?a_id=2206&sid=1&slc_lang=en
- Emenike, P.C., Nnaji, C.C., Tenebe, I.T., 2018. Assessment of geospatial and hydrochemical interactions of groundwater quality, southwestern Nigeria. *Environ. Monit. Assess.* 190, 440. Obtenido de: <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6799-8>.
- EPA. 2006. Environmental Protection Agency. List of Drinking Water Contaminants and MCLs. Obtenido de: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3a%2F%2Fwww.epa.gov%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2F2015-10%2Fdocuments%2Face3_drinking_water.pdf&clen=1695838&chunk=true.
- EPA. 2017. “Drinking Water Contaminants – Standards and Regulations.” 2017. <https://www.epa.gov/dwstandardsregulations>.
- Esteves, J., Gil, M. y Harvey, M. 1996. Evaluación de la contaminación por metales en sedimentos y materiales en suspensión de la cuenca Turbio-Gallegos. Informe

- Técnico N°12 del Plan de Manejo Integrado de la Zona Costera Patagónica. Puerto Madryn, Argentina, 21 p.
- Estrela Monreal, T. 1993. Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos. Monografías CEDEX, M-25. Ministerio de Fomento. Madrid. Obtenido de: <https://hispagua.cedex.es/documentacion/documento/31711>.
- European Commission (2003). Common Implementation Strategy for the Water framework Directive (2000/60/CE) – Guidance Document n. 8. Obtenida de: https://scholar.google.com.bo/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&q=European+Commission+%282003%29.+Common+Implementation+Strategy+for+the+Water+framework+Directive+%282000%2F60%2FCE%29+-+Guidance+Document+n.+8.+&btnG=.
- Fatehnia, K. Tawfig and T. Abichou. 2014. Comparison of the Methods of Hydraulic Conductivity Estimation from Mini Disk Infiltrometer. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering-EJGE*, 19, 1047-1063. Obtenido de: https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&q=Fatehnia%2C+K.+Tawfig+and+T.+Abichou.+2014.+Comparison+of+the+Methods+of+Hydraulic+Conductivity+Estimation+from+Mini+Disk+Infiltrometer.+Electronic+Journal+of+Geotechnical+Engineering-EJGE%2C+19%2C+1047-1063&btnG=.
- FAO, 1990. Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Agua y Drenaje. Obtenido de: <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>
- Fariñas, M. 1999. Osmosis Inversa. Fundamentos Tecnología y aplicaciones. Mc GrawHill, Ente Vasco de la Ingeniería, EVE, e IBERDROLA, España, pp. 163-168
- Fereshte, F.H., 2014. Evaluation of Artificial Neural Network and Regression PTFs in Estimating Some Soil Hydraulic Parameters. *Bioflux – ProEnvironment*, 7, 10-20. Obtenido de: <chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcgclcfndmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3a%2F%2Fjournals.usamvcluj.ro%2Findex.php%2Fpromediu%2Farticle%2FviewFile%2F10086%2F8465&clen=338412>
- Feria-Díaz, JJ., Correa-Mahecha, F., López-Méndez, MC., Rodríguez-Miranda, JP. And Barrera-Rojas, J. 2021. Recent Desalination Technologies by Hybridization and Integration with Reverse Osmosis: A Review. *Water*. 13, 1369. <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/10/1369/htm>. <https://doi.org/10.3390/w13101369>
- Filgueira, R., Soracco, CG., Sarli, GO and Fournier, LL., 2006. Estimación de propiedades hidráulicas de suelos por mediciones a campo y el uso de modelos de flujo estacionario y transitorio. *Ciencias del Suelos*, 24, 39-48. Obtenido de: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/105776>
- Fu, F. and Wang, Q. 2011. "Removal of Heavy Metal Ions from Wastewaters: A Review." *Journal of Environmental Management*. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479710004147>. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>.
- Francés García, F. & Ríos Pacheco, R. 2017. Análisis de la implementación del modelo hidrológico distribuido TETIS en el ámbito regional de la demarcación hidrográfica del Júcar utilizando información estándar (Tesina Fin de Máster, Universitat Politècnica de València). Obtenida de: <https://riunet.upv.es/handle/10251/77511>
- Freeman, R. Edward (1984). *Strategic management: A stakeholder approach*. Boston: Pitman Publishing, Inc.

- Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T., and Melin, T. 2007. State-of-the-art of reverse osmosis desalination. *Desalination*, 216, 1-76. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916407004250>. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.12.009>
- Gaikwad, R.W., and Gupta, D.V. 2008. Review on Removal of Heavy Metals from Acid Mine Drainage. *Applied Ecology and Environmental Research*, 6, 81-98. Obtenido de: http://www.aloki.hu/indvol06_3.htm. https://doi.org/10.15666/aeer/0603_081098
- García, C. 2002. Aplicación de la osmosis inversa y nanofiltración en acondicionamiento de agua para calderas (Tesis Doctoral). Obtenida de: <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/16153>
- García F. 2012. Análisis y simulación de la tecnología de ósmosis inversa con fuentes energéticas no convencionales. Tesis Doctoral. Universidad de las Palmas de Gran Canaria. Retrieved from: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=80036>.
- García-Fayos, B., Arnal, J.M., Gimenez, A., Alvarez, S., Sancho, M. 2016. VALORIZATION OF REVERSE OSMOSIS MEMBRANE MODULES RETIRED FROM A DESALINATION PLANT. INSTALLATION DESIGN. 20 th Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, AEIPRO, 1472-1484. Obtenida de: <http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/867>.
- García-Fayos, B., Arnal, J.M., Gimenez, A., Alvarez, S., Sancho, M. 2014. Study of the fouling and cleaning of RO membranes from a seawater desalination plant by means of static assays. 3367-3379. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.959738>
- Garrido, A.E., Strosnider, W.H., Wilson, R.T., Condori, J. and Nairn, R.W. 2017. Metal-contaminated potato crops and potential human health risk in Bolivian mining highlands. *Environ. Geochem. Health*. 39, 681–700. Obtenido de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10653-017-9943-4>. <https://doi.org/10.1007/s10653-017-9943-4>
- Germán D., González R. and Ponce N. 2012. Técnicas para desalinizar agua de mar y su desarrollo en México. *Ra Ximhai*, 8, 57-68. Obtenido de: https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&q=Germ%C3%A1n+D.+Gonz%C3%A1lez+R.+and+Ponce+N.+2012.+T%C3%A9cnicas+para+desalinizar+agua+de+mar+y+su+desarrollo+en+M%C3%A9xico.+Ra+Ximhai%2C+8%2C+57-68.+Retrieved+from&btnG=
- Gonzales, J. B., Descroix, L., Jasso, R. I., Estrada, J. A., Gonzales, G. C., Sánchez, I. C., Soliz, D. 2007. Hidrología Experimental como Fuente de Información para el Manejo Integral del Agua en Cuencas Hidrográficas. *IRD*, 63-85. Obtenido de: <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010043117>
- Gobernación del departamento de Tarija, 2013. Plan Departamental del Agua, Tarija-Bolivia. Obtenido de: chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3a%2F%2Fservicios.ucbtja.edu.bo%3a8090%2Fsihita%2Fcss%2Fdocs%2FPLN-00023%2FPLN-00023_DOC.pdf&clen=11076277&chunk=true
- Gu, B., Adjiman, C.S. and Xu, X.Y. 2021. Correlations for Concentration Polarization and Pressure Drop in Spacer-Filled RO Membrane Modules Based on CFD Simulations. *Membranes* 2021. 11, 338. Obtenido de: <https://www.mdpi.com/2077-0375/11/5/338>. <https://doi.org/10.3390/membranes11050338>
- Greenberg, G., Hasson, D. and Semiat, R. 2005. Limits of RO recovery imposed by calcium phosphate precipitation. *Desalination* 183, 273–288. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916405005102>. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.026>

- Greenlee, L.F., Lawler, D.F., Freeman, B.D., Marrot, B., & Moulin, P. 2009. Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges. *Water Research*, 43(9), 2317-2348. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135409001547>. Doi:10.1016/j.watres.2009.03.010
- Green, W.H, and Ampt, G.A. 1911. Studies on soil physics, Part I, the flow of air and water through soils, *Agricultural Science*, 4, 1-24. Doi: 10.1017 / S0021859600001441.
- Gray, B. 1985. Conditions facilitating interorganizational collaboration. *Human Relations* 38, 911-936. Obtenido de: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/001872678503801001>. <https://doi.org/10.1177/001872678503801001>
- Grimble, R. and Wellard, K. 1997. Stakeholder methodologies in natural resource management: a review of principles, context, experiences and opportunities. *Agricultural Systems*, 55(2), 173-193. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X97000061>. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(97\)00006-1](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(97)00006-1)
- Hashim, M.A., S. Mukhopadhyay, J.N. Sahu, and B. Sengupta. 2011. "Remediation Technologies for Heavy Metal Contaminated Groundwater." *Journal of Environmental Management* 92 (10): 2355-88. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.009>
- Hare, M., Pahl-Wostl, C., 2002. Stakeholder categorisation in participatory integrated assessment. *Integrated Assessment* 3, 50-62. Obtenido de: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1076/iaij.3.1.50.7408>. <https://doi.org/10.1076/iaij.3.1.50.7408>
- Hart, S.L., Sharma, S., 2004. Engaging fringe stakeholders for competitive imagination. *Academy of Management Executive* 18, 7-18. Obtenido de: <https://journals.aom.org/doi/abs/10.5465/AME.2004.12691227>. <https://doi.org/10.5465/ame.2004.12691227>.
- Hearne, RR. & Torpen, RD. (2010). Stakeholder preferences for water management alternatives in the Red River Basin. *Water International*, 150-164. <https://doi.org/10.1080/02508061003663437>.
- Hernández, A., Guillón, M. and García, L. 2015. La metodología de Taguchi en el control estadístico de la calidad. *Investigación Operativa*, 37, 65-83. Obtenido de: <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/revahhttp://revistas.unc.edu.ar/index.php/epio/article/view/11986>.
- Hidalgo, A.M.; Gómez, M.; Murcia, M.D.; Serrano, J.; Otón, J. 2013. Caracterización de la membrana NF-97 mediante disoluciones salinas. Aplicación del modelo de Spiegler-Kedem-Kachalsky. *Afinidad*. LXX. 70 (561), 48-53. Obtenido de: <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/268539>.
- Hirschia, C. 2010. Introduction: Applications of social network analysis. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 4, 2-3. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.07.477>.
- Horton, R. E. (1940). An approach towards a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil Science Society Proceedings* 1940, 399-417. Obtenido de: <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj1941.036159950005000C0075x>
- Horton, R. E. 1933. The role of infiltration in the hydrologyc cycle. *Transaction American Geophysical Union*, 14, 446-460. Obtenido de: <https://doi.org/10.1029/TR014i001p00446>.

- Huang, X.-F., J. Ling, J.-C. Xu, Y. Feng, and G.-M. Li. 2011. "Advanced Treatment of Wastewater from an Iron and Steel Enterprise by a Constructed Wetland/Ultrafiltration/Reverse Osmosis Process." *Desalination* 269 (1–3): 41–49. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916410007551>. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.10.040>.
- Huang, R.Y.; Lin, V.J. 1968. Separation of liquid mixtures through the use of polymeric membranes. I. Permeability of binary organic liquid mixtures through polyethylene. *Journal Applied Polymer Science*. 12 (12), 2615-2631. Obtenido de: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/app.1968.070121204>.
- Instituto Nacional de Estadística INE. 2016. Censo de Población y Vivienda 2012. La Paz, Bolivia. Obtenido de: <https://www.ine.gob.bo/index.php/estadisticas-sociales/vivienda-y-servicios-basicos/censos-vivienda/>
- Ipek, U. 2005. "Removal of Ni(II) and Zn(II) from an Aqueous Solution by Reverse Osmosis." *Desalination* 174 (2): 161–69. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916405000524>. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.09.009>.
- Intaraburt, W.; Sangsanont, J.; Limpiyakorn, T.; Ruangrassamee, P.; Suttinon, P.; Suwannasilp, B.B. 2022. Feasibility Study of Water Reclamation Projects in Industrial Parks Incorporating Environmental Benefits: A Case Study in Chonburi, Thailand. *Water*, 14, 1172. <https://doi.org/10.3390/w14071172>
- Ismail, A.F., Khulbe, K.C., Matsuura, T. 2019. Reverse Osmosis, Chapter 1 - introduction— Do RO membranes have pores?. 1–24
- Jacobs, M. H., and A. E. Buijs. 2011. Understanding stakeholders' attitudes toward water management interventions: Role of place meanings, *Water Resour. Res.*, 47, W01503, 1-11. Obtenido de: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2009WR008366>. Doi:10.1029/2009WR008366
- Jodar, J., Cabrera, J., Martos-Rosillo, S., Ruiz-Constán, A., Gonzales-Ramón, A., Lambán, L., Custodio, E. 2017. Groundwater discharge in high-mountain watersheds: A valuable resource for downstream semi-arid zones. The case of the Bérchules River in Sierra Nevada (Southern Spain). *Science of the Total Environment*, 593-594, 760-772. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969717307131>. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.190>
- Jorquera, E., Weber, J., & Reyna, S. 2012. Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e Integrada. Obtenido de: https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&q=Jorquera%2C+E.%2C+Weber%2C+J.%2C+%26+Reyna%2C+S.+2012.+Revisi%C3%B3n+del+estado+del+arte+en+la+modelaci%C3%B3n+hidrol%C3%B3gica+distribuida+e+Integrada.+Obtenido+de&btnG=
- Judd, S., and Bruce J. 2003. *Membranes for Industrial Wastewater Recovery and Re-Use*. Elsevier. 2003.
- Kalkhajesh, Y.K., Arshad, R.R., Amerikhan, and H., Sami, M., 2012. Multiple linear regression, artificial neural network (MLP, RBF) and ANFIIS models for modeling the saturated hydraulic conductivity of tropical region soils (a case study: Khuzestan province: southwest Iran). *International journal of Agriculture: research and Review*, 2(3), 255-265.
- Kang, M., M. Kawasaki, S. Tamada, T. Kamei, and Y. Magara. 2000. "Effect of PH on the Removal of Arsenic and Antimony Using Reverse Osmosis Membranes." *Desalination* 131 (1–3): 293–98. Obtenido de:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916400900274>.
[https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)90027-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)90027-4).

- Kargas, G., Paraskevi, L., Konstantinos, A. and Petros, K. 2018. A Note on One- and Three-Dimensional Infiltration Analysis from a Mini Disc Infiltrometer. *Water*, 10, 1-11. Doi:10.3390/w10121783. Obtenido de: <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/12/1783>
- Kebede, A., Diekkrüger, B., and Moges, S. 2014. Comparative study of a physically based distributed hydrological model versus a conceptual hydrological model for assessment of climate change response in the Upper Nile, Baro-Akobo basin: a case study of the Sore watershed, Ethiopia. *International Journal of River Basin Management*, 12, 299-318.
- Kedem, O. y Katchalsky, A. 1958. Thermodynamic analysis of the permeability of biological membranes to non-electrolytes. *Biochim. Biophys. Acta*, 27, pp. 229-246.
- Kefeni, K.K., Msagati, T.A.M., & Mamba, B.B. 2017. Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review. *Journal of Cleaner Production*, 151, 475-493. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617305164>. Doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.082
- KennSen, 2020. <http://www.keensen.com/Products/ultralowpressur.html>
- Kim, S., K.H. Chu, Y.A.J. Al-Hamadani, C.M. Park, M. Jang, D.-H. Kim, M. Yu, J. Heo, and Y. Yoon. 2018. "Removal of Contaminants of Emerging Concern by Membranes in Water and Wastewater: A Review." *Chemical Engineering Journal* 335: 896–914. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894717319563> <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.11.044>.
- Koros, W. J., Ma, Y. H., and Shimidzu, T. 1996. Terminology for membranes and membrane processes (IUPAC Recommendation 1996). *Journal of Membrane Science*, 120, 149-159. Obtenido de: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1351/pac199668071479/html>.
- Kucera, J. 2010. *Reverse Osmosis: Design, Processes and Applications*. Salem, Massachusetts: John Wiley & Sons and Scrivener Publishing LLC.
- Khedr, M.G. (2008). Membrane methods in tailoring simpler, more efficient, and cost-effective wastewater treatment alternatives. *Desalination*, 222(1–3).135–145. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916407007631>. Doi: 10.1016/j.desal.2007.02.066
- Khulbe, K.C., and Matsuura, T. 2018. Removal of heavy metals and pollutants by membrane adsorption techniques. *Applied Water Science*. 8, 19. Obtenido de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13201-018-0661-6>. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0661-6>
- Lakzian, A., Aval, M.B. & Gorbazadeh, N., 2010. Comparison of pattern recognition, artificial neural network and pedotransfer functions for estimation of soil water parameters. *Notulae Scientia Biologicae*, 2(3), 114. Doi: <http://dx.doi.org/10.15835/nsb234737>. Obtenido de: <https://www.notulaebiologicae.ro/index.php/nsb/article/view/4737>
- Landaburu-Aguirre, J., García, V., Pongrácz, E., & Keiski, R.L. (2009). The removal of zinc from synthetic wastewaters by micellar-enhanced ultrafiltration: statistical design of experiments. *Desalination*, 240(1–3). 262–269. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916409000940>. Doi: 10.1016/j.desal.2007.11.077
- Leach, W. D. (2002). "Surveying Diverse Stakeholder Groups. *Society and Natural Resources*, 15(7), 641-649.

- Lee, S. and Lee, C-H. 2000. Effect of operating conditions on CaSO₄ scale formation mechanism in nanofiltration water softening. *Water Research* 34, 3854–3866. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135400001421>. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00142-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00142-1).
- Lee, S. and Lee, C-H. 1999. Analysis of CaSO₄ scale formation mechanism in various nanofiltration modules. *Journal of Membrane Science*. 163, 63-74. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376738899001568>. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(99\)00156-8](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(99)00156-8)
- León, C., 2021. Planteamiento de un proceso participativo para la propuesta y priorización de proyectos de desarrollo regional. caso de estudio departamento del meta en Colombia. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València.
- Ley 031, 2010, Ley Marco de Autonomía y Descentralización “Andrés Babiñez”. La Paz-Bolivia. Obtenida de: <http://chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcgclclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3a%2f%2fwww.planificacion.gob.bo%2fuploads%2fmarco-legal%2fley%2520N%25C2%25B0%2520031%2520DE%2520AUTONOMIAS%2520Y%2520DESCENTRALIZACION.pdf&clen=550719&chunk=true>
- LIDEMA., 2014. El Estado del medio Ambiente de Bolivia 2010. Fundación Milenio. Konrad Adenauer Stiftung e.V. Obtenido de: https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&q=EL+ESTADO+DEL+MEDIO+AMBIENTE+EN+BOLIVIA&btnG=
- Li, D., y Wang, H. 2010. Recent developments in reverse osmosis desalination membranes. *Journal of Materials Chemistry*, 20, 4551-4566. Obtenido de: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2010/jm/b924553g>.
- Li, Q., and Elimelech. M. 2006. Synergistic effects in combined fouling of a loose nanofiltration membrane by colloidal materials and natural organic matter. *Journal of Membrane Science* 278, 72-82. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376738805007775>. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.10.045>
- Lin, S., Elimelech, M. (2015). Operación de ósmosis inversa por etapas: configuraciones, eficiencia energética y potencial de aplicación. *Desalinización*. 366, 9 – 14
- Lonsdale, H., Merten, U., and Riley, R. 1965. Transport properties of cellulose acetate osmotic membranas [Abstract]. *J. Appl. Polym. Sci.* 9, 1341–1362. <https://doi.org/10.1002/app.1965.070090413>
- Lora, J., Fernández, M.S., and Soriano, E. 2002. Desalación de aguas (licenciado en Ciencias Ambientales). Valencia: Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia
- Lora, J.; López, M.; Cardona, S.; Fombuena, V.; Carbonell, A. 2020. Análisis del consumo Energético como factor clave en proyectos de desalación de agua de mar. 24th International Congress on Project Management and Engineering 2020. 04-004, 991-1003. Obtenido de: <http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/2486>.
- Loranger, S., M.C. Bibeau, and J. Zayed. 1994. “Manganese in Drinking Water and Its Contribution on Human Exposure | LE MANGANESE DANS L’EAU POTABLE ET SA CONTRIBUTION A L’EXPOSITION HUMAINE.” *Revue d’Epidemiologie et de Sante Publique* 42 (4): 315–321.
- Lujano, E., Sosa, J., Lujano, R., y Lujano, A. 2016. Modelación hidrológica semidistribuida en la región hidrográfica del Titicaca: caso de estudio cuenca del río Ramis, *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 18, 431-438. Obtenido de:

http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S2313-29572016000400006&script=sci_arttext. <http://dx.doi.org/10.18271/ria.2016.217>

- Lupo, P. 2010. Stakeholder involvement in water management: the role of the stakeholder analysis within participatory processes. *Water Policy*. 12, 675-694. Obtenio de: <https://iwaponline.com/wp/article/12/5/675/19958/Stakeholder-involvement-in-water-management-the>. <https://doi.org/10.2166/wp.2010.004>.
- Ma, L., Krishnan, R., & Montgomery, A. L. (2015). Latent homophily or social influence? an empirical analysis of purchase within a social network. *Management Science*, 61(2), 454– 473. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2014.1928>.
- Marshall, T. J., Holmes, J. W. and Rose, C.W., 1979. *Soil physics*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Mariani, C. and Pompêo, M. 2008. La calidad del sedimento: La contaminación por metales puede ser una amenaza para los seres vivos. *Revista Ciencia Hoy*, 18(107): 48-53.
- Niu, Q. 2018. Overview of the Relationship Between Aluminum Exposure and Health of Human Being. *Advances in Experimental Medicine and Biology*. 1091, 1-31
- Malamis, S., Katsou, E., Takopoulos, K., Demetriou, P., and Loizidou, M. 2012. Assessment of metal removal, biomass activity and RO concentrate treatment in an MBR-RO system. *Journal of Hazardous Materials*. 209 1–8. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389411013392>. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.10.085
- Matula, S., Miháliková, M., Lufinková, J., and Bálková, K. 2015. The role of the initial soil water content in the determination of unsaturated soil hydraulic conductivity using a tension infiltrometer. *Plant Soil Environ*, 61, 515-521. Obtenido de: https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&q=Matula%2C+S.%2C+Mih%2C%20A1likov%2C%20M.%2C+Lufinkov%2C%20J.%2C+and+B%2C%20A1%2C%20A5kov%2C%20K.+2015.+The+role+of+the+initial+soil+water+content+in+the+determination+of+unsaturated+soil+hydraulic+conductivity+using+a+tension+infiltrimeter.+Plant+Soil+Environ%2C+61%2C+515-521&btnG=. Doi: 10.17221 / 527/2015-PSE.
- Mattos, R. y Crespo, A. 2000. “Informe Nacional Sobre La Gestión Del Agua En Bolivia.” Recursos Hídricos, Agua Potable y Saneamiento. Obtenido de: <https://docplayer.es/29266333-Informe-nacional-sobre-la-gestion-del-agua-en-bolivia.html>. <https://doi.org/10.1177/0093854809334442>.
- Mayers, J. (2005). Análisis del poder de las partes interesadas. International Institute for Environment and Development.
- Medina Hoyos, R I. 2005. Contaminación Del Río Pilcomayo y El Moderno Proceso de Flotación En El Distrito Minero de Potosí- Bolivia: Una Propuesta Metodológica de Evaluación de La Contaminación Minera. 1–10. Obtenido de: https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&q=Medina+Hoyos%2C+R+I.+2005.+Contaminacio%2C%20Del+Ri%2C%20Pilcomayo+y+El+Moderno+Proceso+de+Flotacio%2C%20En+El+Distrito+Minero+de+Potosi%2C%20Bolivia%3a+Una+Propuesta+Metodolo%2C%20gica+de+Evaluacio%2C%20de+La+Contaminacio%2C%20Minera.+1%E2%80%9310&btnG=
- Medina R., J.P. Smolders Alfons, J. Lebrato Martinez, F.S. Coronel, y M. Orozco. 2006. CONTAMINACIÓN DE LA REPRESA DE SAN JACINTO (Tarija, Bolivia) INTERPRETACIÓN DEL INFORME TÉCNICO DE LA UNAM. *Campus Virtual de Salud Pública*. 2006. Obtenido de: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3a%2F%2F>

ervicios.ucbtja.edu.bo%3*8090%2Fsihita%2Fcss%2Fdocs%2FINF-00006%2FINF-00006_DOC.pdf&clen=325898&chunk=true

- Menezes-Filho, J.A., M. Bouchard, P. De N. Sarcinelli, and J.C. Moreira. 2009. "Manganese Exposure and the Neuropsychological Effect on Children and Adolescents: A Review." *Revista Panamericana de Salud Publica/Pan American Journal of Public Health* 26 (6): 541–48. Obtenido de: <https://doi.org/10.1590/S1020-49892009001200010>
- Memoria Anual, 2016. Cooperativa de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado de Tarija. Obtenido de https://files.cosaalt.org.bo/noticia/detalle_187_1.pdf
- Meschke, K., Hofmann, R., Haseneder, R., and Repke, J.-U. 2019. Membrane treatment of leached mining waste – A potential process chain for the separation of the strategic elements germanium and rhenium. *Chemical Engineering Journal*, 380, art. No. 122476. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894719318790>. Doi: 10.1016/j.cej.2019.122476
- Melián, N. 2015. Caracterización y evaluación del ensuciamiento en membranas de osmosis inversa con combinación de agentes ensuciantes (Tesis Doctoral). Universidad de las Palmas de Gran Canaria. Obtenido de: <https://sudocument.ulpgc.es/handle/10553/17090>
- Mitchell, R. K., Agle, B. R. & Wood, D. J. 1997. Toward a theory of stakeholder identification and salience: the principle of who and what really counts. *Academy of Management Review*, 22(4), 853–886. Obtenido de: <https://journals.aom.org/doi/abs/10.5465/amr.1997.9711022105>.
- Millevalle, J. Odendaal, P.E. y Wiesner, M.R. 1999. Tratamiento del agua por procesos de membrana. Mc Graw-Hill.
- Millarez, D. 2012. *Geografía Turística de Bolivia – La Cuenca del Plata*. Tarija, Bolivia. Obtenido de: <https://geografiabolivia.wordpress.com/recursos-hidrograficos/la-cuenca-de-la-plata/>
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua. 2012. Balance Hídrico Superficial de Bolivia. La Paz. Obtenido de: https://www.bivica.org/files/balance-hidrico_Bolivia.pdf
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua. 2017. Guía Metodológica para la elaboración de Balances Hídricos Superficiales de Bolivia (Publicación: Depósito legal: 4-1-877-16 P.O.) La Paz.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua. 2018. Balance Hídrico Superficial de la Cuenca del Guadalquivir. La Paz. Obtenido de: <http://vibh.mmaya.gob.bo/vibh/database/25;jsessionid=aae474befd0213aaba854ea988ea>
- Ministerio de Medio Ambiente de España. 2000. Libro Blanco del Agua de España. Obtenido de: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/libro-blanco-del-agua/>
- Mora, A., García-Gamboa, M., Sánchez-Luna, M.S., Gloria-García, L., Cervantes-Avilés, P., Mählknecht, J. 2021. A review of the current environmental status and human health implications of one of the most polluted rivers of Mexico: The Atoyac River, Puebla. *Science of The Total Environment*. Volume 782,146788. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721018568>. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146788>.
- Mostert, E. 2003. The European Water Framework Directive and water management research. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28, 523–527. Obtenido de:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706503000895>.
[https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(03\)00089-5](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(03)00089-5)

- Mohsen-Nia, M., P. Montazeri, and H. Modarress. 2007. "Removal of Cu²⁺ and Ni²⁺ from Wastewater with a Chelating Agent and Reverse Osmosis Processes." *Desalination* 217 (1–3): 276–81. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916407004912>.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.01.043>
- Mulyati, Sri and Syawaliah, Syawaliah. 2018. Removal of Cd²⁺ and Pb²⁺ heavy metals in water by using adsorption-ultrafiltration hybrid process. *Journal Teknologi*. 80, 17-22. Obtenido de: <https://journals.utm.my/jurnalteknologi/article/view/12738>.
Doi:10.11113/jt.v80.12738.
- Mulder, M., 1996. *Basic Principles of Membrane Technology*. Springer Science & Business Media, pp. 281–304. pp 246-248.
<https://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecaupves-ebooks/reader.action?docID=3102158&ppg=1>
- Murillo, J., y Navarro, J. 2011. Aplicación del modelo de Témez a la determinación de la aportación superficial y subterránea del sistema hidrológico Cornisa-Vega de Granada para su implementación en un modelo de uso conjunto. *Boletín Geológico y Minero*, 122, 363-388. Obtenido de: https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&q=Murillo%2C+J.+%2C+y+Navarro%2C+J.+2011.+Aplicaci%C3%B3n+del+modelo+de+T%C3%A9mez+a+la+determinaci%C3%B3n+de+la+aportaci%C3%B3n+superficial+y+subterr%C3%A1nea+del+sistema+hidrol%C3%B3gico+Cornisa-Vega+de+Granada+para+su+implementaci%C3%B3n+en+un+modelo+de+uso+conjunto.+Bolet%C3%Adn+Geol%C3%B3gico+y+Minero%2C+122%2C+363-388.&btnG=
- Nemerow, N y Dasgupta, A. 1998. *Tratamiento de Vertidos Industriales Peligrosos*. Ed. Dias de Santos. Madrid, 822 pp.
- Norma Boliviana 496. 2005. Agua Potable-Toma de Muestras, Obtenido de: chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3a%2F%2Fwww.anesapa.org%2Fdata%2Ffiles%2FNB496AP_TomaMuestras.pdf&clen=3575844&chunk=true.
- Norma Boliviana 512. 2010. Agua Potable-Reglamento Nacional para el control de la calidad de agua para consumo humano. Obtenido de: <chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3a%2F%2Fwww.aaps.gob.bo%2Fimages%2FmarcoLegal%2FresolucionesMinisteriales%2FRM-104.pdf&clen=36707438&chunk=true>.
- Norma ISO/IEC 17025: 1999. "Requisitos Generales para la Competencia de los Laboratorios de Ensayo y de Calibración".
- Nwankwoala, H.O., Amadi, A.N., Oborie, E., Ushie, F.A., 2014. Hydrochemical factors and correlation analysis in groundwater quality in Yenagoa, Bayelsa State, Nigeria. *Appl. Ecol. Environ. Sci.* 2 (4), 100–105. Obtenido de: https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&q=Hydrochemical+factors+and+correlation+analysis+in+groundwater+quality+in+Yenagoa%2C+Bayelsa+State%2C+N&btnG=. DOI: 10.12691/aees-2-4-3
- Ochando-Pulido, J.M., S. Rodriguez-Vives, G. Hodaifa, and A. Martinez-Ferez. 2012. "Impacts of Operating Conditions on Reverse Osmosis Performance of Pretreated Olive Mill Wastewater." *Water Research* 46 (15): 4621–32. Obtenida de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135412004393>.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.06.026>

- Ogada, J., Krhoda, G., Van Der Veen, A., Marani, M. & Richards van Oel, P. (2017). Managing resources through stakeholder networks: collaborative water governance for Lake Naivasha basin, Kenya. *Water International*, 42, 271-290.
- Oh, H-J., Choung, Y-K., Lee, S., Choi, J-S, Hwang, T-M and Kim. J-H. 2009. Scale formation in reverse osmosis desalination: model development. *Desalination* 238, 333-346. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916408007649>. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.10.005>
- Organización Mundial de la Salud, 2011. Guías para la calidad del agua de consumo humano. Obtenido de: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3a%2f%2fapps.who.int%2Firis%2Fbitstream%2Fhandle%2F10665%2F272403%2F9789243549958-spa.pdf%3D1&clen=6158614&chunk=true](https://www.who.int/firis/bitstream/handle/10665/272403/9789243549958-spa.pdf?3D1&clen=6158614&chunk=true)
- Organización de las Naciones Unidas. 2021. Objetivos del Milenio (ODM 7). Obtenido de: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Organización de los Estados Americanos. 1997. *Cuenca del Plata – Estudios para su Planificación y Desarrollo – República de Bolivia – Cuenca del Río Bermejo III – Zona Boliviana*. Tarija, Bolivia.
- Overseas Development Administration. 1995a. Guidance Note on How to Do Stakeholder Analysis of Aid Projects and Programmes.
- Overseas Development Administration, 1995b. Note on Enhancing Stakeholder Participation in Aid Activities. Obtenido de: <https://www.eldis.org/document/A14583>
- Pahl-Wostl, C. 2007. The implications of complexity for integrated resources management. *Environmental Modelling and Software*. 22, 561-569. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815206000417>. Doi:10.1016/j.envsoft.2005.12.024
- Palé, S., Wellens, J., Traoré, F., Roncoli, C., Mohamed-Sallah, A., Zangré, A. & Tychon, B. 2021. Testing an open app-based water management information system and its uptake among stakeholders in the Upper-Comoé river basin (Burkina Faso). *Water International*, 46, 417-431. <https://doi.org/10.1080/02508060.2021.1897382>.
- Pawlak, Z., P.S. Cartwright, A. Oloyede, and E. Bayraktar. 2010. Removal of Toxic Arsenic and Antimony from Groundwater Spiro Tunnel Bulkhead in Park City Utah Using Colloidal Iron Hydroxide: Comparison with Reverse Osmosis. *Advanced Materials Research*. Vol. 83–86. Obtenido de: <https://www.scientific.net/AMR.83-86.553>. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.83-86.553>.
- Parr, J. F. and Bertrand, A. R. 1960. Water infiltration in soils. *Advances in Agronomy*, 12, 311-363. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60086-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60086-3) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065211308600863>
- Peña, N., Gallego, S., Del Vigo, F. and Chesters, S.P. 2013. Evaluating impact of fouling on reverse osmosis membranes performance. *Desalination and Water Treatment* 51, 958–968. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.699509>
- Pontié, M.; Dach, H.; Leparc, J.; Hafsi, M.; Lhassani, A. 2008. Novel approach combining physico-chemical characterizations and mass transfer modelling of nanofiltration and low-pressure reverse osmosis membranes for brackish water desalination intensification. *Desalination*. 221, 174-191. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916407006911>. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.075>.
- Plan Departamental del Agua de Tarija, 2013. Gobernación del Departamento de Tarija, obtenido de: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3a%2f%2fapps.who.int%2Firis%2Fbitstream%2Fhandle%2F10665%2F272403%2F9789243549958-spa.pdf%3D1&clen=6158614&chunk=true](https://www.eldis.org/document/A14583)

extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3a%2F%2Fservicios.ucbtja.edu.bo%3a8090%2Fsihita%2Fcss%2Fdocs%2FPLN-00023%2FPLN-00023_DOC.pdf&clen=11076277&chunk=true

Plan Maestro Integral de Agua y Saneamiento del Valle Central de Tarija, 2015. Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia. Obtenido de: <http://servicios.ucbtja.edu.bo:8090/sihita/principal.jsp?codigo=PLN-00030>

Prell, C., Hubacek, K., & Reed, M. 2009. Stakeholder Analysis and Social Network Analysis in Natural Resource Management. *Society & Natural Resources*, 22(6), 501–518. <https://doi.org/10.1080/08941920802199202>.

Programa Estratégico de Acción – PEA, 1999, Estudio Integral del Saneamiento Ambiental del río Guadalquivir, Tarija, Bolivia. Obtenido de: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3a%2F%2Fservicios.ucbtja.edu.bo%3a8090%2Fsihita%2Fcss%2Fdocs%2FFPRY-00004%2FFPRY-00004_DOC.pdf&clen=11285699&chunk=true

Qasim, M., Badrelzaman, M., Darwish, N. N., Darwish, N. A. and Hilal, N. 2019. Reverse osmosis desalination: A state-of-the-art review. *Desalination*. 459, 59-104. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916418325037>. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.02.008>

Quaghebeur, W., Mulhern, R.E., Ronsse, S., Heylen, S., Blommaert, H., Potemans, S., Valdivia Mendizábal, C., and Terrazas García, J. 2019. Arsenic contamination in rainwater harvesting tanks around Lake Poopó in Oruro, Bolivia: An unrecognized health risk. *Science of The Total Environment*. 688, 224–230. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719326038>. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.126>

Quintana, F. 2010. Análisis estadístico de los parámetros DQO, DBO5 y SS de las aguas residuales urbanas en el ensuciamiento de las membranas de ósmosis inversa. Tesis Doctoral. Universidad de las Palmas de Gran Canaria. Obtenido de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=89102>.

Ramos Ramos, O.E., Cáceres, L.F., Ormachea Muñoz, M.R., Bhattacharya, P., Quino, I., Quintanilla, J., Sracek, O., Thunvik, R., Bundschuh, J. and García, M.E. 2012. “Sources and Behavior of Arsenic and Trace Elements in Groundwater and Surface Water in the Poopó Lake Basin, Bolivian Altiplano. *Environmental Earth Sciences* 66 (3): 793–807. Obtenido de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-011-1288-1>. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1288-1>.

Ramírez, J. 2013. La participación ciudadana en la democracia. In *Psychology Applied to Work: An Introduction to Industrial and Organizational Psychology*, Tenth Edition Paul (Vol. 53, Issue 9). Instituto Electoral y de Participación Ciudadana de Jalisco. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.

Raudkivi, A.J. (1979). *Hydrology*. Oxford. Pergamon Press. Obtenido de: [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=lu3fBAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Raudkivi,+A.J.+\(1979\).+Hydrology.+Oxford.+Pergamon+Press.&ots=ht36D7wanj&sig=n08oFE2Ukdegq2qR2b15myJo03E#v=onepage&q=Raudkivi%20%20A.J.%20\(1979\).%20Hydrology.%20Oxford.%20Pergamon%20Press.&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=lu3fBAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Raudkivi,+A.J.+(1979).+Hydrology.+Oxford.+Pergamon+Press.&ots=ht36D7wanj&sig=n08oFE2Ukdegq2qR2b15myJo03E#v=onepage&q=Raudkivi%20%20A.J.%20(1979).%20Hydrology.%20Oxford.%20Pergamon%20Press.&f=false)

Rawls W., Brakensiek D. and Miller N., 1983. Green-Ampt infiltration parameters from soils data. *Journal of Hidraulic Enginnering*, 109, 62-70. Obtenido de: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:1\(62\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:1(62)). Doi: 10.1061 / (ASCE) 0733-9429 (1983) 109: 1 (62).

- Ray, S., Chen, S., Sangeetha, D., Chang, H., Thanh, C., Le, Q., and Ku, H. 2018a. Developments in forward osmosis and membrane distillation for desalination of waters. *Environ. Chem. Lett.* 16, 1247–1265. Obtenido de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-018-0750-7>. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0750-7>
- Ray, S., Chen, S., Nguyen, N., Nguyen, H., Dan, N., and Thanh, B 2018b. Exploration of polyelectrolyte incorporated with Triton-X 114 surfactant based osmotic agent for forward osmosis desalination. *J. Environ.Manag.* 209, 346–353. Obtenido de: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.086>
- Real Decreto 817. 2015. criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental
- Reed, M., Graves, A., Dandy, N., Póstumo, H., Hubacek, K., Morris, J., Prella, C., Quienn, C. and Stringer L. 2009. Who's in and why? A typology of stakeholder analysis methods for natural resource management. *Journal of Environmental Management.* 90, 1933-1949. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479709000024>. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.01.001>
- Roche, M-A, Fernandez, C., Rivera, A., Peña, J., Rada, E. y Vargas, J., 1992. Balance Hídrico Superficial de Bolivia. Obtenido de: https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers10-12/010020120.pdf
- Roger, P. and Hall, A. 2003. Effective Water Governance. Global Water Partnership Technical Committee (TEC). No. 7. Obtenido de: <http://dlc.dlib.indiana.edu/dlc/handle/10535/4995>
- Ruiz, S. G., Zerrouk, M. H., y Alonso, J. M. Q. 2016. Ensuciamiento y limpieza de membranas empleadas en la desalación de aguas. *Tecnoaqua*, (17), 104-117. Obtenido de: https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&q=Ruiz%2C+S.+G.%2C+Zerrouk%2C+M.+H.%2C+y+Alonso%2C+J.+M.+Q.+2016.+Ensuciamiento+y+limpieza+de+membranas+empleadas+en+la+desalaci%C3%B3n+de+aguas.+Tecn+oaqua%2C+%2817%29%2C+104-117&btnG=.
- Runkel, A.A., Križanec, B., Lipičar, E., Baskar, M., Hrženjak, V., Kodba, Z.C., Kononenko, L., Kanduč, T., Mazej, D., Tratnik, J.S. and Horvat, M. 2021. Organohalogens: A persisting burden in Slovenia?. *Environmental Research.* 198, 111224. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935121005181>. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111224>
- Sablani, S., Goosen, M.F.A, Al-Belushi, R. and Wilf, R. 2001. Concentration polarization in ultrafiltration and reverse osmosis: a critical review. *Desalination.* 141(3), 269-289. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916401850050>. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)85005-0](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)85005-0)
- Sadhvani, J.J. 2002. Introducción a la desalación de aguas, chapter Proceso de ósmosis inversa, pag. 181–227. Universidad de las Palmas de Gran Canaria.
- Sahachaiyunta, P., Koo, T. and Sheikholeslami, R. 2002. Effect of several inorganic species on silica fouling in RO membranes. *Desalination.* 144, 373-378. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916402003466>. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00346-6](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00346-6)

- Salcedo-Díaz, R. 2006. Aplicación de la interferometría holográfica al estudio de la capa de polarización en osmosis inversa. Efecto de la convección natural [Tesis Doctoral]. Obtenida de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=68704>
- Salcedo-Díaz, R., García-Algado, P., García-Rodríguez, M., Fernández-Sempere, J. and Ruiz-Bevía, F. 2014. Visualization and modeling of the polarization layer in crossflow reverse osmosis in a slit-type channel. *Journal of Membrane Science*. 456, 21-30. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376738814000325>. <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2014.01.019>
- Sanchez, P. y Sanz, A. 1985. Química Analítica Básica, Introducción a los Métodos de Separación. Universidad de Oviedo. Ediciones Simancas. Obtenido de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=191655>
- Salam, M.A., Noguchi, T. 2006. Evaluating capacity development for participatory forest management in Bangladesh Sal forests based on '4Rs' stakeholder analysis. *Forest Policy and Economics* 8, 785-796. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389934105000237>. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2004.12.004>
- Savage, G.T., Nix, T.H., Whitehead, C.J. and Blair, J.D., 1991. Strategies for assessing and managing organizational stakeholders. *Academy of Management Executive*. 5,61-75.
- Saravanan, A., Senthil Kumar, P., Jeevanantham, S., Karishma, S., Tajsabreen, B., Yaashikaa, P.R., and Reshma, B. 2021. Effective water/wastewater treatment methodologies for toxic pollutants removal: Processes and applications towards sustainable development. *Chemosphere*. 280, 130595. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653521010663>. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130595>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia [SENAMHI]. 2019. Base de datos Sistema Meteorológico-SISMET. Obtenido de: <http://senamhi.gob.bo/index.php/inicio>
- Servicio Nacional de Áreas Protegidas (SERNAP), 2019. Bolivia.
- Sihag P., Tiwari, N.K. and Ranjan S., 2017. Prediction of unsaturated hydraulic conductivity using adaptive neuro- fuzzy inference system (ANFIS). *Indian Society of Hydraulics – Journal of Hydraulic Engineering*, 1-11. Obtenido de: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09715010.2017.1381861>
- Singh, Rachana, Samiksha Singh, Parul Parihar, Vijay Pratap Singh, and Sheo Mohan Prasad. 2015. "Arsenic Contamination, Consequences and Remediation Techniques: A Review." *Ecotoxicology and Environmental Safety* 112 (February). Academic Press: 247-70. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651314004746>. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2014.10.009>
- Singh, Rh., Dutta, R., Kalamdhad, AS. And Kumar, B. 2019. An investigation on the variability of water quality and identification of ideal monitoring locations through the use of entropy-based disorder indices. *Science of the Total Environment*. 647, 1444-1455. Obtenido de: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718329590?casa_token=oMMe9tkHMI0AAAAA:c38wmHWu_Ekve1qMh3RsnPOzjjJNddse9S6uOuOzNd-LHOrd9BEHjEb0Bot-loWFQnVDqMDizq98. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.463>
- Simate, G.S., and Ndlovu, S. 2014. Acid mine drainage: Challenges and opportunities. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2 (3), 1785-1803. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343714001638>. Doi: 10.1016/j.jece.2014.07.021

- Subramani, S. y Panda. 2014. R. Statistical regression and modeling analysis for reverse osmosis desalination process. *Desalination*, 351, 120-127. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.07.038>
- Sundaramoorthy, S., Srinivasan, G. and Murthy, D. 2011. An analytical model for spiral wound reverse osmosis membrane modules: Part I—Model development and parameter estimation. *Desalination*. 280, 403-411. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916411002657>. Doi:10.1016/j.desal.2011.03.047
- Sherwood, T. K.; Brian, P. L. T.; Fisher, R. E., 1967. Desalination by reverse osmosis. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 6(1), 2-12.
- Strosnider, W.H., and Nairn, R.W. 2010. "Effective Passive Treatment of High-Strength Acid Mine Drainage and Raw Municipal Wastewater in Potosí, Bolivia Using Simple Mutual Incubations and Limestone." *Journal of Geochemical Exploration* 105 (1-2): 34-42. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375674210000385>. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.02.007>.
- Srivastava, N.K., and Majumder, C.B. 2008. Novel biofiltration methods for the treatment of heavy metals from industrial wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 151(1): 1-8. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389407013933>. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.101
- Shirazi, S., Lin, C. and Chen, D. 2010. Inorganic fouling of pressure-driven membrane processes-A critical review. *Desalination*. 250, 236-248. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916409007541>. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.02.056>.
- Spiegler, K. and Kedem, O. 1966. Thermodynamics of hyperfiltration (reverse osmosis): Criteria for efficient membranes. *Desalination*. 1, 311-326. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)80018-1](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)80018-1)
- Spiegler, K., Katchalsky., 1963. Permeability of Composite Membranes Part 1.-Electric Current, Volume Flow and Flow of Solute through Membranes. Instituto de Ciencias Weizmann, Rehovot, Israel. 59, 1918-1930.
- Statgraphics Centurion 13. <https://statgraphics.net/>
- Taguchi, G., Chowdhury, S. and Wu, Y. 2005. TAGUCHI'S QUALITY ENGINEERING HANDBOOK" New Jersey. John Wiley and Sons. ISBN: 047-141-334-8.
- Tellez Rojas, A., Paredes Arquiola, J., y García Hernandez, J. 2016. Modelación hidrológica del sistema de explotación Gállego-Cinca de la confederación hidrográfica del Ebro mediante el modelo de precipitación-escorrentía HBV (Tesis Fin de Master, Universitat Politècnica de València). Obtenida de: <https://riunet.upv.es/handle/10251/63382>.
- Témez, J. 1977. Modelo Matemático de Transformación Precipitación-Aportación. Asociación de Investigación Industrial Eléctrica. Madrid
- Torres P., Cruz C. and Patiño P. 2009. Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*. Colombia. 8, 79-94. Obtenido de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4845739>.
- Tort-Martorell, J. 1985. Diseños factoriales fraccionales – aplicación al control de calidad mediante el diseño de productos y procesos. Tesis Doctoral – Universidad Politécnica de Catalunya.
- Trawick, P. 2003. Against the privatization of water: An indigenous model for improving existing laws and successfully governing the commons. *World Development*, 31, 977-996. Obtenido de:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305750X03000494>.
Doi:10.1016/S0305-750X(03)00049-4

Thayer, J.S., and Brinckman, F.E. 1982. The biological methylation of metals and metalloids, *Advances in Organometallic Chemistry*, 20, 313 – 356. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065305508605249>.
[https://doi.org/10.1016/S0065-3055\(08\)60524-9](https://doi.org/10.1016/S0065-3055(08)60524-9)

UCINET Software. 2022. Analytic Technologies.
<https://sites.google.com/site/ucinetsoftware/home>

UE. 2011. Preparación del Perfil Ambiental País (PAP) de Bolivia. “Programa de Naciones Unidas Para El Desarrollo – Bolivia.” 2018. Obtenido de: https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&q=Perfil+Ambient+al+de+Bolivia&btnG=

UNESCO. 1981. Métodos de cálculo del balance hídrico (Guía internacional de investigación y métodos-Instituto de Hidrología de España /unesco). Obtenido de: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000011523>

Ujang, Z., and G.K. Anderson. 1996. Application of Low-Pressure Reverse Osmosis Membrane for Zn²⁺ and Cu²⁺ Removal from Wastewater. *Water Science and Technology*. Vol. 34. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0273122396008116>.
[https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(96\)00811-6](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(96)00811-6)

Ungureanu, G., S. Santos, R. Boaventura, and C. Botelho. 2015. “Arsenic and Antimony in Water and Wastewater: Overview of Removal Techniques with Special Reference to Latest Advances in Adsorption.” *Journal of Environmental Management* 151: 326–42. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479714006306>.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.12.051>

Urgun-Demirtas, M., P.L. Benda, P.S. Gillenwater, M.C. Negri, H. Xiong, and S.W. Snyder. 2012. “Achieving Very Low Mercury Levels in Refinery Wastewater by Membrane Filtration.” *Journal of Hazardous Materials* 215–216: 98–107. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389412001975>.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.02.040>

Vijayalakshmi, A., Arockiasamy, D.L., Nagendran, A., and Mohan, D. 2008. Separation of proteins and toxic heavy metal ions from aqueous solution by CA/PC blend ultrafiltration membranes. *Separation and Purification Technology*, 62(1). 32–38. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586608000075>.
Doi: 10.1016/j.seppur.2007.12.019.

Villena E., Cárdenas M., Rodríguez M., y Stolpa D., 2018a. Análisis de datos, clasificación hidrológica y cartografía de suelos para Tarija – Mapas de caracterización de suelos Subcuencas de la Vittoria y Quebrada del Monte. Tesis no publicada. Universidad Católica Boliviana, Tarija.

Villena, E., Torregrosa, J.I., and Lo Iacono, V. 2018b. State of the art of hydrological model and suitability in basin with limited information. 22d International Congress on Project Management and Engineering, Madrid, España. 04-013, 1229-1241. Obtenido de: <http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/1638>

Villena E., Stolpa D., Torregrosa J., Lo Iacono, V., Villena, J. Rodríguez, M., Cárdenas, M., Sánchez, O., Blades, I., and Garzón, I. 2019a. Protocol to Measure infiltration of the soils of the Alta Cuenca del Guadalquivir, Tarija, Bolivia. 23d International Congress on Project Management and Engineering, Malaga, España. 04-009, 1072-1084. Obtenido de: <http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/2316>

- Villena E., Narvaez, D., Gómez B., Paredes M., Subieta K. y Stolpa D., 2019b. Análisis de datos, clasificación hidrológica y cartografía de suelos para Tarija – Mapas de caracterización de suelos Subcuencas de San Jacinto 1 y San Jacinto 2. Tesis no publicada. Universidad Católica Boliviana, Tarija.
- Villena E., Torregrosa J., Lo Iacono, V. and Stolpa D., 2019c. The Measurement of the infiltration subcuencas f the corner of the Victoria and the Mount of the Alta Cuenca del Guadalquivir. 23d International Congress on Project Management and Engineering, Malaga, España. 04-006, 1033-1045. Obtenido de: <http://dspace.aeipro.com/xmlui/handle/123456789/2314>
- Villena E., Alvizuri, P., Torregrosa J., Lo Iacono, V., Villena, and Lora, J. 2020a. Reverse Osmosis Pilot Plant to Removal Heavy Metal Pb, As, Zn, and Mn in Consumption Waters in Bolivia. 24d International Congress on Project Management and Engineering, Alcoi, España. 04-032, 1072-1084. Obtenido de: <http://dspace.aeipro.com/xmlui/handle/123456789/2509>.
- Villena E., Alvizuri, P., Torregrosa J., Lo Iacono, V., Villena, and Lora, J. 2021. Calibration and Simulation of the water balance of the Guadalquivir Basin Using Parameters of the soils obtained in field work. 25d International Congress on Project Management and Engineering, Alcoi, España. Obtebido de: <http://dspace.aeipro.com/xmlui/handle/123456789/2971>
- Villena E., Alvizuri, P., Torregrosa J., Lo Iacono, V., Villena, and Lora, J. 2021b. The Role of Stakeholders in Water Management in the Guadalquivir and Milluni Basins in Bolivia. 25d International Congress on Project Management and Engineering, Alcoi, España. Obtenido de: <http://dspace.aeipro.com/xmlui/handle/123456789/2970>
- Villena-Martínez E.M., Alvizuri-Tintaya, P.A., Lora-García, J., Torregrosa-López J.I., Lo Iacono-Ferreira, V.G., 2022a. A Comparative Analysis of Statistical Models and Mathematics in Reverse Osmosis Evaluation Processes as a Search Path to Achieve Better Efficiency. *Water*. 14(16), 2485. <https://doi.org/10.3390/w14162485>
- Villena-Martínez E.M., Alvizuri-Tintaya, P.A., Lora-García, J., Torregrosa-López J.I., Lo Iacono-Ferreira, V.G., 2022b. Reverse Osmosis Modeling Study of Lead and Arsenic Removal from Drinking Water in Tarija and La Paz, Bolivia. *Procesess*. 10(9), 1889. <https://doi.org/10.3390/pr10091889>
- Villón, M. B. 2002. *Hidrología*. Perú: MaxSoft.
- Voutchkov, N. 2013. *Desalination 189únel189189ring. Planning and Design*. 1st ed. New York (New York), McGraw-Hill.
- Water-Pollution Organization, 2020. *Guía de Contaminación del Agua*. Obtenido de: <https://www.water-pollution.org.uk/>
- Water Governance Facility (2020). *Programa de las Naciones Unidas*. Obtenido de: <https://www.watergovernance.org/water-governance/>
- Wei, W., Zou, X., Ji, X., Zhou, R., Zhao, K., and Wang, Y. 2021. Analysis of Concentration Polarisation in Full-Size Spiral Wound Reverse Osmosis Membranes Using Computational Fluid Dynamics. *Membranes*. 11, 353. Obtenido de: <https://www.mdpi.com/2077-0375/11/5/353>. <https://doi.org/10.3390/membranes11050353>
- World Health Organization WHO. 2006. *Guidelines for Drinking-Water Quality: First Addendum to Third Edition. Volume 1, Recommendations.* Vol. 1. Urban Water. (1), 183. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1462075800000066?via%3Dihub>. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00006-6](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00006-6)

- WHO, 2012. World Health Organization (WHO). Global Burden of Disease. WHO Press, Geneva, Switzerland.
- WHO/UNICEF, 2015. World Health Organization (WHO) and United Nations Children's Fund (UNICEF), Progress on Sanitation and Drinking Water e 2015 Update and MDG Assessment, vol. 2015. WHO, Switzerland. Obtenido de: http://www.unicef.org/publications/index_82419.html.
- Yadav S.S. and Rajesh K. 2011. Monitoring Water quality of Kosi River in Rampur District, Uttar Pradesh, India. Pelagia Research Library. 2, 197-2011. Obtenido de: https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&q=Yadav+S.S.+and+Rajesh+K.+2011.+Monitoring+Water+quality+of+Kosi+River+in+Rampur+District%2C+Uttar+Pradesh%2C+India.+Pelagia+Research+Library.+2%2C+197-2011.+Retrieved+from&btnG=
- Yang, L., Shun-Chan, F. and Scheffran Y. 2016. Climate change, water management and stakeholder analysis in the Dongjiang River basin in South China. *International Journal of Water Resources Development*. 34:2, 166-191. Obtenido de: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07900627.2016.1264294>. DOI: 10.1080/07900627.2016.1264294.
- Zak. S. 2012. Treatment of the processing wastewaters containing heavy metals with the method based on flotation. *Ecological Chemistry and Engineering*. 19(3), 433–438. Obtenido de: <https://www.proquest.com/docview/1322295973?pq-origsite=gscholar&fromopenview=true>. DOI:10.2478/v10216-011-0033-8
- Zhao, M., Xu, Y., Zhang, C., Rong, H., and Zeng, G. 2016. New trends in removing heavy metals from wastewater. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100(15). 6509-6518. Obtenido de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00253-016-7646-x> doi:10.1007/s00253-016-7646-x
- Zhang, L., Wu, Y., QU, X., LI, Z. and NI, J. 2009. "Mechanism of Combination Membrane and Electro-Winning Process on Treatment and Remediation of Cu²⁺Polluted Water Body." *Journal of Environmental Sciences* 21 (6): 764–69. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001074208623384>. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)62338-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)62338-4)
- Zhang, R. 1997a. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, 61, 1024-1030. Obtenido de: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj1997.03615995006100040005x> doi: 10.2136 / sssaj1997.03615995006100040005x.
- Zhang, R. (1997b). Infiltration models for the disk infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, 61, 1597-1603. Obtenido de: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj1997.03615995006100060008x>. doi10.2136 / sssaj1997.03615995006100060008x.
- Zhang, R. 1998. Estimating soil hydraulic conductivity and macroscopic capillary length from the disk infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, 62, 1513-1521. Obtenido de: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj1998.03615995006200060006x>. doi10.2136 / sssaj1998.03615995006200060006x.

ANEXOS

7.1. ANEXO 1: Planillas de cálculo del balance hídrico

ANEXO 1. 1: Series anuales de precipitación anual por estaciones luego del completado

Año	Chocloca	Pinos S.	S. Andrés	S. Jacinto	Turumayo	Aeropuerto	El Tejar	Campanario	Coimata	Tucumillas
1980-81	877.7	1454.7	1247.6	598.9	881.3	564.8	519.3	375.4	524	769
1981-82	653.6	1658.3	1167.6	686.8	925.7	726	744.7	437.2	593.2	1017.5
1982-83	578.4	1136.8	1051.1	623.2	805.3	554.9	676.2	390.2	813.8	862.9
1983-84	431.2	878.7	680.1	332.8	569.7	314.1	355.1	306.4	460.8	679
1984-85	667.5	1074.7	1273.1	690	1122.8	679.5	759.9	503.3	945.5	1541.9
1985-86	659.2	887.6	1358	707.4	990	664.5	740.4	383.1	863.8	870
1986-87	749.1	766.5	1141.6	719.3	978.9	688	806.8	391.2	841.2	541
1987-88	663.2	406.4	833.3	602.7	746.8	563.9	565.5	350.5	644.9	587
1988-89	615.5	820.5	1126	570.8	769.8	660.5	733.7	374.1	910.2	326
1989-90	588.1	495.1	1081.3	536.7	671.9	566.6	578.5	348.5	684.1	400
1990-91	674.7	869.7	1152.9	653.3	805.6	556.6	554.2	372.8	695.1	514.1
1991-92	696.3	1305.9	1112	604.2	828.5	685.4	743.4	335.9	787.8	896.1
1992-93	598.9	1150.7	1017.8	487	807	630.1	579	384.4	771	655.4
1993-94	700.4	1172.7	883.3	562.2	834.1	629	619.6	320.7	674.2	633.8
1994-95	620	992.8	1086.8	449.6	784.6	513.5	571.1	418.5	723.1	592.4
1995-96	699.7	1030.4	1101.4	551.5	909.4	521.3	562.9	354.5	805.6	783.4
1996-97	758.3	1093.4	1237.9	642.5	858	680.4	865.2	466.4	839.4	675.1
1997-98	635.6	1046.8	754.9	637.6	752.9	476.6	602.1	425.7	555.9	772.3
1998-99	441.4	1045.5	891.5	376	519.8	399	497.7	291.1	489.1	652.5
1999-00	582	1180.4	1199.6	519.4	887.2	628.7	776.4	348.3	744.8	920
2000-01	758.7	1663.2	1143.1	529.6	740.7	593.4	695.3	390.3	731.6	825.1
2001-02	820.4	1111	1167.3	786.2	1060.5	662.7	704	372.8	794.2	901.2
2002-03	711.3	1508.7	1359.7	854.3	881	562.7	570.2	301.1	869.8	1012

Año	Chocloca	Pinos S.	S. Andrés	S. Jacinto	Turumayo	Aeropuerto	El Tejar	Campanario	Coimata	Tucumillas
2003-04	660.8	1117	1016.2	645.9	869.1	531.6	562.4	256.4	665.5	803.6
2004-05	607.9	1359.4	1022.6	591.3	763.1	523.2	574.4	270	601.4	787.9
2005-06	766.3	1247.8	1240.2	654.7	976.1	617.6	689.9	322	807.3	764.2
2006-07	692.2	1251.2	1157.5	654.1	863.6	598.9	631.4	433.8	672.2	859.5
2007-08	834.2	1466.8	1342	716.5	937.8	605	662.9	344.3	760.3	889.5
2008-09	858.9	1394.2	1392.1	793.6	1094.1	698.4	756.8	454.7	888.5	1108.9
2009-10	757	1181	1143.2	592.4	755	516.3	642.2	431.9	853.7	863.7
2010-11	416.9	971.7	791.3	367	590.3	479.1	448.7	319.9	654.9	647.4
2011-12	749.7	1207.5	1034.4	652.5	746.1	657.7	707.7	383.6	940.4	938.6
2012-13	758.6	1123.2	1090.8	670.4	633.5	571.7	804	466	839.3	914.2
2013-14	598.6	1048.1	883.7	426.2	582.1	427	591.5	250.9	479.9	669.3
2014-15	655.9	1180.9	847.4	563.9	564.8	471.6	599	373.4	380.8	579.8
2015-16	884.2	1667.1	1030.7	729.9	834.9	759	1212.5	383.7	393.8	792.5
2016-17	515.5	1161.3	570.2	431.9	500.7	387.4	545.8	190.6	326.6	584

ANEXO 1. 1: Series anuales de Precipitación por estaciones luego del completado – continuación

Año	Sella	Yesera	Trancas	Tomayapo	L. Cancha
1980-81	429	566.9	823.4	369.2	466.5
1981-82	535.8	875.2	1016.3	412.7	464.4
1982-83	544.6	707.8	844.2	190.9	394.9
1983-84	328.5	403.1	662.7	128	172.7
1984-85	682.8	986.9	1206.4	409.4	769.9
1985-86	727.1	716.7	931.9	391.6	384.5
1986-87	771.9	820.3	932.7	153.5	256.6
1987-88	533.8	599.1	807.8	198.7	275.9
1988-89	742.8	795.3	719.6	246.1	355.8
1989-90	537.3	633.8	640.5	139.2	302.4
1990-91	747.2	696.7	817.7	238	320.5
1991-92	595.7	620.5	889.4	271.8	405.5
1992-93	584	597	826.4	323.9	784.9
1993-94	640.8	669	858.6	264.8	638.5
1994-95	504.2	469.5	780.4	150.2	545.6
1995-96	665.5	597	923.3	180.1	584
1996-97	603.3	701.4	845.5	219.9	729.6
1997-98	586.9	616.5	817.1	164.1	754.5
1998-99	481.2	494.5	521.5	109.3	432.8
1999-00	625.8	652.5	887.2	170.6	762.3
2000-01	644.1	632.5	740.7	380.2	577
2001-02	658.8	603	1060.5	424.6	687.6
2002-03	542.4	505.5	881	169.2	431.7
2003-04	466.3	684.2	869.1	478	513.3
2004-05	532.1	561.1	763.1	579.3	633.2
2005-06	526.3	693.8	976.1	185.6	434.8

Año	Sella	Yesera	Trancas	Tomayapo	L. Cancha
2006-07	648.8	737	863.6	213.2	745.6
2007-08	687.1	717.5	937.8	221.5	727.5
2008-09	784.2	933.8	1094.1	276.9	856
2009-10	524.1	603.5	755	180	483.9
2010-11	627.5	525	590.3	309	391
2011-12	696.5	826.5	746.1	298	742.7
2012-13	806	621.6	633.5	570	571.5
2013-14	701	713.3	582.1	486	476
2014-15	567.2	592.5	564.8	475	490.9
2015-16	1328.2	786.2	787.7	276.5	613.4
2016-17	592.2	594	500.7	186.1	423.2

ANEXO 1. 2: Series anuales de la temperatura media anual por estaciones luego del completado

Año	Chocloca	S. Andrés	S. Jacinto	Turumayo	Aeropuerto	El Tejar	Campanario	Coimata	Tucumillas	Sella
1980	17.3	17.4	17.8	17.6	18	17.7	9.8	16.4	14	17
1981	17.1	17.2	17.5	17.4	17.8	18.2	9.2	15.1	13.3	16.4
1982	17.9	17.9	18	18.1	18.4	18.6	9.8	16.8	14	17.5
1983	17.2	17.2	18.3	18.2	17.9	17.4	9.9	16.6	13.8	17
1984	17.8	17.4	18.5	18	18.2	17.8	10	17.5	14.4	17.4
1985	17.7	17.3	18.4	18.1	18.2	17.5	10.2	17.6	14.6	17.4
1986	17.5	17.2	18.8	18.2	18.3	17.6	10.1	17.5	14.6	17.4
1987	17.3	16.8	18.2	18.1	17.9	17.5	9.6	17.3	14.1	17.1
1988	17.1	16.6	17.7	17.2	17.4	17.3	9.7	16.6	13.4	16.8
1989	17.3	16.9	17.8	17.4	17.5	17.5	9.8	16.7	13.7	16.8
1990	17.8	17.6	18.1	17.7	18.1	18.1	9.7	17.1	14.6	17.6
1991	17.8	17.7	18.4	18.2	18.2	18.2	10	17.2	14.3	17.6
1992	17.3	16.8	18.1	17.4	17.5	17.7	9.3	16.5	13.1	17
1993	18.3	17.1	18	18	17.5	17.8	9.8	17.2	13.9	17.4
1994	19.2	17.8	18.7	18.6	18.4	18.6	10.3	17.9	14.8	18.2
1995	18.7	17.7	18.3	18.5	18.1	18.3	10.7	17.4	14.2	18
1996	17.6	16.9	18.1	17.8	17.6	17.9	9.9	16.8	14.1	17
1997	18.3	18.3	18.9	18.9	18.6	18.9	10.2	17.9	14.7	18.3
1998	17.9	17.7	18.4	18.3	18	18.4	10.5	17.3	14	17.1
1999	17.1	16.7	17.8	16.7	17.1	17.4	8.9	16.4	14.4	16.1
2000	18	17.3	18.5	17.4	18	17.9	9.3	17.1	14.3	17.1
2001	17.9	17.6	19	18.3	18.4	18.2	9.7	17.6	14.8	17.3
2002	18.3	18.1	19	19.2	18.7	18.7	10.5	17.8	14.7	17.7
2003	17.9	17.7	18.8	18.8	18.4	18.6	10	17.6	13.9	18
2004	17.4	17.6	18.6	18.5	18.1	18.4	9.8	17.1	14	17.5

Año	Chocloca	S. Andrés	S. Jacinto	Turumayo	Aeropuerto	El Tejar	Campanario	Coimata	Tucumillas	Sella
2005	17	17.5	18.4	17.6	17.9	18	9.9	16.8	13.7	18.1
2006	17.4	17.9	18.4	17.8	17.9	18.3	9.8	17.4	13.9	18
2007	17.1	17.9	18.1	17.3	17.6	18.2	10.6	17.3	14.1	17.8
2008	17	17.1	17.8	17.4	17.2	17.6	9.6	16.3	13.1	16.3
2009	17.4	17.7	19	18.3	17.9	18.1	10.2	17.3	14	17.2
2010	17.3	17.2	19	18	18.2	18.1	10.9	17.4	14.3	17.1
2011	17.8	16.6	19.1	17.5	17.7	18.5	10	17.1	14.1	17
2012	17.9	17	19.9	18.8	18.9	18.4	10.3	17.4	14.5	17.7
2013	17.4	16.4	19.5	18.6	18.5	18	10.1	17.2	14.2	17.4
2014	18	17.4	20.1	19.4	19	18.5	10.3	17.8	16.2	17.5
2015	18	17.8	19.9	19.3	19	18.6	10.7	17.6	14.5	18.1
2016	17.8	18.1	19.6	18.7	18.3	18.3	10.6	17	13.6	17.6

ANEXO 1. 2: Series anuales de la temperatura media anual por estaciones luego del completado – continuación

Año	Yesera	Trancas	Tomayapo
1980	14.4	17.9	17.4
1981	14.2	17.2	16.3
1982	15	18	16.7
1983	14.7	17.8	16.8
1984	14.6	18	17.4
1985	14.7	17.9	17.2
1986	15	17.8	17
1987	14.8	18.2	16.8
1988	14.4	16.9	16.5
1989	14	17.1	16.9
1990	15.6	17.3	17.4
1991	14.8	18	16.7
1992	12.8	17.1	16.1
1993	14.3	17.6	17
1994	15.4	18.3	17.4
1995	15.4	17.9	17.1
1996	14.4	17.4	16.3
1997	16.6	18.7	17.8
1998	14.7	18.1	17.2
1999	14.8	16.7	16.9
2000	14.6	17.4	16.4
2001	15	18.3	16.8
2002	16	19.2	17.4

Año	Yesera	Trancas	Tomayapo
2003	13.8	18.8	17.1
2004	14.8	18.5	16.4
2005	14.2	17.6	17
2006	14.5	17.8	16.8
2007	13.8	17.3	17.3
2008	13.3	17.4	16.4
2009	14	18.3	17.1
2010	14.9	18	17.3
2011	14.9	17.5	17
2012	16.7	18.8	16.7
2013	15.4	18.6	18.4
2014	16.4	19.4	17.6
2015	16.3	19.2	17.1
2016	15.7	18.7	17.2

ANEXO 1. 3: Series anuales de la humedad relativa anual por estaciones luego del completado

Año	Chocloca	S. Andrés	S. Jacinto	Turumayo	Aeropuerto	El Tejar	Campanario	Coimata
1980	65.1	67.6	65.8	68.2	54.0	62.1	71.6	49.9
1981	71.1	66.3	61.0	68.1	52.2	62.2	72.2	50.7
1982	71.8	67.5	61.8	68.1	52.9	60.7	72.2	51.4
1983	72.5	65.4	60.4	68.0	53.9	58.4	72.3	52.2
1984	73.2	63.2	63.1	67.9	57.0	60.8	72.4	53.0
1985	73.9	67.5	63.2	67.9	58.5	62.0	72.4	53.8
1986	74.7	68.1	64.8	67.8	58.2	62.7	72.5	54.6
1987	75.4	67.3	63.1	67.7	58.5	66.7	72.6	55.4
1988	76.2	69.0	62.5	67.7	62.5	66.6	72.7	56.3
1989	76.9	71.0	64.3	67.6	61.2	66.0	72.7	57.1
1990	77.7	65.9	63.2	67.5	60.1	65.2	62.8	58.0
1991	78.5	68.1	65.1	67.5	60.9	65.9	60.8	58.8
1992	80.1	70.6	63.6	67.4	57.8	63.1	53.0	59.7
1993	81	66.0	64.0	67.3	56.6	62.4	50.8	62.5
1994	77.6	66.9	61.2	67.3	55.7	62.6	55.5	66.3
1995	75.8	70.2	57.6	67.2	56.2	63.1	58.0	66.9
1996	60.4	68.2	65.1	67.1	63.4	65.4	55.2	75.2
1997	60.8	58.2	62.9	67.1	61.5	64.3	57.4	62.8
1998	64.4	61.5	65.4	67.0	64.9	62.5	61.0	63.2
1999	62.7	65.2	65.8	64.2	61.9	62.0	51.4	62.1
2000	64.3	58.9	62.1	70.8	59.3	62.0	52.5	63.5
2001	68.1	62.7	64.0	63.5	61.1	60.1	53.9	64.5
2002	66.3	64.1	65.3	66.4	62.2	58.3	50.7	61.0

Año	Chocloca	S. Andrés	S. Jacinto	Turumayo	Aeropuerto	El Tejar	Campanario	Coimata
2003	65.3	57.4	63.7	64.1	61.0	63.5	48.5	58.4
2004	70.5	66.1	65.5	67.5	63.2	69.9	48.0	61.0
2005	65.9	60.3	64.0	61.9	56.8	66.6	47.5	60.6
2006	63.9	62.6	63.2	60.6	62.4	67.5	57.1	63.3
2007	65.2	61.7	64.4	66.3	60.8	66.5	59.0	61.9
2008	68.3	65.9	66.4	68.8	60.5	75.6	54.6	63.7
2009	67.3	64.7	62.8	62.9	60.3	70.8	52.3	65.4
2010	69.6	66.2	64.7	56.9	61.3	65.2	50.2	65.3
2011	69.9	76.5	63.7	49.4	61.7	80.0	45.7	65.8
2012	76.7	76.4	63.6	51.4	60.8	76.6	46.0	64.6
2013	75.1	76.9	64.1	53.5	59.0	68.3	47.0	65.2
2014	73.6	76.7	64.7	56.1	59.3	70.6	47.8	69.2
2015	72.2	75.9	63.5	58.9	60.7	70.9	48.5	68.9
2016	70.7	76.5	64.0	61.9	61.9	69.0	49.2	70.5

ANEXO 1. 4: Series anuales de la velocidad del viento media diaria mensual por estaciones luego del completado

Año	Chocloca	S. Andrés	S. Jacinto	Turumayo	Aeropuerto	El Tejar	Campanario	Coimata
1980	60.5	216.0	58.2	260.3	134.4	128.4	158.9	109.4
1981	65.3	200.9	136.0	255.1	119.2	113.2	155.7	114.5
1982	70.5	186.8	132.0	250.0	138.8	114.2	152.6	106.9
1983	76.2	173.7	116.6	245.0	106.6	141.2	149.5	125.2
1984	82.3	161.6	86.4	240.1	103.8	93.8	146.5	85.2
1985	88.9	150.3	75.6	235.3	110.6	101.2	143.6	92.1
1986	96.0	139.7	73.9	230.6	112.8	98.9	140.7	84.1
1987	103.7	130.0	73.0	226.0	128.4	108.4	137.9	88.7
1988	112.0	120.9	67.2	221.4	118.4	127.0	135.2	105.8
1989	120.9	112.4	66.2	217.0	112.8	140.4	132.5	113.0
1990	130.6	104.5	78.2	212.7	118.4	141.6	129.8	101.9
1991	157.8	129.4	176.6	207.7	123.2	139.4	146.3	135.2
1992	171.6	141.8	197.6	211.9	116.7	136.2	180.4	133.8
1993	168.6	106.7	169.6	202.8	123.0	128.1	129.2	119.4
1994	204.2	190.4	153.7	240.8	122.8	160.0	282.5	138.1
1995	191.2	157.9	184.9	227.8	146.6	149.8	235.6	131.7
1996	93.0	151.1	235.7	137.7	146.8	142.2	210.2	132.6
1997	173.2	154.0	212.1	191.7	152.2	151.6	201.2	137.2
1998	220.6	152.1	190.9	224.1	159.4	181.4	234.7	140.9
1999	194.8	173.2	171.8	204.6	166.0	193.0	211.6	149.7
2000	254.9	187.0	154.6	244.4	201.4	186.4	224.8	159.6
2001	205.0	179.1	158.7	197.0	203.4	162.7	228.0	134.1

Año	Chocloca	S. Andrés	S. Jacinto	Turumayo	Aeropuerto	El Tejar	Campanario	Coimata
2002	183.6	189.9	124.2	207.5	227.2	136.9	312.6	91.6
2003	240.0	176.4	107.1	189.0	220.6	115.3	294.8	91.4
2004	205.2	136.9	93.2	162.6	257.2	113.4	257.6	90.6
2005	183.4	127.7	145.3	141.0	261.6	100.4	221.4	100.4
2006	163.6	106.2	227.9	124.8	175.8	104.6	193.8	110.0
2007	151.2	101.8	255.5	121.4	183.2	127.0	169.4	126.0
2008	139.2	97.9	273.8	132.5	212.6	95.6	143.2	103.8
2009	182.4	138.1	298.6	222.3	221.2	119.5	241.2	126.6
2010	180.3	94.0	245.0	186.6	179.4	126.6	214.8	128.8
2011	191.8	90.4	240.0	198.8	144.6	102.8	199.8	115.6
2012	184.0	173.8	204.2	223.2	141.7	131.0	235.2	105.6
2013	208.7	215.2	241.4	276.8	138.9	142.4	283.8	118.8
2014	236.9	193.4	233.6	316.8	136.1	143.4	245.4	175.6
2015	230.7	202.2	245.4	310.1	133.4	166.7	268.8	170.8
2016	224.2	188.2	265.6	305.0	130.7	162.1	279.8	153.8

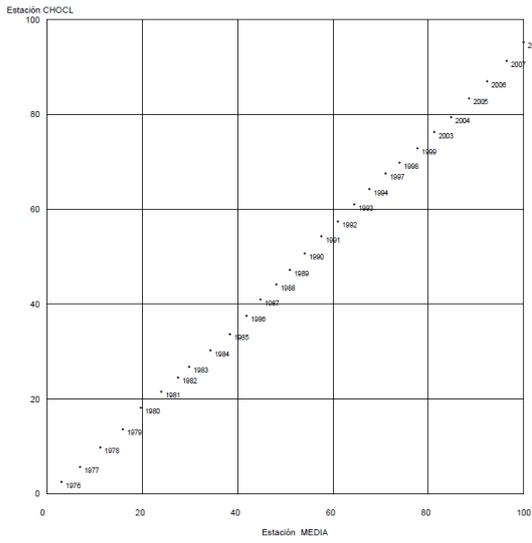
ANEXO 1. 5: Series anuales de horas de sol (insolación) media anual por estaciones luego del completado

Año	Chocloca	Aeropuerto	El Tejar	Campanario	Coimata
1980	168.2	197.5	220.2	204.0	161.8
1981	169.0	207.7	211.2	202.0	184.5
1982	169.8	214.8	216.8	199.9	206.9
1983	170.7	214.2	207.7	197.9	195.4
1984	171.5	208.7	202.1	196.0	193.9
1985	172.4	211.9	199.8	194.0	196.6
1986	173.3	220.0	215.9	192.1	216.1
1987	174.3	218.8	207.5	190.1	207.7
1988	175.2	203.3	187.6	188.2	188.2
1989	176.2	220.0	206.7	186.4	206.3
1990	177.2	233.0	207.6	230.2	194.1
1991	178.2	209.7	202.3	228.5	189.6
1992	179.3	188.7	208.3	225.0	194.7
1993	180.3	169.8	198.4	197.7	193.1
1994	169.9	210.5	205.6	172.9	200.1
1995	170.1	196.2	180.5	167.3	154.0
1996	166.4	197.0	187.3	156.7	172.6
1997	174.4	201.3	203.0	177.8	192.9
1998	168.5	197.8	198.7	184.7	176.3
1999	180.9	205.3	203.8	213.3	181.0
2000	191.7	205.5	202.1	202.3	168.9
2001	188.1	204.0	208.1	221.1	177.5
2002	196.7	212.9	209.5	238.0	193.2
2003	212.4	214.4	211.9	237.5	192.1
2004	181.5	210.0	205.8	225.4	181.5
2005	209.2	212.5	211.0	238.1	187.8
2006	183.8	212.6	207.7	221.4	191.1

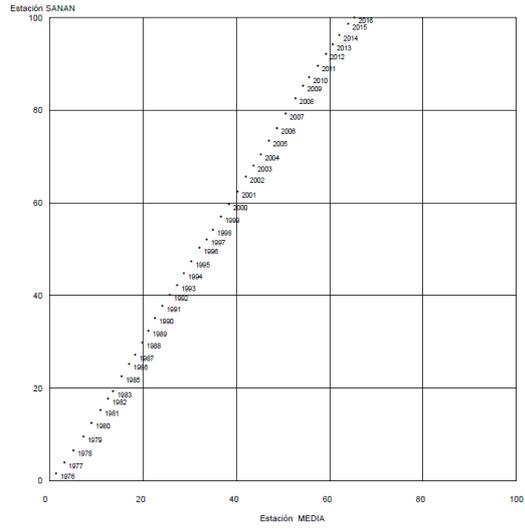
Año	Chocloca	Aeropuerto	El Tejar	Campanario	Coimata
2007	181.1	199.7	197.9	213.2	180.5
2008	171.3	192.7	192.6	217.5	173.9
2009	186.6	207.3	207.6	210.1	190.2
2010	181.4	208.7	206.7	202.9	188.5
2011	183.6	202.1	197.7	196.0	174.2
2012	193.9	209.0	198.7	210.1	176.2
2013	191.0	205.4	201.2	209.0	176.4
2014	188.8	205.4	205.7	222.6	183.8
2015	190.2	203.9	205.1	209.0	181.9
2016	189.4	202.4	206.1	214.8	183.3

ANEXO 1. 6: Curvas de doble acumulación – obtenidas por el CHAC

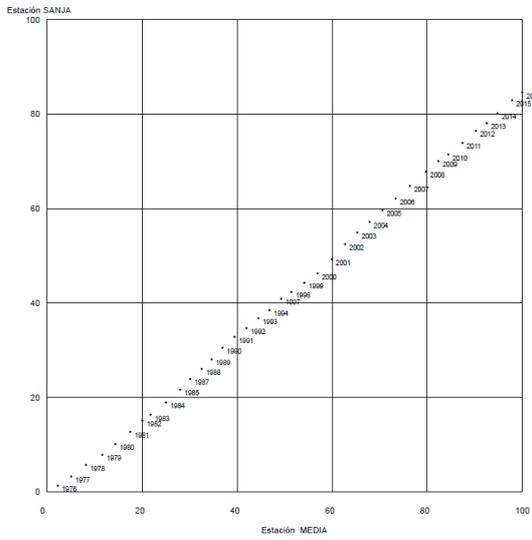
Estación Chocloca



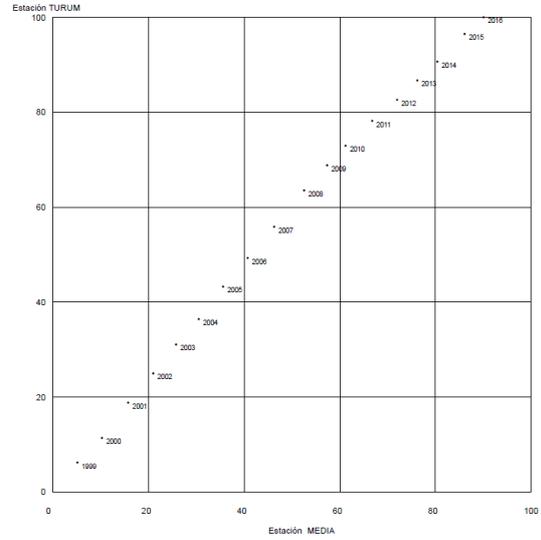
Estación San Andrés



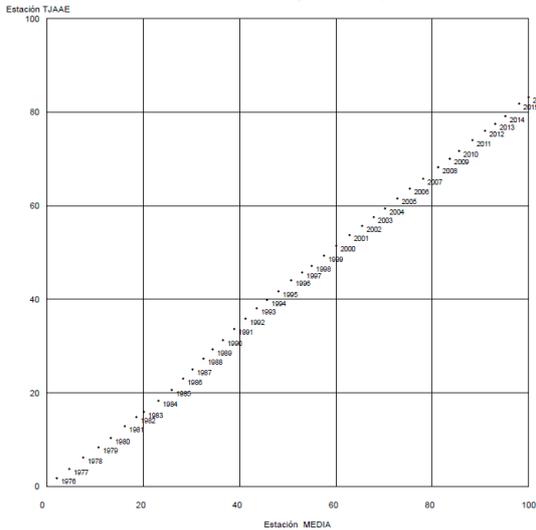
Estación San Jacinto



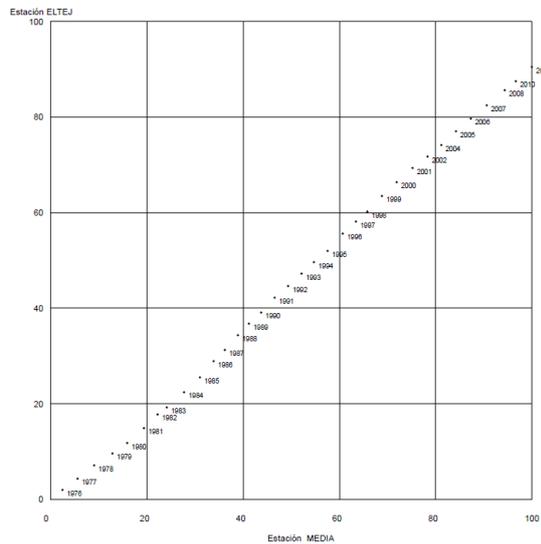
Estación Turumayo



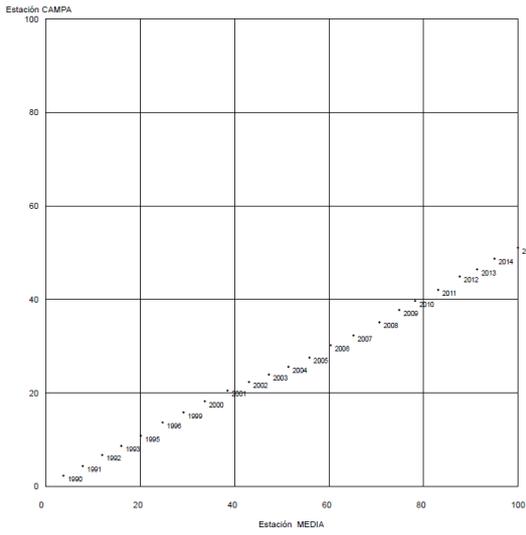
Estación Tarija Aeropuerto



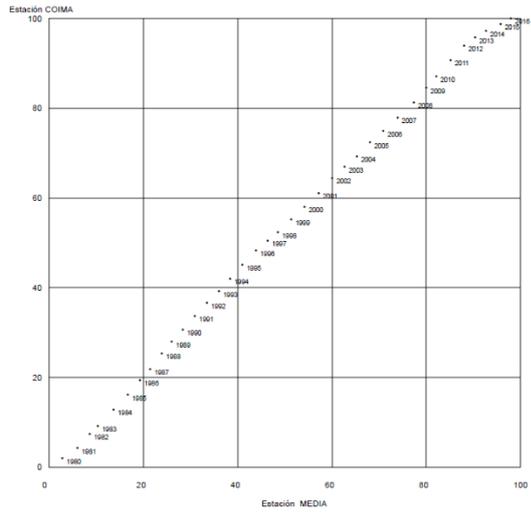
Estación El Tejar



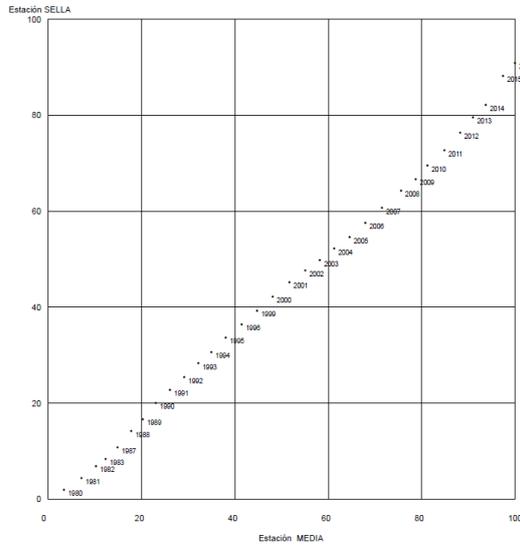
Estación Campanario



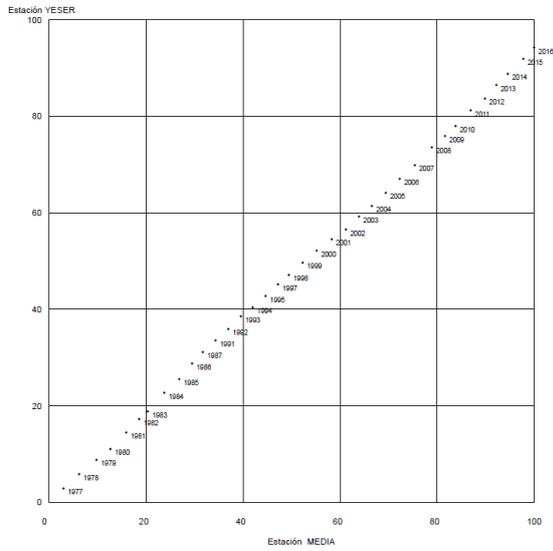
Estación Coimata



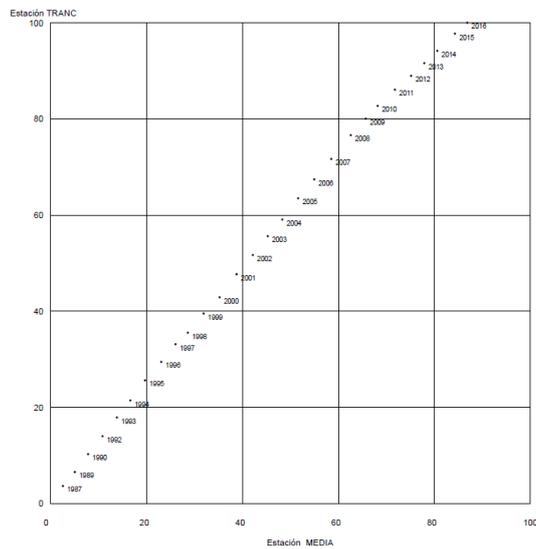
Estación Sella Quebrada



Estación Yesera



Estación Trancas



ANEXO 1. 7: Evapotranspiración Potencial calcula por el método de Penman – obtenida por el CHAC

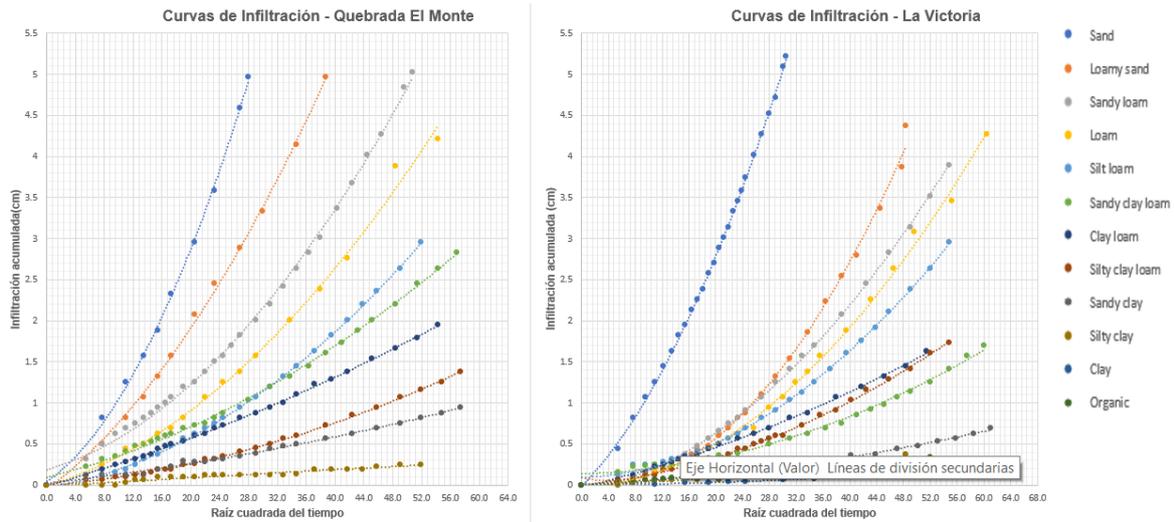
Año	Chocloca	Aeropuerto	El Tejar	Campanario	Coimata
1980-81	90.3	106.9	107.0	86.36	94.6
1981-82	90.2	106.5	105.5	84.74	96.4
1982-83	92.1	110.7	106.4	85.49	101.7
1983-84	91.1	106.4	106.3	85.53	102.4
1984-85	92.7	104.2	100.6	85.54	98.7
1985-86	92.8	106.0	100.9	85.57	100.9
1986-87	92.5	107.6	103.4	84.77	102.3
1987-88	92.3	108.1	101.2	83.53	101.0
1988-89	91.9	101.4	99.1	83.32	97.4
1989-90	92.7	105.9	104.1	83.28	102.0
1990-91	94.1	110.3	106.1	91.13	99.3
1991-92	94.9	106.3	104.9	93.82	102.4
1992-93	92.8	101.7	105.2	91.59	100.7
1993-94	95.4	99.5	104.3	89.96	98.8
1994-95	98.1	107.5	108.1	95.60	102.2
1995-96	99.4	107.4	103.1	93.79	92.7
1996-97	94.4	103.3	100.8	89.74	90.6
1997-98	103.6	107.6	107.7	91.10	102.8
1998-99	103.5	104.5	109.1	92.42	98.5
1999-00	103.6	104.9	108.7	95.16	98.1
2000-01	110.3	113.0	108.7	94.88	98.3
2001-02	102.6	112.6	109.6	97.09	98.3
2002-03	105.5	115.8	109.2	107.28	98.9
2003-04	111.5	116.0	106.2	107.36	98.1
2004-05	99.2	115.6	102.5	102.34	94.8
2005-06	104.3	120.1	102.6	102.50	96.7
2006-07	102.0	109.1	102.5	96.80	98.5
2007-08	99.5	108.3	101.8	93.23	97.8
2008-09	94.7	107.6	95.1	91.89	92.3
2009-10	100.5	113.2	103.6	98.13	99.5
2010-11	98.0	110.9	104.1	99.31	99.1
2011-12	100.2	104.5	97.1	97.62	94.2
2012-13	97.8	109.1	100.0	101.41	95.1
2013-14	97.0	107.5	103.2	103.93	96.9
2014-15	100.8	108.5	104.3	103.47	100.4
2015-16	102.5	107.8	105.0	103.77	99.5
2016-17	102.7	105.5	105.4	104.39	97.7

ANEXO 1. 8: Planilla de trabajo de campo (modelo general) – Infiltración

Nombre de Prueba:			Descripción del Lugar y Suelos:		
Día/Fecha					
Lugar en General:					
Lat:	Lng:				
Elev:	Cuenca:		Temperatura:		
Tiempo de Llegada al Lugar:			Precipitación:		
Tiempo Comienzo de Datos:			Precip. Anterior 5 días:		
Tiempo Acabado de Datos:			Cielo:		
Tiempo Salida de Lugar:			Viento:		
Origen del Agua de prueba:			Infiltrómetro y marca:		
Longitud:	Diámetro:	Area:	Llenar 208únel208 de succión:		
Tubo de Marriote:		Succión:	Llenar 208únel208 de reservorio:		
Instalación:	Profundidad y nivel:		Temp. Suelo:	Agua:	
<p>Para que el cálculo de la conductividad hidráulica sea exacto por lo menos 15 a 20 ml de agua deben ser infiltrados en el suelo durante cada medición.</p>					
Grupo: (Nombres)	1	2	3		
Tiempo (seg)	Tiempo [^] ½ (t)	Volumen	Infiltración (cm)	Notas:	
0	0.00				
30	5.48				
60	7.75				
90	9.49				
120	10.95				
150	12.25				
180	13.42				
240	15.49				
300	17.32				
360	18.97				
420	20.49				
480	21.91				
540	23.24				
600	24.49				
720	26.83				
840	28.98				
960	30.98				
1080	32.86				
1200	34.64				

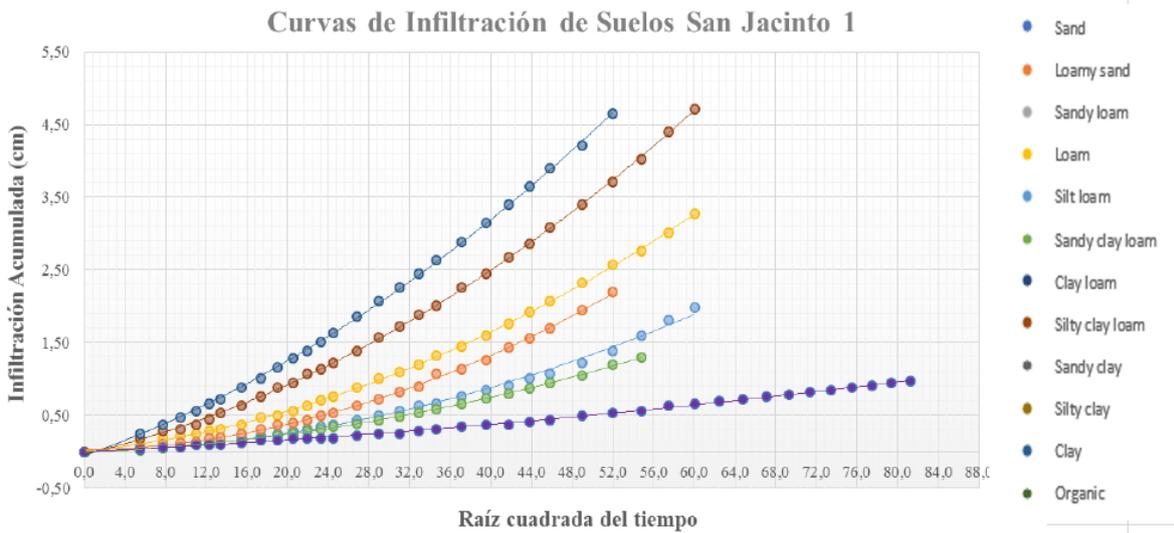
ANEXO 1. 9: Curvas de infiltración

Curvas de Infiltración subcuencas: La Vittoria y Quebrada del Monte



Fuente: Villena, et al. (2019^a)

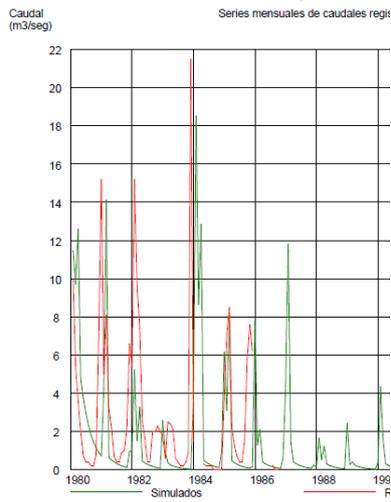
Curvas de Infiltración subcuencas: San Jacinto 1 y San Jacinto 2



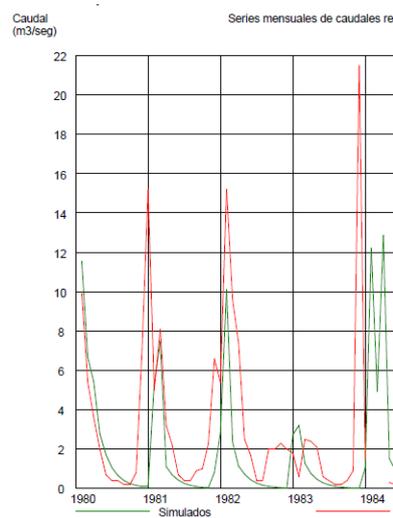
Fuente: Villena, et al. (2019^b)

ANEXO 1. 10: Caudales Simulados vs. Registrados subcuencas del Guadalquivir

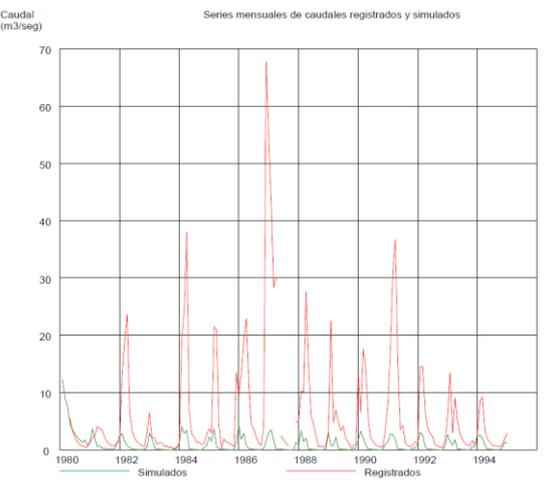
Subcuenta de obrasjes



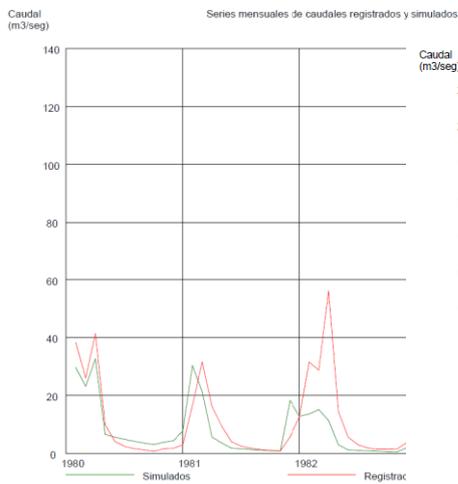
Subcuenta de Canasmoro



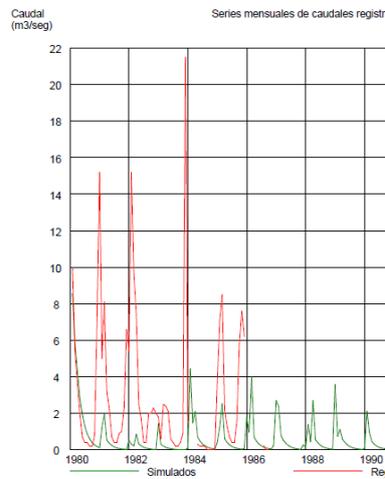
Subcuenta de la Vittoria



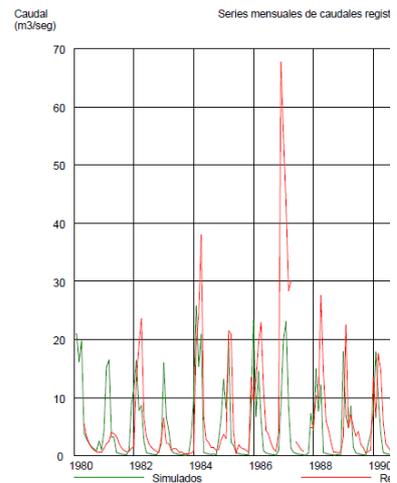
Subcuenta de Tolomosa



Subcuenta de Sella Quebrada



Subcuenta de Tarija Ciudad (Qda Monte)



ANEXO 1. 11: Precipitación areal mensual por subcuenca de estudio

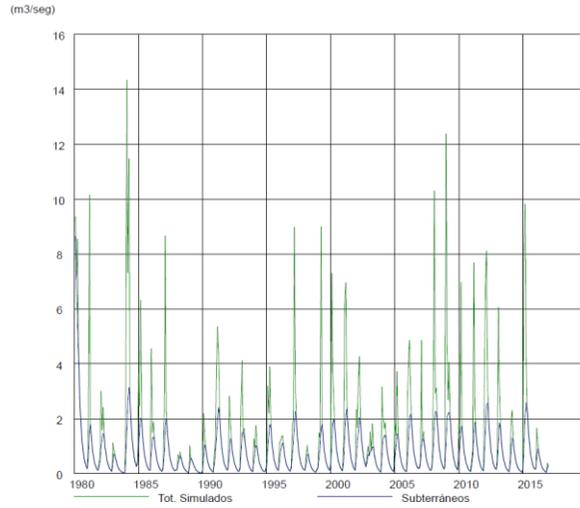
Cuenca	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
Guadalquivir	175.0	158.4	121.7	31.3	5.0	1.3	1.1	4.2	11.5	47.3	89.4	149.9	795.9
Canasmoro	182.7	156.0	109.7	28.1	4.1	1.3	0.8	3.9	13.0	49.9	99.1	152.4	801.0
Sella Quebrada	147.3	128.2	90.2	27.6	4.2	0.9	1.0	4.3	10.2	30.6	62.5	123.4	630.3
Obrajes	159.6	142.0	104.9	26.4	4.2	0.9	1.1	3.9	9.8	35.5	69.3	127.7	685.2
San Jacinto 1	194.7	175.2	142.2	34.3	5.8	1.7	1.3	4.8	13.5	67.8	114.3	176.2	931.7
San Jacinto 2	206.5	196.6	166.5	41.3	7.6	2.1	1.6	5.9	14.2	70.8	124.1	188.3	1025.5
Rincón Vittoria	171.8	149.6	114.2	29.2	4.0	1.1	0.9	3.5	11.6	50.8	86.0	150.3	773.0
Tarija Ciudad	148.2	128.6	99.3	23.8	3.0	0.6	0.7	3.0	8.8	39.3	70.5	126.7	652.4
Tolomosa	223.9	223.1	183.3	47.4	8.7	2.6	1.8	6.0	14.9	66.5	130.2	200.2	1108.6

ANEXO 1. 12: Evapotranspiración Potencial areal mensual por subcuenca de estudio

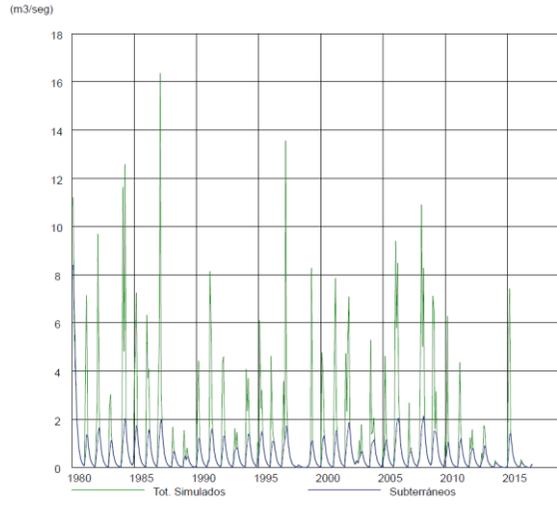
Cuenca	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
Guadalquivir	107.5	108.2	115.7	118.7	109.2	105.0	92.1	86.7	78.9	85.0	92.2	99.6	1198.8
Canasmoro	106.2	107.8	112.5	116.6	108.1	106.0	92.9	86.5	76.5	83.2	89.3	97.4	1183.0
Sella Quebrada	112.4	112.7	120.4	121.9	111.9	105.8	93.9	89.6	83.4	89.9	96.3	103.9	1242.1
Obrajes	102.2	103.1	110.2	114.7	107.3	105.3	92.1	85.0	75.1	80.1	87.1	95.1	1157.3
San Jacinto 1	103.6	104.4	111.7	115.8	108.0	105.4	92.4	85.7	76.4	81.5	88.4	96.5	1169.7
San Jacinto 2	101.6	101.9	111.6	116.0	108.3	105.4	91.9	85.0	76.2	80.1	88.2	95.9	1162.1
Rincón Vittoria	102.5	103.6	110.3	114.9	107.3	105.4	92.1	85.1	75.2	80.4	87.2	95.3	1159.4
Tarija Ciudad	109.1	109.8	117.0	119.5	110.3	105.7	93.3	88.1	80.6	86.8	93.2	101.0	1214.5
Tolomosa	107.2	108.9	113.4	117.7	108.9	106.9	93.4	87.0	76.7	83.8	90.2	98.1	1192.2

ANEXO 1. 13: Caudales de aportes temporales en las subcuencas de estudio

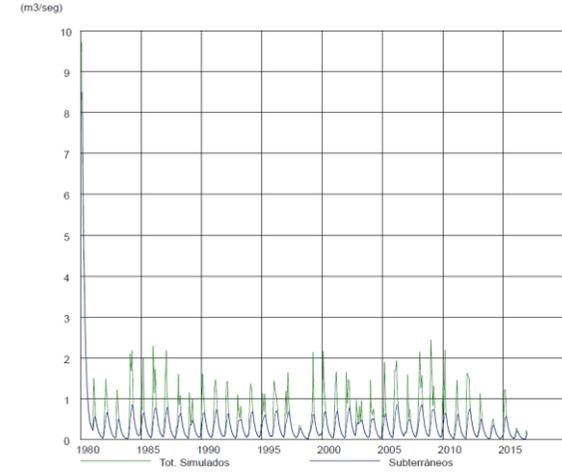
Subcuenta de obras



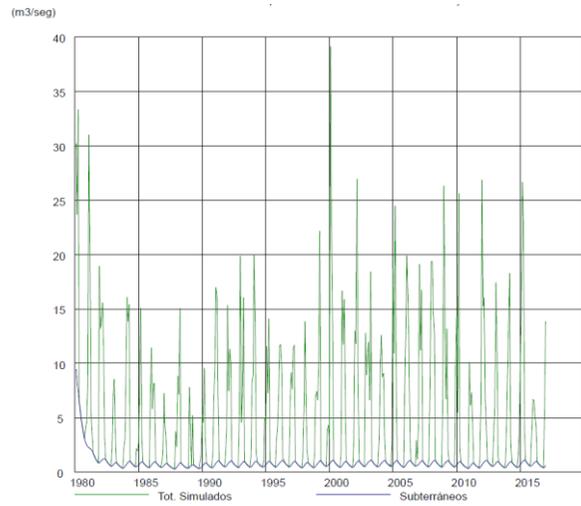
Subcuenta de Canasmoro



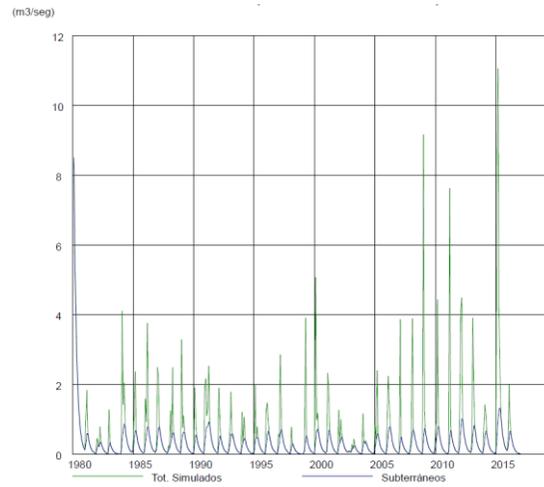
Subcuenta de la Vittoria



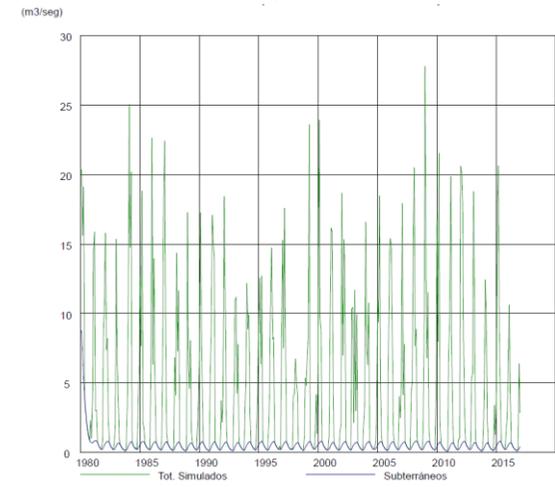
Subcuenta de Tolomosa



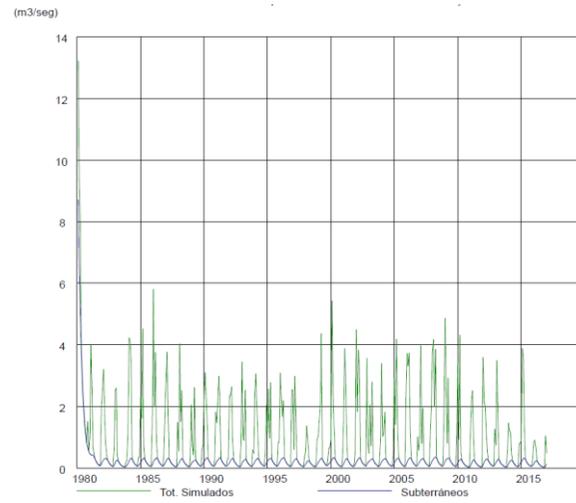
Subcuenta de Sella Quebrada



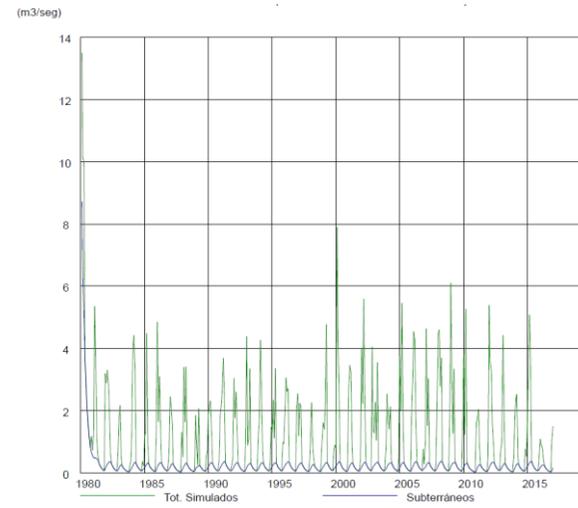
Subcuenta de Tarija Ciudad (Qda Monte)



Subcuenta de San Jacinto 1



Subcuenta de San Jacinto 2



7.2. ANEXO 2: Datos y planillas de cálculo en la osmosis inversa: calidad de agua

ANEXO 2. 1: Parámetros básicos del monitoreo

Puntos de muestreo	Periodo		Parámetros de control básicos												
	Fecha	Hora	pH	Temperatura °C	Conductividad (µS/cm)	Turbidez (NTU)	DQO (mg/l)	DBO5 (mg/l)	Oxígeno Disuelto (mg/l)	Sólidos en suspensión (mg/l)	Sólidos disueltos totales (mg/l)	Coliformes totales UFC/100 ml	Dureza total (mg/l)	Nitratos (mg/l)	Nitritos (mg/l)
M1 (San Jacinto – Bombeo)	24/5/2018	16:30	6.84	20.4	3520		40	6.12			362	13	23	25	0.02
	21/6/2018	9:10	6.93	23.2	3840	69	27.6		0.02						
	11/12/2018	9:25	9.86	26.45	3560	85.4	33	7.73			1760		31.00		0.0020
	8/1/2019	16:00					31.8					13			
	3/4/2019	16:10	6.97	25.7	338	21.6	28.4	5.6	6.62		160.5	25	8.00		0.00
	23/5/2019	15:00	7.27	15.8	288	20.7	18.1		6.78						
	18/9/2019	15:07	7:43	19.1	761	20.4	24.3	30	7.41		325	35	9.00	13.00	0.01
M2 (San Jacinto – Bombeo Izquierda)	24/5/2018	16:54	6.75	20.4	3450		45	5.74			358		20		0.005
	21/6/2018	9:20	6.02	23.1	3970	52	35.2		0.011						
	11/12/2018	9:50	9.77	28.1	787	65.3	7	9.31			361		13.00		0.01
	8/1/2019	16:05					35.9					55			
	3/4/2019	16:35	6.81	25.3	335	20	25.8	3.2	5.52		160.5	35	7.00		0.01
	23/5/2019	14:30	7.08	15.6	287	13	32		6.71		168.9			8.00	
	18/9/2019	15:30	7.52	18.9	484	29.5	23.2	40	7.28		356	30	12.00	17.00	0.01
	24/5/2018	17:14	6.93	20.4	3450		42	6.15			300		22		0.02

Puntos de muestreo	Periodo		Parámetros de control básicos												
	Fecha	Hora	pH	Temperatura °C	Conductividad (µS/cm)	Turbidez (NTU)	DQO (mg/l)	DBO5 (mg/l)	Oxígeno Disuelto (mg/l)	Sólidos en suspensión (mg/l)	Sólidos disueltos totales (mg/l)	Coliformes totales UFC/100 ml	Dureza total (mg/l)	Nitratos (mg/l)	Nitritos (mg/l)
M3 (San Jacinto – Bombeo Derecha)	21/6/2018	9:35	6.5	23.1	4080	81	437			0.02					
	27/6/2018	11:00													
	11/12/2018	10:30	9.81	27.7	789	63.6		7.5	9.33		362		16		0.009
	8/1/2019	16:10					30.6					31			
	3/4/2019	17:00	6.8	25.2	347	36.9	45.6	5.6	5.57		166.3	55	6		0.013
	22/5/2019	15:10	7.32	15.5	283	25.7	13		7.01		165.9				
	18/9/2019	16:10	7.5	19	480	16.2	20.6	25	7.28		345	35	11	9	0.009
M4 (San Jacinto – Tunel Hidroeléctrica)	24/5/2018	17:57	6.58	19.7	4080			45	4.43		310				0.0015
	21/6/2018	9:50	6.45	23	3680	35	244			0.006					
	11/12/2018	11:45	9.55	28.6	772	58.8		9	9.13		352		16.00		0.003
	8/1/2019	16:18					54					23		25.00	
	3/4/2019	15:30	6.69	25.4	344	24.7	27.9	3.7	4.89		165.8	80	4.00		0.009
	23/5/2019	14:00	6.84	16	292	53.7			6.92		170.6				
	18/9/2019	15:00	7.47	18.9	480	15.5	27.5	35	7.27		330	25	13.00	15.00	0.009
M5 (San Jacinto – Dique)	24/5/2018	18:10	6.72	19.6	3540			40	5.54		325				0.0015
	21/6/2018	10:15	5.69	23.2	4900	57	419			0.002					
	11/12/2018	12:30	9.76	28.1	775	62.5		7.2	8.25		356		16.00		0.002
	8/1/2018	16:25					43.4					39			

Puntos de muestreo	Periodo		Parámetros de control básicos												
	Fecha	Hora	pH	Temperatura °C	Conductividad (µS/cm)	Turbidez (NTU)	DQO (mg/l)	DBO5 (mg/l)	Oxígeno Disuelto (mg/l)	Sólidos en suspensión (mg/l)	Sólidos disueltos totales (mg/l)	Coliformes totales UFC/100 ml	Dureza total (mg/l)	Nitratos (mg/l)	Nitritos (mg/l)
M1 (Huacata – Puente río Huacata)	3/4/2019	15:05	6.68	25.3	1095	36.2	27.6		5.39		545	35	5.00		0.001
	22/5/2019	15:45	6.66	15.8	291	28.2	13.4		6.67		170.8				
	18/9/2019	16:45	6.97	18.8	423	69.2	36.6	40	6.68		350	20	19.00	19.00	0.014
	25/5/2018	9:20	6.74	10.5	666	28		22	8.4		345	45	20		0.015
	20/6/2018	10:45	7.15	23.4	363	1.9	56			0.002					
	10/1/2019	10:21	7.51	21.7	513	1.15	42.3	3.5	6.59		266	0	20.00		0.01
	16/4/2019	9:25	7.13	16.6	529	0.65	25.1	0.6	7.13		310	10	12.00	0.10	0.00
3/6/2019	9:00	7.36	12.8	546	1.79	16.1	2.1	7.71		350	25		1.10	0.00	
	11/9/2019														
M2 (Huacata – Presa Derivadora)	25/5/2018	9:39	6.49	11.6	960	20		20	6.03		250	30	15	1.2	0.012
	21/6/2018														
	10/1/2019	10:41	6.84	23.2	926	12.6	35.7	4.8	4.76		474	76	31.00		0.001
	16/4/2019	10:05	6.97	16.6	521	1.92	22.3	1	7.17		304	45	19.00	0.11	0.007
	3/6/2019	9:30	7.24	16	605	12.2	7.62	1	5.96		375	85		2.50	0.004
	11/9/2019	10:30													
M3 (Huacata – Entrada 216únel trasvase Guadalquivir)	25/5/2018	10:20	6.93	15.8	396	15		25	7.16		300	5	20	1.8	0.011
	21/6/2018														
	10/1/2019	12:10	7.58	22.6	431	7.04	38.3	11	5.935		218.7	0	8.00		0.005

Puntos de muestreo	Periodo		Parámetros de control básicos												
	Fecha	Hora	pH	Temperatura °C	Conductividad (µS/cm)	Turbidez (NTU)	DQO (mg/l)	DBO5 (mg/l)	Oxígeno Disuelto (mg/l)	Sólidos en suspensión (mg/l)	Sólidos disueltos totales (mg/l)	Coliformes totales UFC/100 ml	Dureza total (mg/l)	Nitratos (mg/l)	Nitritos (mg/l)
	16/4/2019	11:00	7.02	18.6	382	7.35	23.2	1.8	6.77		211	10	14.00	0.12	0.008
	3/6/2019	10:40	7.35	15.9	381	13.2	11.7	2	7.45		229	20		1.00	0.002
	11/9/2019	11:40													
M4 (Huacata – Entrada a Embalse)	25/5/2018	11:00	6.93	16.1	400	20		15	6.81		385	15	19	1	0.001
	21/6/2018	12:15	6.26	23.8	503	5.1	423			0.005					
	10/1/2018	11:32	7.82	22.8	437	12.8	39.7	5.2	6.225		219.2	0	13.00		0.002
	16/4/2019	10:40	7.25	19.5	448	7.25	21.2	1.8	7.01		239	52	13.00	0.11	0.004
	3/6/2019	11:20	7.28	15.8	358	13.9	13.2	18	7.07		217	65		0.90	0.006
	11/9/2019														
M5 (Huacata – Salida Tunel trasvase Guadalquivir)	25/5/2018	11:34	7	15.6	400	25		10	7.07		320	0	16	1.5	0.015
	21/6/2018	12:45	6.4	23.2	410	28	168			0.003					
	10/1/2018	12:31	6.74	18.2	564	35.1	34.6	2.5	5.94		316	0	19.00		0.008
	16/4/2019	11:45	6.76	21	614	11.2	21.9	1.4	5.72		341	3	13.00	0.21	0.008
	3/6/2019	10:15	7.22	16	604	11.7	12.8	1	6.57		359	10		0.20	0.002
	11/9/2019														
M1 Obra de toma Rincon de La victoria	14/6/2018	10:20	6.32	8.7	74.4	0.58	35	2	8.49		35.5	0	1	2	0.003
	14/1/2019	10:50	7.05	16	1033	0.59	56.4	5	7		59.4	0	0.00	2.50	0.00
	31/5/2019	8:30	7.11	10.9	10.8	0.61	10.6	3	8.32		69.4	3	1.00	1.10	0.00

Puntos de muestreo	Periodo		Parámetros de control básicos												
	Fecha	Hora	pH	Temperatura °C	Conductividad (µS/cm)	Turbidez (NTU)	DQO (mg/l)	DBO5 (mg/l)	Oxígeno Disuelto (mg/l)	Sólidos en suspensión (mg/l)	Sólidos disueltos totales (mg/l)	Coliformes totales UFC/100 ml	Dureza total (mg/l)	Nitratos (mg/l)	Nitritos (mg/l)
	4/9/2019														
M2 Obra de toma Las Tipas	14/6/2018	11:55	8.89	15.9	724	6.14	45	25	8.81		725	65	45	2.5	0.015
	7/1/2019	15:00	6.86	26.8	254	241	30.6	15	6.26		1523	12	20.00		0.02
	28/3/2019	17:00	7.49	23.4	876	62.8	34.8		6.79		445		19.00	0.35	0.01
	28/5/2019	15:38	7.69	19.6	855	20.4	15	0.9	7.01		471	196.00		1.00	0.01
	4/9/2019	11:00	7.84	20.3	888	4.83	28.5	1	7.92		675	85.00	35.00	0.80	0.01
M3 Río Guadalquivir – Zona de Canasmoro Afluente Corana	14/6/2018	13:26	7.5	18.1	723	0.84	33	10.5	7.68		320	25	25	1.1	0.016
	4/12/2018	10:00	7.7	21.2	78.7	23.7	20.7	7.3	8.045		418.5	35	16.10	0.30	0.01
	28/3/2019	16:15	7.53	24.4	1010	9.81	29.6		6.8		503		21.00	0.12	0.01
	28/5/2019	14:15	8.59	21.1	1176	3.38	25	0.5	7.02		646	14.00		1.30	0.01
	11/9/2019	15:15													
M4 Río Guadalquivir – Angosto de San Luis	14/6/2018	14:46	7.24	15.1	2655	57.8	39.2	40	7.24		450	185	25	16.5	0.019
	4/12/2018	9:00	7.41	20.35	1248	278	39.2	20	6.71		601	113	20.00	12.80	0.01
	9/1/2018	15:35					42.7					168			
	26/3/2019	15:46	7.28	20.2	696	67.4	26.7	1.4	6.75		377		16.00	0.19	0.01
	14/5/2019	14:05	8.29	20.4	1435	92.2	50.3	7.4	7.42		790	168.00		3.13	0.08
	28/9/2019	10:00	7.85	19.1	4960	71.4	121	23	7.01		820	190.00	65.00	0.50	0.18
	14/6/2018	15:24	7.02	16.6	915	13.8	42	10.5	6.76		950	150	95	8.2	0.03

Puntos de muestreo	Periodo		Parámetros de control básicos												
	Fecha	Hora	pH	Temperatura °C	Conductividad (µS/cm)	Turbidez (NTU)	DQO (mg/l)	DBO5 (mg/l)	Oxígeno Disuelto (mg/l)	Sólidos en suspensión (mg/l)	Sólidos disueltos totales (mg/l)	Coliformes totales UFC/100 ml	Dureza total (mg/l)	Nitratos (mg/l)	Nitritos (mg/l)
M5 Río Guadalquivir – Puente San Bernardo	3/11/2018	10:05	7.48	22.03	263	17.5	75.3		6.27		1290	170	72.00	4.10	
	9/1/2018	15:00					32.2					41			
	26/3/2019	15:50	7.47	19.70	898	52.9	25.7	1.2	7.35		494		19.00	0.27	0.01
	14/5/2019	15:00	8.14	20.60	880	30.8	39	4.5	6.95		474	195.00		4.13	0.03
	28/9/2019	13:30	7.63	20.00	1547	4.22	43.1	4.8	7.22		1120	195.00	51.00	1.10	0.11

ANEXO 2. 2: Concentración de metales junio/2018

Puntos de control	Fecha de monitoreo	Na	Mg	Al	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
		(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)
Huacata M1	25/6/2018	4877.09	3147.98	19.15	620.67	1395.92	0.77	0.37	2.36	1.01	23.88	0.01	1.21	5.68	62.56
Huacata M2	25/6/2018	5217.80	3830.29	128.21	1472.41	2047.40	2.09	0.65	5.24	1886.65	6862.85	7.43	2.70	12.32	51.71
Huacata M3	25/6/2018	3074.52	1700.71	98.52	1113.48	1041.58	2.89	0.58	5.27	87.25	376.05	0.36	0.81	6.82	76.96
Huacata M4	25/6/2018	3258.24	1654.23	105.08	996.00	1117.10	2.87	0.48	2.63	102.44	428.95	0.44	0.68	5.76	72.36
Huacata M5	25/6/2018	3153.34	1635.70	130.40	1042.18	987.25	3.65	0.76	2.85	93.98	419.11	0.43	0.91	8.58	88.14
San Jacinto M1	26/6/2018	2979.52	1298.65	104.29	645.27	2103.94	2.39	0.94	1.42	51.21	695.66	0.13	0.82	3.38	96.78
San Jacinto M2	26/6/2018	3083.53	1197.38	120.61	651.70	877.08	2.73	0.94	1.91	57.50	702.05	0.14	1.01	4.67	26.42
San Jacinto M4	26/6/2018	3201.06	1267.81	44.63	1084.28	940.14	1.19	0.62	2.05	32.44	275.39	0.03	0.77	4.71	27.99
San Jacinto M5	26/6/2018	5007.20	1971.21	274.54	2429.58	3021.37	7.23	3.08	7.23	44.75	510.77	0.39	3.26	14.98	1102.44
Rincon Vittoria	27/6/2018	2223.40	482.33	87.30	477.48	567.49	1.71	0.76	3.32	4.12	81.49	0.11	1.14	9.61	71.04
LasTipas	28/6/2018	6432.07	2828.06	118.62	917.66	2043.62	2.79	1.02	1.48	9.81	148.64	0.27	0.95	8.06	60.68
Canasmoro	28/6/2018	9150.80	5099.79	35.44	825.23	2893.94	1.22	0.56	2.75	2.34	46.67	0.18	1.00	10.36	59.74
San Luis	28/6/2018	16022.86	3452.34	318.09	3301.74	3160.86	4.88	1.78	4.04	95.04	632.30	1.06	2.16	8.80	57.91
Quebrada San Pedro	28/6/2018	8382.38	2962.94	135.08	1905.87	2384.48	3.20	1.07	1.61	24.57	197.30	0.15	2.44	15.59	102.52

Puntos de control	Fecha de monitoreo	As	Se	Rb	Sr	Mo	Ag	Cd	Sn	Sb	Ba	La	Ce	Hg	Pb	Bi	Tl
		(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)
Huacata M1	25/6/2018	0.23	<0.000	0.31	49.23	0.30	<0.000	<0.000	1.05	2.78	16.89	0.06	0.04	0.55	1.03	<0.000	<0.000
Huacata M2	25/6/2018	6.53	<0.000	1.38	88.05	1.19	<0.000	<0.000	0.54	0.49	30.51	1.30	0.98	13.02	13.72	<0.000	<0.000
Huacata M3	25/6/2018	3.82	<0.000	1.08	35.69	0.14	<0.000	<0.000	0.14	0.36	20.60	0.41	0.58	4.61	8.18	<0.000	<0.000
Huacata M4	25/6/2018	3.71	<0.000	1.11	34.52	0.11	<0.000	<0.000	0.08	0.29	21.21	0.66	1.07	1.74	9.65	<0.000	<0.000
Huacata M5	25/6/2018	3.80	<0.000	1.16	35.10	0.04	<0.000	0.01	0.44	0.32	21.26	0.26	0.64	1.48	4.66	<0.000	<0.000
San Jacinto M1	26/6/2018	3.06	<0.000	0.61	30.65	0.10	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	15.85	0.37	0.97	0.63	8.47	<0.000	<0.000
San Jacinto M2	26/6/2018	2.73	<0.000	0.59	28.27	0.03	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	15.38	0.43	0.76	0.16	1.69	<0.000	<0.000
San Jacinto M4	26/6/2018	2.03	<0.000	0.52	31.85	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	15.50	0.16	0.39	1.33	1.95	<0.000	<0.000
San Jacinto M5	26/6/2018	2.43	<0.000	2.02	52.30	0.11	<0.000	0.25	0.16	0.38	41.48	0.48	1.29	1.16	14.26	<0.000	<0.000
Rincon Vittoria	27/6/2018	0.39	<0.000	0.37	14.88	0.41	<0.000	<0.000	0.05	271.98	65.00	0.09	0.11	0.45	2.30	<0.000	<0.000
LasTipas	28/6/2018	0.60	<0.000	0.43	63.29	0.50	<0.000	<0.000	<0.000	314.95	29.85	0.18	0.44	0.55	3.12	<0.000	<0.000

Puntos de control	Fecha de monitoreo	As (ppb)	Se (ppb)	Rb (ppb)	Sr (ppb)	Mo (ppb)	Ag (ppb)	Cd (ppb)	Sn (ppb)	Sb (ppb)	Ba (ppb)	La (ppb)	Ce (ppb)	Hg (ppb)	Pb (ppb)	Bi (ppb)	Tl (ppb)
Canasmoro	28/6/2018	0.35	<0.000	0.21	99.06	0.33	<0.000	<0.000	<0.000	230.16	16.53	0.08	0.09	1.92	2.07	<0.000	<0.000
San Luís	28/6/2018	2.28	0.10	1.58	84.99	0.04	<0.000	<0.000	0.14	195.91	42.86	0.76	2.02	0.21	2.48	<0.000	<0.000
Quebrada San Pedro	28/6/2018	1.01	<0.000	0.76	104.82	0.23	<0.000	<0.000	0.15	4.49	23.40	0.57	1.67	0.20	3.53	<0.000	<0.000

ANEXO 2. 2: Concentración de metales enero/2019

Puntos de monitoreo	Fecha de Monitoreo	Li	Be	B	Na	Mg	Al	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe
		(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)
San Jacinto M1	8/1/2019	0.84	<0.000	<0.000	1434.93	258.27	6.12	248.16	118.10	0.19	0.18	0.13	1.97	4.03
San Jacinto M2	8/1/2019	3.67	0.00	<0.000	5538.59	3226.80	152.23	616.44	1059.21	1.30	0.34	1.71	7.62	228.16
San Jacinto M3	8/1/2019	5.86	<0.000	3.43	12389.42	5636.69	171.08	1919.67	2599.29	4.13	0.87	2.44	142.70	400.19
San Jacinto M4	8/1/2019	8.95	0.15	<0.000	7988.59	4063.36	1685.03	3810.83	1311.25	19.78	3.64	3.98	161.20	2827.41
San Jacinto M5	8/1/2019	13.03	0.22	<0.000	5745.01	4046.68	2425.04	1309.81	1062.17	27.05	3.57	4.36	89.72	3517.77
Huacata M6	10/1/2019	1.78	0.09	<0.000	2727.34	1606.98	144.75	710.92	471.68	2.70	0.38	2.16	25.83	244.55
Huacata M7	10/1/2019	2.98	0.02	<0.000	3487.16	2012.55	16.48	454.17	527.59	1.00	0.15	0.95	0.68	18.68
Huacata M8	10/1/2019	1.90	<0.000	<0.000	3710.42	4238.34	119.72	750.52	1232.79	2.30	0.46	1.06	1521.96	2149.74
Huacata M9	10/1/2019	3.36	0.01	<0.000	3224.21	2251.29	357.35	916.54	838.01	8.06	0.60	1.34	492.33	843.55
Huacata M10	10/1/2019	0.91	0.12	<0.000	2702.60	1591.37	62.39	718.91	467.38	1.82	0.41	1.60	20.14	133.30
Las Tipas	7/1/2019	3.08	0.21	<0.000	3260.50	1772.71	1134.94	1239.75	605.04	21.10	2.52	2.36	55.39	1528.67
Qbda. San Pedro	3/1/2019	6.84	0.26	<0.000	3299.39	1715.70	1092.95	1269.60	561.81	14.87	2.49	2.26	50.49	1516.02
Canasmoro	4/1/2019	3.88	0.07	<0.000	3309.09	1772.59	1158.89	1275.68	598.91	16.33	2.52	1.90	55.53	1611.11
San Luís	4/1/2019	3.41	0.20	<0.000	3172.97	1791.88	1114.03	1162.15	594.04	15.55	2.46	2.26	53.85	1550.17
Rincón Vittoria	14/1/2019	3.14	0.15	<0.000	3232.86	1841.02	1304.37	1232.16	591.91	21.79	2.75	1.99	55.28	1728.70
San Jacinto M1	15/1/2019	3.65	0.02	<0.000	4275.97	2379.78	536.91	1211.29	822.49	9.81	1.70	1.24	85.91	1001.04
San Jacinto M2	15/1/2021	3.05	0.15	<0.000	4277.23	2402.29	656.75	1144.96	824.07	11.39	1.96	1.23	95.32	1186.87
San Jacinto M3	15/1/2021	2.60	0.10	<0.000	4117.47	2448.18	790.71	1078.64	851.60	13.53	2.15	2.10	110.97	1451.11
San Jacinto M4	15/1/2021	3.20	0.04	<0.000	4168.22	2401.90	646.24	1070.18	832.96	13.09	1.93	1.43	98.46	1179.22
San Jacinto M5	15/1/2021	2.84	<0.000	<0.000	4802.55	2365.20	333.20	2391.53	815.24	6.95	0.67	0.51	2.02	241.05
Qbda. San Pedro	8/1/2021	6.32	0.00	<0.000	6609.55	3910.65	738.01	1102.68	1247.56	8.82	1.39	2.01	32.71	1139.84
San Luís	8/1/2021	6.92	0.49	<0.000	5062.64	3051.17	3745.18	1628.52	981.95	45.43	5.52	3.37	136.30	3607.55

Puntos de monitoreo	Fecha de Monitoreo	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Rb	Sr	Mo	Ag	Cd	Sn	Sb
		(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)
San Jacinto M1	8/1/2019	<0.000	<0.000	0.43	30.84	0.24	0.02	0.27	7.11	0.07	<0.000	0.00	0.21	0.05
San Jacinto M2	8/1/2019	0.20	0.43	1.00	3.68	0.52	0.26	0.28	61.94	0.38	<0.000	0.04	0.20	0.10

Puntos de monitoreo	Fecha de Monitoreo	Co (ppb)	Ni (ppb)	Cu (ppb)	Zn (ppb)	As (ppb)	Se (ppb)	Rb (ppb)	Sr (ppb)	Mo (ppb)	Ag (ppb)	Cd (ppb)	Sn (ppb)	Sb (ppb)
San Jacinto M3	8/1/2019	0.39	0.46	2.11	4.33	3.88	0.01	0.90	125.50	0.75	<0.000	0.01	0.17	0.14
San Jacinto M4	8/1/2019	2.07	4.40	6.08	26.55	3.80	0.29	4.06	71.97	0.26	<0.000	0.03	0.11	0.14
San Jacinto M5	8/1/2019	2.40	5.75	5.67	21.15	0.96	0.34	2.80	57.17	0.17	0.46	0.05	0.11	0.10
Huacata M6	10/1/2019	0.36	0.22	1.33	5.09	2.12	0.04	1.13	30.23	0.21	<0.000	0.02	0.10	0.56
Huacata M7	10/1/2019	<0.000	0.09	1.48	18.13	0.39	0.05	0.30	33.47	0.25	<0.000	0.03	0.09	2.32
Huacata M8	10/1/2019	6.08	1.65	1.44	8.20	6.00	0.11	0.98	82.65	1.36	<0.000	0.02	0.08	0.61
Huacata M9	10/1/2019	2.48	1.26	1.34	19.86	4.38	0.26	2.02	53.02	0.34	<0.000	0.03	0.04	0.22
Huacata M10	10/1/2019	0.16	0.06	0.95	3.99	2.08	0.17	1.13	30.67	0.22	<0.000	0.01	0.05	0.53
Las Tipas	7/1/2019	0.69	1.89	4.34	16.53	2.85	0.32	1.84	35.78	0.14	<0.000	0.03	0.06	0.09
Qbda. San Pedro	3/1/2019	0.70	2.09	5.24	10.02	3.02	0.22	1.84	34.24	0.11	0.01	0.02	0.05	0.07
Canasmoro	4/1/2019	0.73	2.05	4.26	9.69	2.70	0.29	1.92	35.14	0.11	<0.000	0.03	0.04	0.06
San Luís	4/1/2019	0.72	1.81	3.39	7.34	2.68	0.38	1.82	36.09	0.08	<0.000	0.02	0.02	0.06
Rincón Vittoria	14/1/2019	0.78	2.08	3.92	7.95	2.85	0.36	2.15	36.83	0.12	<0.000	0.04	0.02	0.07
San Jacinto M1	15/1/2019	0.46	1.29	3.41	13.90	5.19	0.13	1.06	48.44	0.25	<0.000	0.05	0.01	0.08
San Jacinto M2	15/1/2021	0.53	1.36	3.49	14.30	4.70	0.24	1.22	49.06	0.19	<0.000	0.06	0.00	0.09
San Jacinto M3	15/1/2021	0.69	1.71	3.26	6.72	4.63	0.25	1.41	49.22	0.17	0.11	0.04	0.01	0.08
San Jacinto M4	15/1/2021	0.50	1.27	3.20	22.27	4.75	0.14	1.20	49.24	0.21	<0.000	0.07	0.00	0.08
San Jacinto M5	15/1/2021	0.07	0.33	1.03	0.81	4.25	0.07	0.77	45.15	0.37	<0.000	0.02	<0.000	0.10
Qbda. San Pedro	8/1/2021	0.70	1.95	2.88	9.52	0.90	0.28	1.08	66.02	0.24	<0.000	0.03	0.09	0.05
San Luís	8/1/2021	2.26	4.20	6.65	18.62	2.56	0.47	4.65	55.48	0.10	<0.000	0.06	0.07	0.09

Puntos de monitoreo	Fecha de Monitoreo	Ba	La	Ce	Hg	Pb	Bi	U	In
		(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)
San Jacinto M1	8/1/2019	2.90	0.02	0.03	<0.000	0.02	0.00	0.00	0.00
San Jacinto M2	8/1/2019	9.37	0.22	0.40	<0.000	6.07	0.00	0.04	0.00
San Jacinto M3	8/1/2019	37.98	0.45	1.09	<0.000	11.18	0.01	0.09	0.00
San Jacinto M4	8/1/2019	49.41	2.35	5.74	<0.000	8.31	0.01	0.25	0.01
San Jacinto M5	8/1/2019	40.05	3.39	7.69	<0.000	7.53	0.01	0.27	0.01
Huacata M6	10/1/2019	15.44	0.19	0.41	<0.000	10.50	0.01	0.05	0.00
Huacata M7	10/1/2019	6.42	0.01	0.02	<0.000	4.21	0.00	0.01	0.00
Huacata M8	10/1/2019	24.67	0.14	0.33	<0.000	5.83	0.01	0.09	0.00
Huacata M9	10/1/2019	37.11	0.37	0.95	<0.000	2.74	0.00	0.09	0.00
Huacata M10	10/1/2019	14.48	0.12	0.22	<0.000	3.63	0.01	0.03	0.00
Las Tipas	7/1/2019	32.56	2.37	5.81	<0.000	7.91	0.02	0.20	0.01
Qbda. San Pedro	3/1/2019	30.93	2.34	5.74	<0.000	6.97	0.03	0.19	0.01
Canasmoro	4/1/2019	33.03	2.44	5.89	<0.000	5.71	0.03	0.21	0.02
San Luís	4/1/2019	33.55	2.46	5.92	<0.000	7.31	0.02	0.20	0.02
Rincón Vittoria	14/1/2019	34.89	2.57	6.26	<0.000	5.34	0.05	0.20	0.03
San Jacinto M1	15/1/2019	24.85	1.15	2.75	<0.000	4.63	0.03	0.14	0.02
San Jacinto M2	15/1/2021	26.49	1.34	3.14	<0.000	4.35	0.04	0.14	0.02
San Jacinto M3	15/1/2021	30.13	1.55	3.65	<0.000	8.64	0.04	0.17	0.02
San Jacinto M4	15/1/2021	27.46	1.29	3.11	<0.000	3.94	0.04	0.14	0.02
San Jacinto M5	15/1/2021	12.52	0.19	0.40	<0.000	0.27	0.01	0.02	0.02
Qbda. San Pedro	8/1/2021	21.09	1.20	2.96	<0.000	5.74	0.02	0.10	0.01
San Luís	8/1/2021	74.51	5.82	15.13	<0.000	7.95	0.05	0.52	0.03

ANEXO 2. 2: Concentración de metales maro a junio/2019

Puntos de monitoreo	Fecha de Monitoreo	Li (ppb)	Be (ppb)	B (ppb)	Na (ppb)	Mg (ppb)	Al (ppb)	K (ppb)	Ca (ppb)	Ti (ppb)	V (ppb)	Cr (ppb)	Mn (ppb)
San Luis	26/3/2019	5.37	<0.000	1.98	6233.18	2132.21	327.43	1228.64	987.87	2.90	1.19	1.71	46.62
Qda San Pedro	26/3/2019	7.49	<0.000	0.94	7845.44	3147.06	277.65	1083.46	1282.51	2.39	0.85	1.66	26.61
Canasmoro	26/3/2019	4.66	<0.000	<0.000	7032.19	2923.09	49.28	649.42	1409.76	0.83	0.25	1.04	4.17
Las Tipas	28/3/2019	3.14	<0.000	<0.000	5844.94	3101.12	302.84	833.45	1597.29	2.05	0.96	1.89	27.39
San Jacinto M1	3/4/2019	<0.000	0.12	<0.000	2671.82	1108.47	209.33	368.24	462.38	1.06	0.80	1.70	58.56
San Jacinto M2	3/4/2019	<0.000	<0.000	<0.000	2720.59	1081.97	151.70	395.58	527.79	1.27	0.58	1.21	98.91
San Jacinto M3	3/4/2019	<0.000	<0.000	<0.000	2729.12	1096.49	108.63	315.92	581.96	1.18	0.48	1.60	65.05
San Jacinto M4	3/4/2019	<0.000	<0.000	<0.000	2695.07	1019.96	136.67	340.86	491.33	1.08	0.53	0.98	87.05
San Jacinto M5	3/4/2019	<0.000	<0.000	<0.000	2758.18	1046.90	157.23	399.12	486.92	1.04	0.61	1.09	46.46
Huacata M1	16/4/2019	<0.000	<0.000	<0.000	3858.04	2321.50	9.22	1718.52	615.45	0.30	0.03	1.32	0.48
Huacata M2	16/4/2019	<0.000	<0.000	<0.000	3825.10	2449.29	15.83	2342.72	639.76	0.43	0.10	0.96	40.05
Huacata M3	16/4/2019	<0.000	<0.000	<0.000	2608.83	1371.57	43.66	763.38	419.41	1.22	0.24	0.94	26.22
Huacata M4	16/4/2019	<0.000	<0.000	<0.000	3484.60	1589.81	47.10	944.86	490.81	1.49	0.30	2.17	26.09
Huacata M5	16/4/2019	1.93	<0.000	<0.000	4961.33	2422.77	54.92	3354.23	967.23	1.44	0.28	1.02	75.01
San Luis	15/5/2019	4.68	0.10	<0.000	16289.60	4241.58	426.26	2652.90	2248.78	2.36	2.32	1.51	132.30
Qda San Pedro	15/5/2019	<0.000	<0.000	<0.000	6845.26	2634.14	119.33	907.13	1328.19	1.36	0.63	1.17	22.78
San Jacinto M1	23/5/2019	<0.000	<0.000	<0.000	2801.37	1245.27	213.39	363.64	500.77	1.18	1.01	0.38	52.95
San Jacinto M2	23/5/2019	<0.000	0.10	<0.000	2704.90	1460.48	538.96	396.77	567.28	2.06	2.49	0.68	221.15
San Jacinto M3	23/5/2019	<0.000	<0.000	<0.000	2733.52	1155.14	127.26	409.80	436.82	1.15	0.56	0.24	45.57
San Jacinto M4	23/5/2019	<0.000	0.05	<0.000	2718.12	1145.05	141.02	206.25	502.01	1.10	0.65	0.32	28.01
San Jacinto M5	23/5/2019	<0.000	<0.000	<0.000	2789.70	1173.76	142.24	294.34	479.10	1.33	0.67	0.35	28.67
San Jacinto M1	20/6/2019	<0.000	<0.000	<0.000	3102.77	1603.52	229.11	619.86	2377.04	1.68	0.90	0.95	69.77
San Jacinto M2	20/6/2019	<0.000	<0.000	<0.000	2827.08	855.34	1.58	785.15	283.36	0.05	0.14	0.18	0.44

Puntos de monitoreo	Fecha de Monitoreo	Li (ppb)	Be (ppb)	B (ppb)	Na (ppb)	Mg (ppb)	Al (ppb)	K (ppb)	Ca (ppb)	Ti (ppb)	V (ppb)	Cr (ppb)	Mn (ppb)
San Jacinto M3	20/6/2019	<0.000	<0.000	<0.000	3140.30	1146.57	18.74	514.51	312.87	0.31	0.13	0.24	0.38
San Jacinto M4	20/6/2019	<0.000	<0.000	<0.000	4698.27	2325.10	274.04	903.57	3553.68	3.38	1.14	1.28	92.11
San Jacinto M5	20/6/2019	<0.000	<0.000	<0.000	2383.41	704.65	1.32	1063.39	180.47	0.10	0.12	0.09	7.11
Canasmoro	28/6/2019	<0.000	<0.000	<0.000	7197.81	4071.17	22.38	585.54	1413.21	0.50	0.15	0.13	11.84
Las Tipas	28/6/2019	1.27	<0.000	<0.000	9997.02	4381.15	189.63	1388.73	2174.42	1.84	1.05	0.73	36.79
Rincón Vittoria	28/6/2019	<0.000	<0.000	<0.000	1716.57	354.97	21.73	222.64	346.68	0.50	0.24	0.18	17.95
Huacata M1	3/6/2019	<0.000	<0.000	<0.000	4396.29	2878.21	15.00	1088.24	814.70	0.46	0.09	0.19	0.92
Huacata M2	3/6/2019	<0.000	<0.000	<0.000	4712.86	2736.64	23.26	1022.19	897.54	0.61	0.16	0.16	272.23
Huacata M3	3/6/2019	<0.000	<0.000	<0.000	3005.94	1701.95	66.56	709.37	512.84	1.69	0.34	0.19	19.13
Huacata M4	3/6/2019	<0.000	<0.000	<0.000	8059.28	1570.87	80.93	1635.56	578.62	1.83	0.44	0.28	27.63
Huacata M5	3/6/2019	2.52	<0.000	<0.000	4776.14	2626.50	79.26	979.11	1107.20	1.84	0.40	0.20	115.99

Puntos de monitoreo	Fecha de Monitoreo	Fe (ppb)	Co (ppb)	Ni (ppb)	Cu (ppb)	Zn (ppb)	As (ppb)	Se (ppb)	Rb (ppb)	Sr (ppb)	Mo (ppb)	Ag (ppb)	Cd (ppb)
San Luis	26/3/2019	600.81	4.28	3.36	2.44	9.74	1.54	0.10	1.02	41.89	0.15	2.76	0.21
Qda San Pedro	26/3/2019	484.68	0.78	2.91	1.60	7.82	0.61	<0.000	0.76	55.99	0.16	1.77	0.13
Canasmoro	26/3/2019	86.18	0.21	2.29	0.71	11.56	0.49	0.10	0.24	52.58	0.40	2.30	0.07
Las Tipas	28/3/2019	462.38	0.68	2.66	1.77	25.33	0.48	0.09	0.57	53.14	0.08	1.60	0.06
San Jacinto M1	3/4/2019	632.24	0.53	2.31	2.24	9.63	1.67	0.10	0.60	23.50	0.07	2.73	0.05
San Jacinto M2	3/4/2019	577.56	0.80	2.36	2.41	7.49	1.79	<0.000	0.49	23.06	0.07	1.90	0.03
San Jacinto M3	3/4/2019	588.57	0.69	1.84	1.96	11.62	2.27	<0.000	0.37	22.62	0.13	1.01	0.06
San Jacinto M4	3/4/2019	411.11	0.52	1.92	2.30	12.93	1.51	0.04	0.44	22.75	0.07	0.64	0.02
San Jacinto M5	3/4/2019	426.64	0.35	1.75	3.14	11.39	1.57	<0.000	0.53	23.15	0.06	0.62	0.02
Huacata M1	16/4/2019	24.74	0.05	1.23	9.09	24.59	0.34	0.03	0.23	34.63	0.22	0.14	0.06

Puntos de monitoreo	Fecha de Monitoreo	Fe (ppb)	Co (ppb)	Ni (ppb)	Cu (ppb)	Zn (ppb)	As (ppb)	Se (ppb)	Rb (ppb)	Sr (ppb)	Mo (ppb)	Ag (ppb)	Cd (ppb)
Huacata M2	16/4/2019	93.01	0.27	1.35	7.13	26.16	0.44	0.03	0.36	38.52	0.39	0.08	0.05
Huacata M3	16/4/2019	141.13	0.14	1.15	0.64	3.40	1.35	<0.000	1.36	24.36	0.15	0.21	0.01
Huacata M4	16/4/2019	165.64	0.15	0.64	0.56	2.59	1.59	<0.000	1.77	29.93	0.21	0.14	0.00
Huacata M5	16/4/2019	283.87	0.68	1.33	13.78	5.66	4.31	0.26	1.84	54.27	0.33	0.08	0.02
San Luís	15/5/2019	987.70	1.43	1.88	9.90	22.06	2.33	0.08	1.54	96.33	0.14	<0.000	0.04
Qda San Pedro	15/5/2019	201.42	0.27	0.63	1.51	10.08	0.62	<0.000	0.49	55.56	0.10	<0.000	0.01
San Jacinto M1	23/5/2019	682.45	0.45	0.78	4.68	7.11	1.80	<0.000	0.73	25.61	0.02	0.08	0.01
San Jacinto M2	23/5/2019	1779.73	1.56	1.08	3.90	9.77	2.91	0.15	1.50	31.76	<0.000	0.04	0.00
San Jacinto M3	23/5/2019	912.81	0.20	<0.000	3.31	34.89	1.68	<0.000	0.46	24.84	0.04	<0.000	0.01
San Jacinto M4	23/5/2019	413.22	0.18	0.13	3.17	35.22	1.37	<0.000	0.50	24.00	0.02	0.09	0.00
San Jacinto M5	23/5/2019	423.62	0.24	0.19	1.81	9.01	1.47	<0.000	0.56	24.73	0.03	<0.000	0.00
San Jacinto M1	20/6/2019	650.28	0.41	0.44	2.02	29.81	1.76	<0.000	0.71	33.04	0.02	<0.000	0.01
San Jacinto M2	20/6/2019	4.35	<0.000	<0.000	0.06	0.25	0.25	<0.000	0.49	11.55	2.50	<0.000	<0.000
San Jacinto M3	20/6/2019	12.20	<0.000	<0.000	0.55	0.08	1.00	<0.000	0.28	16.51	1.91	<0.000	<0.000
San Jacinto M4	20/6/2019	1215.58	0.44	0.54	3.68	83.07	2.76	0.00	0.89	50.34	0.10	<0.000	0.03
San Jacinto M5	20/6/2019	4.73	0.04	<0.000	1.30	0.08	1.89	<0.000	0.34	9.18	1.36	<0.000	<0.000
Canasmoro	28/6/2019	57.84	0.08	<0.000	2.34	6.03	0.25	0.05	0.17	73.67	0.28	<0.000	0.02
Las Tipas	28/6/2019	381.36	0.69	1.49	15.06	23.59	0.95	0.07	0.69	91.26	0.12	<0.000	0.01
Rincón Vittoria	28/6/2019	91.13	0.17	<0.000	2.89	8.87	0.39	<0.000	0.24	9.39	0.02	<0.000	0.00
Huacata M1	3/6/2019	13.87	<0.000	0.02	40.38	62.05	0.16	<0.000	0.21	43.62	0.19	<0.000	0.03
Huacata M2	3/6/2019	1869.22	1.34	0.21	25.45	52.65	1.45	0.00	0.62	55.05	0.24	<0.000	0.04
Huacata M3	3/6/2019	229.22	0.15	<0.000	1.17	3.51	1.04	<0.000	1.22	29.21	0.10	<0.000	0.00
Huacata M4	3/6/2019	274.21	0.24	<0.000	1.60	12.45	1.16	<0.000	1.44	27.67	0.12	<0.000	0.00
Huacata M5	3/6/2019	390.17	0.85	0.54	1.89	12.20	4.68	0.25	1.38	60.96	0.19	<0.000	0.01

Puntos de monitoreo	Fecha de Monitoreo	Sn (ppb)	Sb (ppb)	Ba (ppb)	La (ppb)	Ce (ppb)	Hg (ppb)	Pb (ppb)	Bi (ppb)	Tl (ppb)	U (ppb)
San Luis	26/3/2019	<0.000	0.05	23.26	0.77	2.00	<0.000	5.40	0.50	0.24	0.11
Qda San Pedro	26/3/2019	<0.000	0.04	17.89	0.58	1.40	<0.000	5.82	0.44	0.10	0.06
Canasmoro	26/3/2019	<0.000	0.04	7.01	0.27	0.55	<0.000	4.65	0.32	0.03	0.02
Las Tipas	28/3/2019	<0.000	0.04	18.68	0.68	1.60	<0.000	6.79	0.21	<0.000	0.06
San Jacinto M1	3/4/2019	<0.000	0.03	16.20	0.73	1.86	<0.000	5.87	0.22	<0.000	0.07
San Jacinto M2	3/4/2019	<0.000	0.03	16.65	0.66	1.42	<0.000	4.52	0.21	<0.000	0.05
San Jacinto M3	3/4/2019	<0.000	0.03	12.09	0.41	1.03	<0.000	6.12	0.12	<0.000	0.05
San Jacinto M4	3/4/2019	<0.000	0.03	15.40	0.54	1.35	<0.000	4.59	0.15	<0.000	0.06
San Jacinto M5	3/4/2019	<0.000	0.02	14.61	0.52	1.34	<0.000	4.93	0.09	<0.000	0.06
Huacata M1	16/4/2019	<0.000	1.91	6.52	0.02	0.04	0.53	5.50	0.07	<0.000	0.01
Huacata M2	16/4/2019	<0.000	1.65	8.15	0.03	0.06	0.22	3.71	0.06	<0.000	0.01
Huacata M3	16/4/2019	<0.000	0.33	11.70	0.08	0.21	<0.000	4.02	0.09	<0.000	0.02
Huacata M4	16/4/2019	<0.000	0.38	14.58	0.09	0.24	<0.000	6.37	0.07	<0.000	0.02
Huacata M5	16/4/2019	<0.000	0.37	20.14	0.13	0.32	0.50	4.29	0.06	<0.000	0.07
San Luis	15/5/2019	<0.000	0.04	49.91	1.16	3.21	<0.000	6.45	0.05	<0.000	0.31
Qda San Pedro	15/5/2019	<0.000	0.01	17.43	0.55	1.14	<0.000	4.47	0.03	<0.000	0.05
San Jacinto M1	23/5/2019	<0.000	0.01	18.79	0.65	1.70	<0.000	0.70	0.02	<0.000	0.06
San Jacinto M2	23/5/2019	<0.000	0.01	40.45	1.89	4.96	<0.000	1.85	0.01	<0.000	0.18
San Jacinto M3	23/5/2019	<0.000	0.01	22.90	0.35	0.86	<0.000	0.51	0.01	<0.000	0.03
San Jacinto M4	23/5/2019	<0.000	0.01	15.11	0.41	1.03	<0.000	0.82	0.00	<0.000	0.04
San Jacinto M5	23/5/2019	<0.000	0.01	15.44	0.40	1.00	<0.000	0.41	0.00	<0.000	0.04
San Jacinto M1	20/6/2019	<0.000	0.01	19.64	0.63	1.60	<0.000	3.35	0.01	<0.000	0.07
San Jacinto M2	20/6/2019	<0.000	<0.000	2.95	0.00	0.00	0.19	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000

Puntos de monitoreo	Fecha de Monitoreo	Sn (ppb)	Sb (ppb)	Ba (ppb)	La (ppb)	Ce (ppb)	Hg (ppb)	Pb (ppb)	Bi (ppb)	Tl (ppb)	U (ppb)
San Jacinto M3	20/6/2019	<0.000	0.00	3.84	0.01	0.02	0.12	0.01	<0.000	<0.000	0.00
San Jacinto M4	20/6/2019	<0.000	0.07	29.03	0.79	2.00	<0.000	5.03	0.02	<0.000	0.08
San Jacinto M5	20/6/2019	<0.000	<0.000	2.15	0.00	0.00	0.20	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000
Canasmoro	28/6/2019	<0.000	0.02	9.75	0.11	0.23	<0.000	0.11	<0.000	<0.000	0.01
Las Tipas	28/6/2019	<0.000	0.03	30.30	0.67	1.68	<0.000	1.06	0.00	<0.000	0.08
Rincón Vittoria	28/6/2019	<0.000	<0.000	7.06	0.09	0.21	<0.000	0.44	0.00	<0.000	0.02
Huacata M1	3/6/2019	<0.000	2.30	7.94	0.03	0.04	3.28	0.44	<0.000	<0.000	0.00
Huacata M2	3/6/2019	<0.000	0.67	29.86	0.06	0.14	0.85	0.59	<0.000	<0.000	0.04
Huacata M3	3/6/2019	<0.000	0.51	13.10	0.14	0.35	<0.000	0.31	<0.000	<0.000	0.02
Huacata M4	3/6/2019	<0.000	0.39	15.23	0.24	0.58	<0.000	0.61	0.01	<0.000	0.03
Huacata M5	3/6/2019	<0.000	0.29	18.99	0.28	0.71	<0.000	0.51	<0.000	<0.000	0.10

ANEXO 2. 2: Concentración de metales septiembre y octubre /2019

Puntos de monitoreo	Fecha de monitoreo	Li	Be	B	Na	Mg	Al	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn
		(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)
Las Tipas	28/9/2019	1.12	0.08	31.70	5298.70	2698.47	63.96	660.78	18022.61	1.44	0.33	1.49	17.03
Qda. San Pedro	28/9/2019	2.69	0.10	35.76	9296.93	3213.32	56.51	1586.71	17096.60	1.44	0.48	1.42	70.62
San Luís	20/9/2019	11.38	0.10	69.53	33233.71	4848.30	557.02	5949.02	19132.17	4.80	1.98	3.78	167.91
Canasmoro	25/9/2019	5.36	0.01	40.60	13871.64	3453.24	170.95	2369.01	18103.44	2.43	0.80	2.14	74.94
Rincón Vittoria	30/9/2019	0.34	0.03	2.64	4302.91	693.91	0.10	759.32	3681.05	0.10	0.01	0.01	12.34
Huacata M1	15/10/2019	0.53	0.07	12.14	3008.86	1600.03	426.96	455.22	4328.48	2.62	0.99	1.56	90.76
Huacata M2	15/10/2019	0.80	0.05	12.43	3118.93	1550.12	199.00	431.43	4824.11	1.89	0.55	1.44	30.87
Huacata M3	15/10/2019	3.59	0.14	9.27	3151.87	1888.79	1621.23	573.43	7225.85	3.71	3.82	3.93	483.82
Huacata M4	15/10/2019	0.74	0.09	9.94	3094.23	1629.46	427.97	553.72	4449.84	3.19	1.01	1.87	92.94
Huacata M5	15/10/2019	<0.000	0.05	10.79	3099.73	1537.75	193.22	408.29	4796.36	1.92	0.54	1.61	30.66
San Jacinto M1	16/10/2019	<0.000	<0.000	10.06	3104.58	1644.48	155.77	486.11	6811.80	1.66	0.58	1.20	50.70
San Jacinto M2	16/10/2019	0.74	0.12	8.61	3154.99	1630.48	243.59	472.16	4496.90	2.81	0.82	1.39	89.63
San Jacinto M3	16/10/2019	0.25	0.08	14.16	3159.05	1601.84	162.97	486.34	5016.39	1.75	0.54	1.45	36.31
San Jacinto M4	16/10/2019	<0.000	<0.000	13.49	3141.04	1561.72	190.56	431.97	4779.83	2.19	0.55	1.43	30.94
San Jacinto M5	16/10/2019	2.55	0.22	7.96	3144.00	1894.17	1666.32	579.82	7236.79	3.89	3.90	3.75	477.14

Puntos de monitoreo	Fecha de monitoreo	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb
		(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)
Las Tipas	28/9/2019	147.96	0.10	0.91	2.32	46.33	0.52	0.05	64.66	0.87	0.02	0.05	0.28
Qda. San Pedro	28/9/2019	331.09	0.21	0.80	2.46	31.72	2.01	0.08	83.30	0.98	0.03	0.03	0.27
San Luís	20/9/2019	1168.01	1.14	2.68	5.29	22.48	4.97	0.19	147.36	1.04	0.05	0.03	13.77
Canasmoro	25/9/2019	455.73	0.39	1.18	2.91	30.65	2.24	<0.000	92.53	0.84	0.03	0.02	4.08
Rincón Vittoria	30/9/2019	3.02	<0.000	0.15	0.64	18.00	0.06	<0.000	30.47	1.08	0.01	<0.000	0.13

Puntos de monitoreo	Fecha de monitoreo	Fe (ppb)	Co (ppb)	Ni (ppb)	Cu (ppb)	Zn (ppb)	As (ppb)	Se (ppb)	Sr (ppb)	Mo (ppb)	Cd (ppb)	Sn (ppb)	Sb (ppb)
Huacata M1	15/10/2019	1073.06	0.46	1.51	2.73	14.44	2.31	<0.000	37.40	0.33	0.01	0.01	0.10
Huacata M2	15/10/2019	533.11	0.12	0.81	2.20	19.97	1.56	<0.000	36.80	0.37	0.02	0.01	0.10
Huacata M3	15/10/2019	4442.94	2.51	4.48	5.77	28.20	5.47	0.28	40.51	0.67	0.03	0.02	0.07
Huacata M4	15/10/2019	1105.98	0.45	1.38	2.86	19.28	2.15	0.03	37.38	0.59	0.01	0.01	0.09
Huacata M5	15/10/2019	535.77	0.12	0.75	1.91	9.67	1.50	0.00	36.32	0.31	0.02	0.00	0.08
San Jacinto M1	16/10/2019	544.42	0.19	0.79	1.66	17.80	1.96	<0.000	39.55	0.28	0.01	<0.000	0.07
San Jacinto M2	16/10/2019	843.87	0.38	1.01	2.16	11.42	2.20	0.03	37.68	0.20	0.01	<0.000	0.07
San Jacinto M3	16/10/2019	477.93	0.12	0.77	1.96	9.19	1.65	<0.000	37.62	0.24	0.01	<0.000	0.07
San Jacinto M4	16/10/2019	523.93	0.12	12.49	1.92	10.22	1.53	<0.000	36.60	0.22	0.02	<0.000	0.07
San Jacinto M5	16/10/2019	4430.16	2.48	4.39	5.72	28.67	5.45	0.27	41.03	0.15	0.04	<0.000	0.05

Puntos de monitoreo	Fecha de monitoreo	Ba (ppb)	La (ppb)	Hg (ppb)	Pb (ppb)	Bi (ppb)	Tl (ppb)
Las Tipas	28/9/2019	20.29	0.21	0.00	7.12	0.01	<0.000
Qda. San Pedro	28/9/2019	23.01	0.16	<0.000	7.19	0.01	<0.000
San Luís	20/9/2019	66.89	0.85	<0.000	8.83	0.02	<0.000
Canasmoro	25/9/2019	32.34	0.35	<0.000	7.85	0.01	<0.000
Rincón Vittoria	30/9/2019	4.99	0.00	<0.000	0.02	<0.000	<0.000
Huacata M1	15/10/2019	24.94	0.70	<0.000	9.69	<0.000	<0.000
Huacata M2	15/10/2019	18.90	0.32	<0.000	12.28	0.00	<0.000
Huacata M3	15/10/2019	58.42	2.36	<0.000	OR	0.06	<0.000
Huacata M4	15/10/2019	23.75	0.61	<0.000	OR	0.10	<0.000
Huacata M5	15/10/2019	17.72	0.51	<0.000	OR	0.07	<0.000
San Jacinto M1	16/10/2019	21.33	0.42	<0.000	15.99	<0.000	<0.000
San Jacinto M2	16/10/2019	24.57	0.61	<0.000	12.41	<0.000	<0.000

Puntos de monitoreo	Fecha de monitoreo	Ba (ppb)	La (ppb)	Hg (ppb)	Pb (ppb)	Bi (ppb)	Tl (ppb)
San Jacinto M3	16/10/2019	19.06	0.32	<0.000	9.89	<0.000	<0.000
San Jacinto M4	16/10/2019	17.98	0.31	<0.000	8.31	0.00	<0.000
San Jacinto M5	16/10/2019	60.00	2.72	<0.000	12.35	<0.000	<0.000

ANEXO 2. 3: Concentraciones en lodos 2019

Fecha de Monitoreo	Mg	Al	K	Mn	Fe	Ba	Li	Be	B	Na	Ti	V
	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)
16/4/2019	29.71	406.51	104.01	1.84	234.57	5.07	281.88	15.88	105.52	5711.07	7070.23	896.57
16/4/2019	49.58	584.88	207.76	2.75	OR	9.27	353.85	23.32	173.14	7791.04	3207.80	1052.51
16/4/2019	42.08	532.85	182.21	2.02	247.64	8.54	291.61	20.73	132.61	7003.91	3479.38	943.51
17/4/2019	57.22	721.51	172.64	22.16	OR	5.87	547.99	24.44	255.92	8386.63	6872.61	1017.54

Fecha de Monitoreo	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Rb	Sr	Mo	Ag	Cd
	(ppb)											
16/4/2019	328.46	75.58	152.52	181.24	901.81	186.26	25.18	663.08	282.06	16.66	1.56	1.88
16/4/2019	458.52	115.42	263.82	266.45	2681.94	177.37	25.04	1009.79	246.59	23.33	1.05	3.88
16/4/2019	400.80	110.72	221.37	211.30	1335.03	125.68	29.58	903.86	273.00	17.44	1.07	2.38
17/4/2019	523.54	142.18	255.08	221.08	1993.55	324.92	28.61	1077.91	712.39	9.39	1.25	1.97

Fecha de Monitoreo	Sn	Sb	La	Ce	Hg	Tl	Pb	Bi	U
	(ppb)	(ppb)							
16/4/2019	19.07	18.02	328.31	660.25	0.22	4.82	131.72	2.70	12.12
16/4/2019	19.74	24.51	252.12	517.40	0.25	6.33	305.30	2.24	15.21
16/4/2019	18.77	14.60	357.49	720.65	0.23	6.03	193.99	2.04	14.28
17/4/2019	24.63	5.84	304.79	625.61	0.18	5.41	184.84	3.24	11.87

ANEXO 2. 4: Ajuste por temperaturas - permeabilidad de la membrana a diferentes temperaturas

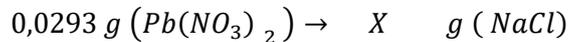
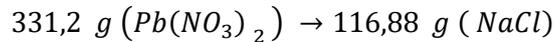
Permead o P (l/hr)	Concentr ado C (l/hr)	Caudal Ingreso (L/hr)	Flux (L/m ² h)	Temperatura		A (L/m 2hb ar)	1/T, K-1	LN(A)	1/T-1/T0
				T, °C	T, K				
60.4	269.95	330.35	24.16	19	292	4.832	0.00342466	1.57526046	1.16883E-05
60.51	269.95	330.46	24.204	19.2	292.2	4.841	0.00342231	1.57708	9.3442E-06
60.51	269.95	330.46	24.204	19.3	292.3	4.841	0.00342114	1.57708	8.17338E-06
60.51	269.95	330.46	24.204	19.4	292.4	4.940	0.00341997	1.5972827	7.00336E-06
60.51	273.55	334.06	24.204	19.5	292.5	4.940	0.0034188	1.5972827	5.83414E-06
61.02	269.95	330.97	24.408	19.7	292.7	4.981	0.00341647	1.60567574	3.49809E-06
61.53	273.55	335.08	24.612	19.8	292.8	4.922	0.0034153	1.59379622	2.33126E-06
62.03	273.55	335.58	24.812	20	293	4.962	0.00341297	1.60188949	0
63.05	277.14	340.19	25.22	20.1	293.1	5.044	0.0034118	1.61819942	-1.1644E-06
64.07	280.74	344.81	25.628	21.5	294.5	5.126	0.00339559	1.63424759	-1.7384E-05
65.08	280.74	345.82	26.032	22	295	5.313	0.00338983	1.67009135	-2.3139E-05
65.59	280.74	346.33	26.236	22.1	295.1	5.354	0.00338868	1.67789731	-2.4287E-05
66.61	280.74	347.35	26.644	22.2	295.2	5.438	0.00338753	1.69332878	-2.5435E-05
68.64	280.74	349.38	27.456	23	296	5.603	0.00337838	1.72334952	-3.4591E-05
69.15	287.94	357.09	27.66	23.8	296.8	5.645	0.00336927	1.73075212	-4.3697E-05
69.15	284.94	354.09	27.66	24	297	5.645	0.003367	1.73075212	-4.5966E-05
70.17	291.54	361.71	28.068	24.2	297.2	5.614	0.00336474	1.72519222	-4.8232E-05
70.68	309.54	380.22	28.272	24.5	297.5	5.654	0.00336134	1.732434	-5.1625E-05
71.19	309.54	380.73	28.476	24.6	297.6	5.695	0.00336022	1.73962371	-5.2754E-05
71.69	309.54	381.23	28.676	24.8	297.8	5.735	0.00335796	1.74662262	-5.5011E-05
71.69	313.14	384.83	28.676	25	298	5.735	0.0033557	1.74662262	-5.7265E-05
71.19	313.14	384.33	28.476	25.1	298.1	5.695	0.00335458	1.73962371	-5.839E-05
71.69	320.34	392.03	28.676	25.3	298.3	5.852	0.00335233	1.76682533	-6.0639E-05
72.78	331.13	403.91	29.112	25.5	298.5	5.822	0.00335008	1.76171255	-6.2886E-05

Permeado P (l/hr)	Concentrado C (l/hr)	Caudal Ingreso (L/hr)	Flux (L/m2h)	Temperatura		A (L/m2hbar)	1/T, K-1	LN(A)	1/T-1/T0
				T, °C	T, K				
72.29	331.13	403.42	28.916	25.8	298.8	5.783	0.00334672	1.75495716	-6.6249E-05
72.8	331.13	403.93	29.12	25.9	298.9	5.824	0.0033456	1.76198731	-6.7369E-05

PRECIPITACION DE LA SALES

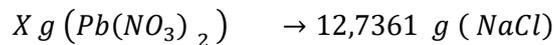
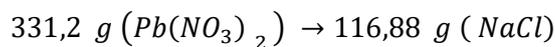
ANEXO 2. 5: Cálculos del reactivo limitante

a) Para concentración Baja "C1" del producto $Pb(NO_3)_2 + NaCl$:



$$X \text{ g } (NaCl) = \frac{0,0293 \text{ g } (Pb(NO_3)_2) * 116,88 \text{ g } (NaCl)}{331,2 \text{ g } (Pb(NO_3)_2)}$$

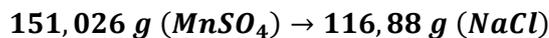
$$\underline{X \text{ g } (NaCl) = 0,0103 \text{ g } NaCl}$$



$$X \text{ g } (Pb(NO_3)_2) = \frac{12,7361 \text{ g } (NaCl) * 331,2 \text{ g } (Pb(NO_3)_2)}{116,88 \text{ g } (NaCl)}$$

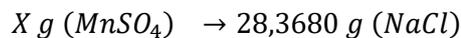
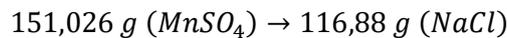
$$\underline{X \text{ g } (Pb(NO_3)_2) = 36,0899 \text{ g } (Pb(NO_3)_2)}$$

b) Para concentración Baja "C1" del producto $MnSO_4 + NaCl$:



$$X \text{ g } (NaCl) = \frac{0,3554 \text{ g } (MnSO_4) * 116,88 \text{ g } (NaCl)}{151,026 \text{ g } (MnSO_4)}$$

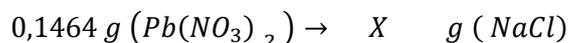
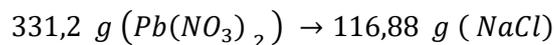
$$X \text{ g } (NaCl) = 0,2750 \text{ g } NaCl$$



$$X \text{ g } (MnSO_4) = \frac{28,3680 \text{ g } (NaCl) * 151,026 \text{ g } (MnSO_4)}{116,88 \text{ g } (NaCl)}$$

$$X \text{ g } (MnSO_4) = 36,66 \text{ g } (MnSO_4)$$

c) Para concentración Media "C2" del producto $Pb(NO_3)_2 + NaCl$:



$$X \text{ g } (NaCl) = \frac{0,1464 \text{ g } (Pb(NO_3)_2) * 116,88 \text{ g } (NaCl)}{331,2 \text{ g } (Pb(NO_3)_2)}$$

$$X \text{ g (NaCl)} = 0,0517 \text{ g NaCl}$$

$$331,2 \text{ g (Pb(NO}_3)_2) \rightarrow 116,88 \text{ g (NaCl)}$$

$$X \text{ g (Pb(NO}_3)_2) \rightarrow 63,6803 \text{ g (NaCl)}$$

$$X \text{ g (Pb(NO}_3)_2) = \frac{63,6803 \text{ g (NaCl)} * 331,2 \text{ g (Pb(NO}_3)_2)}{116,88 \text{ g (NaCl)}}$$

$$X \text{ (Pb(NO}_3)_2)} = 180,45 \text{ g (Pb(NO}_3)_2)$$

d) Para concentración Baja "C1" del producto $\text{MnSO}_4 + \text{NaCl}$:

$$151,026 \text{ g (MnSO}_4) \rightarrow 116,88 \text{ g (NaCl)}$$

$$1,7768 \text{ g (MnSO}_4) \rightarrow X \text{ g (NaCl)}$$

$$X \text{ g (NaCl)} = \frac{1,7768 \text{ g (MnSO}_4) * 116,88 \text{ g (NaCl)}}{151,026 \text{ g (MnSO}_4)}$$

$$X \text{ g (NaCl)} = 1,3750 \text{ g NaCl}$$

$$151,026 \text{ g (MnSO}_4) \rightarrow 116,88 \text{ g (NaCl)}$$

$$X \text{ g (MnSO}_4) \rightarrow 141,84 \text{ g (NaCl)}$$

$$X \text{ g (MnSO}_4) = \frac{141,84 \text{ g (NaCl)} * 151,026 \text{ g (MnSO}_4)}{116,88 \text{ g (NaCl)}}$$

$$X \text{ g (MnSO}_4) = 183,28 \text{ g (MnSO}_4)$$

e) Para concentración Alta "C3" del producto $\text{Pb(NO}_3)_2 + \text{NaCl}$:

$$331,2 \text{ g (Pb(NO}_3)_2) \rightarrow 116,88 \text{ g (NaCl)}$$

$$0,2928 \text{ g (Pb(NO}_3)_2) \rightarrow X \text{ g (NaCl)}$$

$$X \text{ g (NaCl)} = \frac{0,2928 \text{ g (Pb(NO}_3)_2) * 116,88 \text{ g (NaCl)}}{331,2 \text{ g (Pb(NO}_3)_2)}$$

$$X \text{ g (NaCl)} = 0,1033 \text{ g NaCl}$$

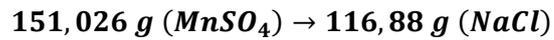
$$331,2 \text{ g (Pb(NO}_3)_2) \rightarrow 116,88 \text{ g (NaCl)}$$

$$X \text{ g (Pb(NO}_3)_2) \rightarrow 127,3605 \text{ g (NaCl)}$$

$$X \text{ g (Pb(NO}_3)_2) = \frac{127,3605 \text{ g (NaCl)} * 331,2 \text{ g (Pb(NO}_3)_2)}{116,88 \text{ g (NaCl)}}$$

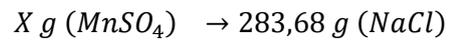
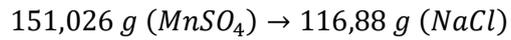
$$X \text{ g (Pb(NO}_3)_2) = 360,898 \text{ g (Pb(NO}_3)_2)$$

f) Para concentración Alta "C3" del producto $MnSO_4 + NaCl$:



$$X \text{ g } (NaCl) = \frac{3,5536 \text{ g } (MnSO_4) * 116,88 \text{ g } (NaCl)}{151,026 \text{ g } (MnSO_4)}$$

$$X \text{ g } (NaCl) = 2,7502 \text{ g } NaCl$$

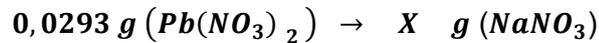
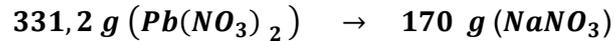


$$X \text{ g } (MnSO_4) = \frac{283,68 \text{ g } (NaCl) * 151,026 \text{ g } (MnSO_4)}{116,88 \text{ g } (NaCl)}$$

$$X \text{ g } (MnSO_4) = 366,56 \text{ g } (MnSO_4)$$

ANEXO 2. 6: Cálculo de las cantidades a producir debido a la mezcla de las sales

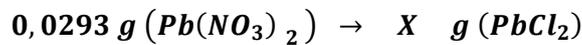
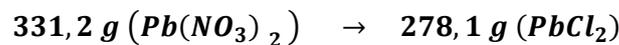
a) Cantidad de NaNO_3 a producirse para la concentración C1:



$$X \text{ g } (\text{NaNO}_3) = \frac{0,0293 \text{ g } (\text{Pb}(\text{NO}_3)_2) * 170 \text{ g } (\text{NaNO}_3)}{331,2 \text{ g } (\text{Pb}(\text{NO}_3)_2)}$$

$$X \text{ g } (\text{NaNO}_3) = 0,01504 \text{ g } (\text{NaNO}_3)$$

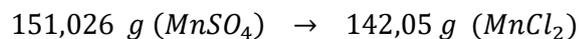
b) Cantidad de PbCl_2 a producirse para la concentración C1:



$$X \text{ g } (\text{PbCl}_2) = \frac{0,0293 \text{ g } (\text{Pb}(\text{NO}_3)_2) * 278,1 \text{ g } (\text{PbCl}_2)}{331,2 \text{ g } (\text{Pb}(\text{NO}_3)_2)}$$

$$X \text{ g } (\text{PbCl}_2) = 0,0246 \text{ g } (\text{PbCl}_2)$$

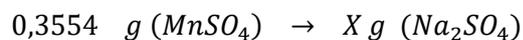
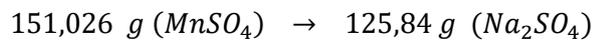
c) Cantidad de MnCl_2 a producirse para la concentración C1:



$$X \text{ g } (\text{MnCl}_2) = \frac{0,3554 \text{ g } (\text{MnSO}_4) * 142,05 \text{ g } (\text{MnCl}_2)}{151,026 \text{ g } (\text{MnSO}_4)}$$

$$X \text{ g } (\text{MnCl}_2) = 0,3343 \text{ g } (\text{MnCl}_2)$$

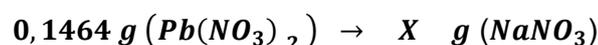
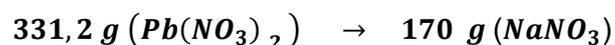
d) Cantidad de Na_2SO_4 a producirse para la concentración C1:



$$X \text{ g } (\text{Na}_2\text{SO}_4) = \frac{0,3554 \text{ g } (\text{MnSO}_4) * 125,84 \text{ g } (\text{Na}_2\text{SO}_4)}{151,026 \text{ g } (\text{MnSO}_4)}$$

$$X \text{ g } (\text{Na}_2\text{SO}_4) = 0,2961 \text{ g } (\text{Na}_2\text{SO}_4)$$

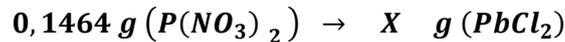
e) Cantidad de NaNO_3 a producirse para la concentración C2



$$X \text{ g (NaNO}_3) = \frac{0,1464 \text{ g (Pb(NO}_3)_2) * 170 \text{ g (NaNO}_3)}{331,2 \text{ g (Pb(NO}_3)_2)}$$

$$X \text{ g (NaNO}_3) = 0,0751 \text{ g (NaNO}_3)$$

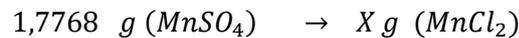
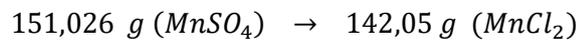
f) Cantidad de PbCl₂ a producirse para la concentración C2



$$X \text{ g (PbCl}_2) = \frac{0,1464 \text{ g (Pb(NO}_3)_2) * 278,1 \text{ g (PbCl}_2)}{331,2 \text{ g (Pb(NO}_3)_2)}$$

$$X \text{ g (PbCl}_2) = 0,1229 \text{ g (PbCl}_2)$$

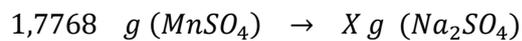
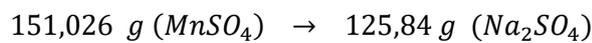
g) Cantidad de MnCl₂ a producirse para la concentración C2:



$$X \text{ g (MnCl}_2) = \frac{1,7768 \text{ g (MnSO}_4) * 142,05 \text{ g (MnCl}_2)}{151,026 \text{ g (MnSO}_4)}$$

$$X \text{ g (MnCl}_2) = 1,6712 \text{ g (MnCl}_2)$$

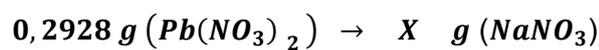
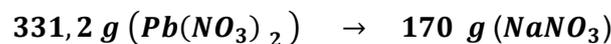
h) Cantidad de Na₂SO₄ a producirse para la concentración C2:



$$X \text{ g (Na}_2\text{SO}_4) = \frac{1,7768 \text{ g (MnSO}_4) * 125,84 \text{ g (Na}_2\text{SO}_4)}{151,026 \text{ g (MnSO}_4)}$$

$$X \text{ g (Na}_2\text{SO}_4) = 1,4805 \text{ g (Na}_2\text{SO}_4)$$

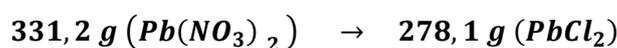
i) Cantidad de NaNO₃ a producirse para la concentración C3

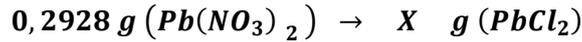


$$X \text{ g (NaNO}_3) = \frac{0,2928 \text{ g (Pb(NO}_3)_2) * 170 \text{ g (NaNO}_3)}{331,2 \text{ g (Pb(NO}_3)_2)}$$

$$X \text{ g (NaNO}_3) = 0,1503 \text{ g (NaNO}_3)$$

j) Cantidad de PbCl₂ a producirse para la concentración C3

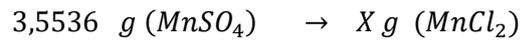
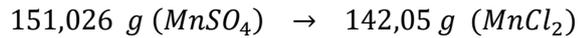




$$X \text{ g (PbCl}_2) = \frac{0,2928 \text{ g (Pb(NO}_3)_2) * 278,1 \text{ g (PbCl}_2)}{331,2 \text{ g (Pb(NO}_3)_2)}$$

$$X \text{ g (PbCl}_2) = 0,2459 \text{ g (PbCl}_2)$$

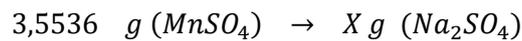
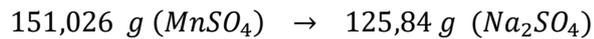
k) Cantidad de MnCl₂ a producirse para la concentración C3:



$$X \text{ g (MnCl}_2) = \frac{3,5536 \text{ g (MnSO}_4) * 142,05 \text{ g (MnCl}_2)}{151,026 \text{ g (MnSO}_4)}$$

$$X \text{ g (MnCl}_2) = 3,3424 \text{ g (MnCl}_2)$$

l) Cantidad de Na₂SO₄ a producirse para la concentración C3:

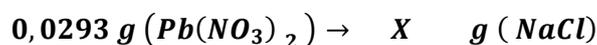
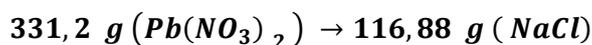


$$X \text{ g (Na}_2\text{SO}_4) = \frac{3,5536 \text{ g (MnSO}_4) * 125,84 \text{ g (Na}_2\text{SO}_4)}{151,026 \text{ g (MnSO}_4)}$$

$$X \text{ g (Na}_2\text{SO}_4) = 2,609 \text{ g (Na}_2\text{SO}_4)$$

ANEXO 2. 7: Cálculo de reactivo en exceso que queda en el medio tras la mezcla de las sales

- a) La cantidad de NaCl consumida en la reacción, para el primer producto con C1:



$$X \text{ g } (NaCl) = \frac{0,0293 \text{ g } (Pb(NO_3)_2) * 116,88 \text{ g } (NaCl)}{331,2 \text{ g } (Pb(NO_3)_2)}$$

$$X \text{ g } (NaCl) = 0,0103 \text{ g } NaCl$$

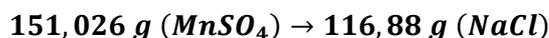
- b) La cantidad de NaCl que sobra en el sistema, para el primer producto con C1

$$X_{sobra} \text{ g } (NaCl) = X_{inicial} \text{ g } NaCl - X_{reacciona} \text{ g } NaCl$$

$$X_{sobra} \text{ g } (NaCl) = 12,7361 \text{ g } NaCl - 0,0103 \text{ g } NaCl$$

$$X_{sobra} \text{ g } (NaCl) = 12,7258 \text{ g } NaCl$$

- c) La cantidad de NaCl consumida en la reacción, para el segundo producto con C1



$$X \text{ g } (NaCl) = \frac{0,3554 \text{ g } (MnSO_4) * 116,88 \text{ g } (NaCl)}{151,026 \text{ g } (MnSO_4)}$$

$$X \text{ g } (NaCl) = 0,2750 \text{ g } NaCl$$

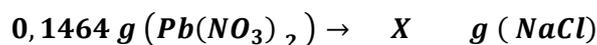
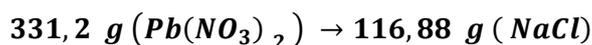
- d) La cantidad de NaCl que sobra en el sistema, para el segundo producto con C1

$$X_{sobra} \text{ g } (NaCl) = X_{inicial} \text{ g } NaCl - X_{reacciona} \text{ g } NaCl$$

$$X_{sobra} \text{ g } (NaCl) = 28,3680 \text{ g } NaCl - 0,2750 \text{ g } NaCl$$

$$X_{sobra} \text{ g } (NaCl) = 28,093 \text{ g } NaCl$$

- e) La cantidad de NaCl consumida en la reacción, para el primer producto con C2



$$X \text{ g } (NaCl) = \frac{0,1464 \text{ g } (Pb(NO_3)_2) * 116,88 \text{ g } (NaCl)}{331,2 \text{ g } (Pb(NO_3)_2)}$$

$$X \text{ g } (NaCl) = 0,0517 \text{ g } NaCl$$

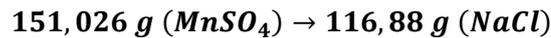
f) La cantidad de NaCl que sobra en el sistema, para el primer producto con C2

$$X_{sobra} \text{ g (NaCl)} = X_{inicial} \text{ g NaCl} - X_{reacciona} \text{ g NaCl}$$

$$X_{sobra} \text{ g (NaCl)} = 63,6803 \text{ g NaCl} - 0,0517 \text{ g NaCl}$$

$$X_{sobra} \text{ g (NaCl)} = 63,6286 \text{ g NaCl}$$

g) La cantidad de NaCl consumida en la reacción, para el segundo producto con C2



$$X \text{ g (NaCl)} = \frac{1,7768 \text{ g (MnSO}_4) * 116,88 \text{ g (NaCl)}}{151,026 \text{ g (MnSO}_4)}$$

$$X \text{ g (NaCl)} = 1,3751 \text{ g NaCl}$$

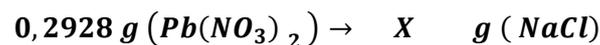
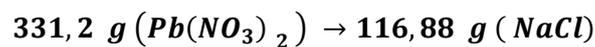
h) La cantidad de NaCl que sobra en el sistema, para el segundo producto con C2

$$X_{sobra} \text{ g (NaCl)} = X_{inicial} \text{ g NaCl} - X_{reacciona} \text{ g NaCl}$$

$$X_{sobra} \text{ g (NaCl)} = 141,84 \text{ g NaCl} - 1,3751 \text{ g NaCl}$$

$$X_{sobra} \text{ g (NaCl)} = 140,4649 \text{ g NaCl}$$

i) La cantidad de NaCl consumida en la reacción, para el primer producto con C3



$$X \text{ g (NaCl)} = \frac{0,2928 \text{ g (Pb(NO}_3)_2) * 116,88 \text{ g (NaCl)}}{331,2 \text{ g (Pb(NO}_3)_2)}$$

$$X \text{ g (NaCl)} = 0,1033 \text{ g NaCl}$$

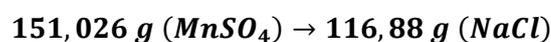
j) La cantidad de NaCl que sobra en el sistema, para el primer producto con C3

$$X_{sobra} \text{ g (NaCl)} = X_{inicial} \text{ g NaCl} - X_{reacciona} \text{ g NaCl}$$

$$X_{sobra} \text{ g (NaCl)} = 127,3605 \text{ g NaCl} - 0,1033 \text{ g NaCl}$$

$$X_{sobra} \text{ g (NaCl)} = 127,2572 \text{ g NaCl}$$

k) La cantidad de NaCl consumida en la reacción, para el segundo producto C3



$$X \text{ g (NaCl)} = \frac{3,5536 \text{ g (MnSO}_4\text{)} * 116,88 \text{ g (NaCl)}}{151,026 \text{ g (MnSO}_4\text{)}}$$

$$X \text{ g (NaCl)} = 2,7501 \text{ g NaCl}$$

l) La cantidad de NaCl que sobra en el sistema, para el segundo producto con C3

$$X_{sobra} \text{ g (NaCl)} = X_{inicial} \text{ g NaCl} - X_{reacciona} \text{ g NaCl}$$

$$X_{sobra} \text{ g (NaCl)} = 283,68 \text{ g NaCl} - 2,7501 \text{ g NaCl}$$

$$X_{sobra} \text{ g (NaCl)} = 280,9299 \text{ g NaCl}$$

ANEXO 2. 8: Análisis de la solubilidad de las tres especies que queda en el sistema

a) Para el producto NaNO_3

$$\text{NaNO}_3 = 0,01504 \text{ g}$$

$$S_{\text{NaNO}_3} = 874 \text{ g/L en agua a } 20^\circ\text{C}$$

La porción de NaNO_3 a producirse por sal en un litro de agua es:

$$m_{\text{NaNO}_3} = 0,01504 \text{ g en } 60 \text{ L}$$

$$m_{\text{NaNO}_3} = 0,00025 \text{ g en } L$$

$$m_{\text{NaNO}_3} = \mathbf{0,00025 \text{ g/L}} \ll S_{\text{NaNO}_3} = \mathbf{874 \text{ g/L}}$$

b) Para el NaCl .

$$\text{NaCl} = 12,7258 \text{ g}$$

$$S_{\text{NaCl}} = 358 \text{ g/L en agua a } 20^\circ\text{C}$$

La porción de NaCl a producirse por sal en un litro de agua es:

$$m_{\text{NaCl}} = 12,7258 \text{ g en } 60 \text{ L}$$

$$m_{\text{NaCl}} = 0,2121 \text{ g en } L$$

$$m_{\text{NaCl}} = \mathbf{0,2121 \text{ g/L}} \ll S_{\text{NaCl}} = \mathbf{358 \text{ g/L}}$$

c) Para el segundo producto PbCl_2 de la concentración C1

$$\text{PbCl}_2 = 0,0246 \text{ g}$$

$$S_{\text{PbCl}_2} = 10 \text{ g/L en agua a } 20^\circ\text{C}$$

La porción de PbCl_2 producida en un litro de agua es:

$$m_{\text{PbCl}_2} = 0,0246 \text{ g en } 60 \text{ L}$$

$$m_{\text{PbCl}_2} = 0,00041 \text{ g en } L$$

$$m_{\text{PbCl}_2} = \mathbf{0,00041 \text{ g/L}} < S_{\text{PbCl}_2} = \mathbf{10 \text{ g/L}}$$

ANEXO 2. 9: Cálculo de la constante de equilibrio de solubilidad (Kps) para la concentración Baja C1

a) Para el primer producto $PbCl_2$ con la concentración C1

$$m_{PbCl_2} = 0,00041 \text{ g en L}$$

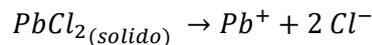
$$PM_{PbCl_2} = 278,1 \text{ g/mol}$$

$$Kps_{PbCl_2} = 2,4 \times 10^{-4}$$

La concentración molar es:

$$\begin{aligned} \text{Molaridad (M)} &= \frac{\# \text{ moles soluto}}{V_{\text{solución (Litros)}}} = \frac{\frac{\text{masa soluto}}{\text{Peso molecular soluto}}}{V_{\text{solución (Litros)}}} \\ &= \frac{\text{masa soluto}}{\text{Peso Molecular soluto} * V_{\text{solución (Litros)}}} \\ M &= \frac{0,00041 \text{ g}}{278,1 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * 1 \text{ L}} = 1,47 \times 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{L}} = 1,47 \times 10^{-6} \text{ M} \end{aligned}$$

El equilibrio de solubilidad es:



$$PI = \frac{[Pb^{+}] * [Cl^{-}]^2}{PbCl_2(\text{solido})}$$

$$PI = [Pb^{+}] * [Cl^{-}]^2$$

$$PI = [1,47 \times 10^{-6}] * [1,47 \times 10^{-6}]^2$$

$$PI = 3.2044 \times 10^{-18}$$

$$\underline{PI = 3.2044 \times 10^{-18} < Kps_{PbCl_2} = 2.4 \times 10^{-4}}$$

b) Para el segundo producto $MnCl_2$ con la concentración C1 se tiene

$$MnCl_2 = 0,3343 \text{ g}$$

$$S_{MnCl_2} = 723 \text{ g/L en agua a } 20^{\circ}C$$

La porción de Mn Cl2 a producirse por sal en un litro de agua es:

$$m_{MnCl_2} = 0,3343 \text{ g en 60 L}$$

$$m_{MnCl_2} = 0,0056 \text{ g en L}$$

$$m_{MnCl_2} = 0,0056 \text{ g/L} \ll S_{MnCl_2} = 723 \text{ g/L}$$

c) Para el NaCl con la concentración C1 se tiene

$$NaCl = 28,093 \text{ g}$$

$$S_{NaCl} = 358 \text{ g/L} \quad \text{en agua} \quad \text{a } 20^{\circ}\text{C}$$

La porción de NaCl sobrante en un Litro de agua es:

$$m_{NaCl} = 28,093 \text{ g en } 60 \text{ L}$$

$$m_{NaCl} = 0,4682 \text{ g en } L$$

$$m_{NaCl} = 0,4682 \text{ g/L} \ll S_{NaCl} = 358 \text{ g/L}$$

d) Para el producto Na_2SO_4 de la concentración C1, se tiene

$$Na_2SO_4 = 0,2961 \text{ g}$$

$$S_{Na_2SO_4} = 200 \text{ g/L} \quad \text{en agua} \quad \text{a } 20^{\circ}\text{C}$$

La porción de $PbCl_2$ producida en un Litro de agua es:

$$m_{Na_2SO_4} = 0,2961 \text{ g en } 60 \text{ L}$$

$$m_{Na_2SO_4} = 0,0049 \text{ g en } L$$

$$m_{Na_2SO_4} = 0,0049 \text{ g/L} < S_{PbCl_2} = 200 \text{ g/L}$$

ANEXO 2. 10: Cálculo de la constante de equilibrio de solubilidad (Kps) para la concentración Baja C2

a) Para el primer producto NaNO_3 con la concentración C2 se tiene

$$\text{NaNO}_3 = 0,0751 \text{ g}$$

$$S_{\text{NaNO}_3} = 874 \text{ g/L en agua a } 20^\circ\text{C}$$

La porción NaNO_3 a producirse por sal en un Litro de agua es:

$$m_{\text{NaNO}_3} = 0,0751 \text{ g en } 60 \text{ L}$$

$$m_{\text{NaNO}_3} = 0,00125 \text{ g en } L$$

$$m_{\text{NaNO}_3} = 0,00125 \text{ g/L} \ll S_{\text{NaNO}_3} = 874 \text{ g/L}$$

b) Para el NaCl con la concentración C2 se tiene

$$\text{NaCl} = 63,6286 \text{ g}$$

$$S_{\text{NaCl}} = 358 \text{ g/L en agua a } 20^\circ\text{C}$$

La porción de NaCl sobrante en un Litro de agua es:

$$m_{\text{NaCl}} = 63,6286 \text{ g en } 60 \text{ L}$$

$$m_{\text{NaCl}} = 1,0605 \text{ g en } L$$

$$m_{\text{NaCl}} = 1,0605 \text{ g/L} \ll S_{\text{NaCl}} = 358 \text{ g/L}$$

c) Para el PbCl_2 con la concentración C2 se tiene.

$$\text{PbCl}_2 = 0,1229 \text{ g}$$

$$S_{\text{PbCl}_2} = 10 \text{ g/L en agua a } 20^\circ\text{C}$$

La porción de PbCl_2 producida en un Litro de agua es:

$$m_{\text{PbCl}_2} = 0,1229 \text{ g en } 60 \text{ L}$$

$$m_{\text{PbCl}_2} = 0,00205 \text{ g en } L$$

$$m_{\text{PbCl}_2} = 0,00205 \text{ g/L} < S_{\text{PbCl}_2} = 10 \text{ g/L}$$

d) Cálculo del producto de solubilidad

$$m_{\text{PbCl}_2} = 0,00205 \text{ g en } L$$

$$PM_{\text{PbCl}_2} = 278,1 \text{ g/mol}$$

$$K_{ps_{\text{PbCl}_2}} = 2,4 \times 10^{-4}$$

$$M = \frac{0,00205 \text{ g}}{278,1 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * 1 \text{ L}} = 1,47 \times 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{L}} = 7,3714 \times 10^{-6} \text{ M}$$

$$PI = \frac{[Pb^{2+}] * [Cl^{-}]^2}{PbCl_2(\text{solido})}$$

$$PI = [7,3714 \times 10^{-6}] * [7,3714 \times 10^{-6}]^2$$

$$PI = 4,0055 \times 10^{-16}$$

$$PI = 4,0055 \times 10^{-16} < Kps_{PbCl_2} = 2,4 \times 10^{-4}$$

e) Para el segundo producto $MnCl_2$ con la concentración media C2.

$$MnCl_2 = 1,6712 \text{ g}$$

$$S_{MnCl_2} = 723 \text{ g/L en agua a } 20^\circ\text{C}$$

La porción de $MnCl_2$ a producirse por sal en un litro de agua es:

$$m_{MnCl_2} = 1,6712 \text{ g en } 60 \text{ L}$$

$$m_{MnCl_2} = 0,0279 \text{ g en } L$$

$$m_{MnCl_2} = 0,0279 \text{ g/L} \ll S_{MnCl_2} = 723 \text{ g/L}$$

f) Para el $NaCl$ de la concentración media.

$$NaCl = 140,4649 \text{ g}$$

$$S_{NaCl} = 358 \text{ g/L en agua a } 20^\circ\text{C}$$

La porción de $NaCl$ sobrante en un litro de agua es:

$$m_{NaCl} = 140,4649 \text{ g en } 60 \text{ L}$$

$$m_{NaCl} = 2,3411 \text{ g en } L$$

$$m_{NaCl} = 2,3411 \text{ g/L} \ll S_{NaCl} = 358 \text{ g/L}$$

g) Para el Na_2SO_4 de la concentración media C2

$$Na_2SO_4 = 1,4805 \text{ g}$$

$$S_{Na_2SO_4} = 200 \text{ g/L en agua a } 20^\circ\text{C}$$

La porción de $PbCl_2$ producida en un Litro de agua es:

$$m_{Na_2SO_4} = 1,4805 \text{ g en } 60 \text{ L}$$

$$m_{Na_2SO_4} = 0,0247 \text{ g en } L$$

$$m_{Na_2SO_4} = 0,0247 \text{ g/L} < S_{PbCl_2} = 200 \text{ g/L}$$

ANEXO 2. 11: Cálculo de la constante de equilibrio de solubilidad (Kps) para la concentración Baja C3

a) Para el primer producto NaNO_3 de la concentración alta C3 se tiene

$$\text{NaNO}_3 = 0,1503 \text{ g}$$

$$S_{\text{NaNO}_3} = 874 \text{ g/L en agua a } 20^\circ\text{C}$$

La porción de NaNO_3 a producirse por sal en un Litro de agua es:

$$m_{\text{NaNO}_3} = 0,1503 \text{ g en } 60 \text{ L}$$

$$m_{\text{NaNO}_3} = 0,002505 \text{ g en } L$$

$$m_{\text{NaNO}_3} = 0,002505 \text{ g/L} \ll S_{\text{NaNO}_3} = 874 \text{ g/L}$$

b) Para el NaCl de la concentración alta C3 se tiene

$$\text{NaCl} = 127,2572 \text{ g}$$

$$S_{\text{NaCl}} = 358 \text{ g/L en agua a } 20^\circ\text{C}$$

La porción de NaCl sobrante en un Litro de agua es:

$$m_{\text{NaCl}} = 127,2572 \text{ g en } 60 \text{ L}$$

$$m_{\text{NaCl}} = 2,1209 \text{ g en } L$$

$$m_{\text{NaCl}} = 2,1209 \text{ g/L} \ll S_{\text{NaCl}} = 358 \text{ g/L}$$

c) Para el PbCl_2 de la concentración alta C3 se tiene

$$\text{PbCl}_2 = 0,2459 \text{ g}$$

$$S_{\text{PbCl}_2} = 10 \text{ g/L en agua a } 20^\circ\text{C}$$

La porción de PbCl_2 producida en un Litro de agua es:

$$m_{\text{PbCl}_2} = 0,2459 \text{ g en } 60 \text{ L}$$

$$m_{\text{PbCl}_2} = 0,00409 \text{ g en } L$$

$$m_{\text{PbCl}_2} = 0,00409 \text{ g/L} < S_{\text{PbCl}_2} = 10 \text{ g/L}$$

d) Cálculo del producto de solubilidad.

$$m_{\text{PbCl}_2} = 0,00409 \text{ g en } L$$

$$PM_{\text{PbCl}_2} = 278,1 \text{ g/mol}$$

$$K_{ps_{\text{PbCl}_2}} = 2,4 \times 10^{-4}$$

$$M = \frac{0,00409 \text{ g}}{278,1 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * 1 \text{ L}} = 1,47 \times 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{L}} = 1,47 \times 10^{-5} \text{ M}$$

$$PI = \frac{[Pb^{2+}] * [Cl^{-}]^2}{PbCl_2(\text{solido})}$$

$$PI = [1,47 \times 10^{-5}] * [1,47 \times 10^{-5}]^2$$

$$PI = 3,204 \times 10^{-17}$$

$$PI = 3,204 \times 10^{-17} < Kps_{PbCl_2} = 2,4 \times 10^{-4}$$

e) Para e segundo producto $MnCl_2$ de la concentración C3

$$MnCl_2 = 3,3424 \text{ g}$$

$$S_{MnCl_2} = 723 \text{ g/L en agua a } 20^{\circ}\text{C}$$

La porción $MnCl_2$ a producirse por sal en un litro de agua es:

$$m_{MnCl_2} = 3,3424 \text{ g en } 60 \text{ L}$$

$$m_{MnCl_2} = 0,0557 \text{ g en } L$$

$$m_{MnCl_2} = 0,0557 \text{ g/L} \ll S_{MnCl_2} = 723 \text{ g/L}$$

f) Para el $NaCl$ de la concentración C3

$$NaCl = 280,9299 \text{ g}$$

$$S_{NaCl} = 358 \text{ g/L en agua a } 20^{\circ}\text{C}$$

La porción de $NaCl$ sobrante en un Litro de agua es:

$$m_{NaCl} = 280,9299 \text{ g en } 60 \text{ L}$$

$$m_{NaCl} = 4,6822 \text{ g en } L$$

$$m_{NaCl} = 4,6822 \text{ g/L} \ll S_{NaCl} = 358 \text{ g/L}$$

g) Para el Na_2SO_4 de la concentración C3

$$Na_2SO_4 = 2,9609 \text{ g}$$

$$S_{Na_2SO_4} = 200 \text{ g/L en agua a } 20^{\circ}\text{C}$$

La porción de $PbCl_2$ producida en un Litro de agua es:

$$m_{Na_2SO_4} = 2,9609 \text{ g en } 60 \text{ L}$$

$$m_{Na_2SO_4} = 0,0493 \text{ g en } L$$

$$m_{Na_2SO_4} = 0,0493 \text{ g/L} < S_{PbCl_2} = 200 \text{ g/L}$$

ANEXO 2. 12: Comportamiento del Flux en la eliminación del plomo

Concentración de plomo	Ensayo	Presión (Pas.)	Flux (m3/s.m2)
Baja	P1	5x10 ⁵	8.9E-06
	P2	7.5x10 ⁵	1.3E-05
	P3	10x10 ⁵	1.8E-05
Media	P4	5x10 ⁵	7.7E-06
	P5	7.5x10 ⁵	1.2E-05
	P6	10x10 ⁵	1.7E-05
Alta	P7	5x10 ⁵	6.4E-06
	P8	7.5x10 ⁵	1.0E-05
	P9	10x10 ⁵	1.4E-05

ANEXO 2. 13: Comportamiento del Flux en la eliminación del manganeso

Concentración de manganeso	Ensayo	Presión (Pas)	Flux (m3/s.m2)
Baja	P1	5x10 ⁵	8.5E-06
	P2	7.5x10 ⁵	1.3E-05
	P3	10x10 ⁵	1.7E-05
Media	P4	5x10 ⁵	5.8E-06
	P5	7.5x10 ⁵	9.4E-06
	P6	10x10 ⁵	1.4E-05
Alta	P7	5x10 ⁵	2.8E-06
	P8	7.5x10 ⁵	6.4E-06
	P9	10x10 ⁵	9.6E-06

ANEXO 2. 14: Comportamiento del Flux en la eliminación del hierro

Concentración de hierro	Ensayo	Presión (Pas)	Flux (m3/s.m2)
Baja	P1	5x10 ⁵	9.3E-06
	P2	7.5x10 ⁵	1.4E-05
	P3	10x10 ⁵	1.7E-05
Media	P4	5x10 ⁵	5.7E-06
	P5	7.5x10 ⁵	9.3E-06
	P6	10x10 ⁵	1.3E-05
Alta	P7	5x10 ⁵	3.1E-06
	P8	7.5x10 ⁵	5.8E-06
	P9	10x10 ⁵	8.2E-06

ANEXO 2. 15: Analíticas en muestras experimentales para el Pb, Mn, He y NaCl

Concentración en la alimentación del sistema					Concentración a la salida del permeado del sistema				
Muestras de análisis	NaCl	Mn	Fe	Pb	Muestras de análisis	NaCl	Mn	Fe	Pb
	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)		(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)
Ingreso plomo C1				44,65	Permeado plomo C1				0,53
Ingreso plomo C1				44,50	Permeado plomo C1				0,33
Ingreso plomo C1				47,16	Permeado plomo C1				0,27
Ingreso NaCl en el plomo - C1	75978,60				Permeado NaCl en plomo C1	2434,03			
Ingreso NaCl en el plomo- C1	74742,68				Permeado NaCl en plomo C1	1591,71			
Ingreso NaCl en el plomo - C1	76404,04				Permeado NaCl en plomo C1	1381,65			
Ingreso plomo C2				445,59	Permeado plomo C2				0,29
Ingreso plomo C2				455,00	Permeado plomo C2				0,20
Ingreso plomo C2				455,52	Permeado plomo C2				0,17
Ingreso NaCl en el plomo - C2	347726,55				Permeado NaCl en plomo C2	7140,00			
Ingreso NaCl en el plomo- C2	367115,08				Permeado NaCl en plomo C2	6177,83			
Ingreso NaCl en el plomo - C2	359083,84				Permeado NaCl en plomo C2	5293,62			
Ingreso plomo C3				1738,16	Permeado plomo C3				0,20
Ingreso plomo C3				1756,19	Permeado plomo C3				0,19
Ingreso plomo C3				1773,27	Permeado plomo C3				0,37
Ingreso NaCl en el plomo - C3	OR				Permeado NaCl en plomo C3	7273,80			
Ingreso NaCl en el plomo- C3	OR				Permeado NaCl en plomo C3	13919,44			
Ingreso NaCl en el plomo - C3	OR				Permeado NaCl en plomo C3	7836,40			
Ingreso manganeso C1		1585,52			Permeado manganeso C1		2,72		
Ingreso manganeso C1		1568,66			Permeado manganeso C1		2,59		
Ingreso manganeso C1		1572,05			Permeado manganeso C1		3,11		
Ingreso NaCl en el manganeso - C1	157424,12				Permeado NaCl en manganeso C1	1952,59			
Ingreso NaCl en el manganeso- C1	156149,55				Permeado NaCl en manganeso C1	1731,03			
Ingreso NaCl en el manganeso - C1	157084,34				Permeado NaCl en manganeso C1	1809,71			
Ingreso manganeso C2		9379,89			Permeado manganeso C2		1,95		
Ingreso manganeso C2		9375,86			Permeado Manganeso C2		1,35		
Ingreso manganeso C2		9270,84			Permeado manganeso C2		1,30		

Concentración en la alimentación del sistema					Concentración a la salida del permeado del sistema				
Muestras de análisis	NaCl	Mn	Fe	Pb	Muestras de análisis	NaCl	Mn	Fe	Pb
	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)		(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)
Ingreso NaCl en el manganeso - C2	OR				Permeado NaCl en manganeso C2	17463,78			
Ingreso NaCl en el manganeso - C2	OR				Permeado NaCl en manganeso C2	14301,91			
Ingreso NaCl en el manganeso - C2	OR				Permeado NaCl en manganeso C2	12095,42			
Ingreso manganeso C3		16903,98			Permeado manganeso C3		14,71		
Ingreso manganeso C3		16588,31			Permeado manganeso C3		7,35		
Ingreso manganeso C3		16000,76			Permeado manganeso C3		8,73		
Ingreso NaCl en el manganeso - C3	OR				Permeado NaCl en manganeso C3	44261,43			
Ingreso NaCl en el manganeso - C3	OR				Permeado NaCl en manganeso C3	34517,77			
Ingreso NaCl en el manganeso - C3	OR				Permeado NaCl en manganeso C3	43936,20			
Ingreso hierro C1			9951,31	48,68	Permeado hierro C1			0,24	
Ingreso hierro C1			10163,82		Permeado hierro C1			1,16	
Ingreso hierro C1			9947,88		Permeado hierro C1			0,42	
Ingreso NaCl en el hierro - C1	165407,98				Permeado NaCl en hierro C1	11399,01			
Ingreso NaCl en el hierro - C1	167414,76				Permeado NaCl en hierro C1	4968,64			
Ingreso NaCl en el hierro - C1	164558,21				Permeado NaCl en hierro C1	3904,17			
Ingreso hierro C2			47505,01		Permeado hierro C2			7,86	
Ingreso hierro C2			48967,07		Permeado hierro C2			3,95	
Ingreso hierro C2			47906,95		Permeado hierro C2			4,00	
Ingreso NaCl en el hierro - C2	OR				Permeado NaCl en hierro C2	39768,88			
Ingreso NaCl en el hierro - C2	OR				Permeado NaCl en hierro C2	26733,78			
Ingreso NaCl en el hierro - C2	OR				Permeado NaCl en hierro C2	27449,60			
Ingreso hierro C3			78123,62		Permeado hierro C3			0,51	
Ingreso hierro C3			77651,17		Permeado hierro C3			1,66	
Ingreso hierro C3			81279,94		Permeado hierro C3			1,13	
Ingreso NaCl en el hierro - C3	OR				Permeado NaCl en hierro C3	10658,17			
Ingreso NaCl en el hierro - C3	OR				Permeado NaCl en hierro C3	8295,16			
Ingreso NaCl en el hierro - C3	OR				Permeado NaCl en hierro C3	9193,00			

ANEXO 2. 16: Ficha técnica de la membrana



HUNAN KEENSEN TECHNOLOGY CO., LTD.

Model:ULP-2540

Performance

Permeate Flow: 750 gpd (2.84 m3/d)
Salt Rejection 99.3 % (99.0 % minimum)

Type

Configuration: Spiral Wound
Membrane Polymer: Composite Polyamide
Membrane Active Area: 27 ft2

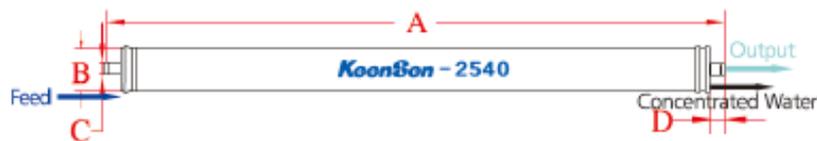
Application Data

Maximum Applied Pressure: 600 psig (4.14 MPa)
Maximum Chlorine Concentration: < 0.1 mg/L
Maximum Operating Temperature: 113° F (45°C)
pH Range, Continuous (Cleaning) 3.0 –10.0
Maximum Feedwater Turbidity: 1.0 NTU
Maximum Feedwater SDI (15 mins): 5.0
Maximum Feed Flow: 1.4m³/h
Minimum Ratio of Concentrate to 8%
Maximum Pressure Drop for Each Element: 10 psi

Test Conditions:

1500 PPM NaCl solution
150 psi (1.03 MPa) Applied Pressure
77 °F (25 °C) Operating Temperature
8% Permeate Recovery
7.5 – 8.0 pH Range
(Data taken after 30 minutes of operation)

Notes: The permeate flow of single membrane element may vary with in $\pm 15\%$.



A= 40.0"(1016MM) B= 2.4"(61MM) C= 0.75" (19.1MM) D= 1.12" (28.5MM)

ANEXO 2. 17: Script de cálculo en Matlab de parámetros Lp y K, Jv teórico, para la concentración baja del plomo

```

%PLOMO (Pb) - CONCENTRACION BAJA
%CALCULO DE LOS PARAMENTROS LP Y k DEL PLOMO PARA LA CONCENTRACION
BAJA de
%la sal de metal+NaCl
clear all
clc
load PBBAJOFAT
dp = PBBAJOFAT(:,3);
R = PBBAJOFAT(:,4);
T = PBBAJOFAT(:,5);
Cf = PBBAJOFAT(:,6);
Cp = PBBAJOFAT(:,7);
Jv = PBBAJOFAT(:,8);
FaT = PBBAJOFAT(:,10);
S=0.99;
x1 = dp.*FaT;
x2 = S.*R.*T.*(Cf-Cp).*FaT;
x3 = Jv;
X = [x1, x2, x3];
Y = x3;
modelfun = @(b,x) (b(1)*x(:,1) - b(1)*x(:,2).*exp(x(:,3)/b(2)));
beta0 = [0.001;0.00001];%%
beta = nlinfit(X,Y,modelfun,beta0);
format long
disp(beta)

%PLOMO (Pb) - CONCENTRACION BAJA
%CALCULO DEL JV (TEORICO) Y GRAFICAS COMPARATIVAS ENRE EL
Jv(Teórico) y el
%Jv(experimental)PARA EL PLOMO EN LA CONCENTRACION BAJA de la sal de
metal+NaCl
clear all
clc
load PBBAJOFAT
t = PBBAJOFAT(:,2);
dp = PBBAJOFAT(:,3);
R = PBBAJOFAT(:,4);
T = PBBAJOFAT(:,5);
Cf = PBBAJOFAT(:,6);
Cp = PBBAJOFAT(:,7);
Jv = PBBAJOFAT(:,8);
FaT = PBBAJOFAT(:,10);
% probando
Lp = 0.0000000000186511944;
S = 0.99;
k = 0.0000115205243721058;
x=t;
y = Lp*(dp.*FaT-S.*FaT.*R.*T.*(Cf-Cp).*exp(Jv/k));
plot(x,y,'r'), hold
plot(x,Jv,'b')
legend('Jv Theoretical', 'Jv Experimental')

```

ANEXO 2. 18: Script de cálculo en Matlab de parámetros Lp y K, Jv teórico, para la concentración media del plomo

```

%PLOMO (Pb) - CONCENTRACION MEDIA
%CALCULO DE LOS PARAMENTROS LP Y k DEL PLOMO PARA LA CONCENTRACION
MEDIA de
%la sal de metal+NaCl
clear all
clc
load PBMEDIOFAT
dp = PBMEDIOFAT(:,3);
R = PBMEDIOFAT(:,4);
T = PBMEDIOFAT(:,5);
Cf = PBMEDIOFAT(:,6);
Cp = PBMEDIOFAT(:,7);
Jv = PBMEDIOFAT(:,8);
FaT = PBMEDIOFAT(:,10);
S=0.9917;
x1 = dp.*FaT;
x2 = S.*R.*T.*(Cf-Cp).*FaT;
x3 = Jv;
X = [x1, x2, x3];
Y = x3;
modelfun = @(b,x) (b(1)*x(:,1) - b(1)*x(:,2).*exp(x(:,3)/b(2)));
beta0 = [0.019;0.000003];%%
beta = nlinfit(X,Y,modelfun,beta0);
format long
disp(beta)

%PLOMO (Pb) - CONCENTRACION MEDIO
%CALCULO DEL JV (TEORICO) Y GRAFICAS COMPARATIVAS ENRE EL
Jv(Teórico) y el
%Jv(experimental)PARA EL PLOMO EN LA CONCENTRACION MEDIA de la sal
de metal+NaCl
clear all
clc
load PBMEDIOFAT
t = PBMEDIOFAT(:,2);
dp = PBMEDIOFAT(:,3);
R = PBMEDIOFAT(:,4);
T = PBMEDIOFAT(:,5);
Cf = PBMEDIOFAT(:,6);
Cp = PBMEDIOFAT(:,7);
Jv = PBMEDIOFAT(:,8);
FaT = PBMEDIOFAT(:,10);
% probando
Lp = 0.000000000016976;
S = 0.9917;
k = 0.005155164841660;
x=t;
y = Lp*(dp.*FaT-S.*FaT.*R.*T.*(Cf-Cp).*exp(Jv/k));
plot(x,y,'r'), hold
plot(x,Jv, 'b')
legend('Jv Theoretical', 'Jv Experimental')

```

ANEXO 2. 19: Script de cálculo en Matlab de parámetros Lp y K, Jv teórico, para la concentración alta del plomo

```

%PLOMO (Pb) - CONCENTRACION ALTA
%CALCULO DE LOS PARAMENTROS LP Y k DEL PLOMO PARA LA CONCENTRACION
ALTA de
%la sal de metal+NaCl
clear all
clc
load PBALTOFAT
dp = PBALTOFAT(:,3);
R = PBALTOFAT(:,4);
T = PBALTOFAT(:,5);
Cf = PBALTOFAT(:,6);
Cp = PBALTOFAT(:,7);
Jv = PBALTOFAT(:,8);
FaT = PBALTOFAT(:,10);
S=0.9921;
x1 = dp.*FaT;
x2 = S.*R.*T.*(Cf-Cp).*FaT;
x3 = Jv;
X = [x1, x2, x3];
Y = x3;
modelfun = @(b,x) (b(1)*x(:,1) - b(1)*x(:,2).*exp(x(:,3)/b(2)));
beta0 = [0.00001;0.0000101];%%
beta = nlinfit(X,Y,modelfun,beta0);
format long
disp(beta)

%PLOMO (Pb) - CONCENTRACION ALTA
%CALCULO DEL JV (TEORICO) Y GRAFICAS COMPARATIVAS ENRE EL
Jv(Teórico) y el
%Jv(experimental)PARA EL PLOMO EN LA CONCENTRACION ALTA de la sal de
metal+NaCl
clear all
clc
load PBALTOFAT
t = PBALTOFAT(:,2);
dp = PBALTOFAT(:,3);
R = PBALTOFAT(:,4);
T = PBALTOFAT(:,5);
Cf = PBALTOFAT(:,6);
Cp = PBALTOFAT(:,7);
Jv = PBALTOFAT(:,8);
FaT = PBALTOFAT(:,10);
% probando
Lp = 0.000000000015528;
S = 0.9921;
k = 0.006944871296584;
y = Lp*(dp.*FaT-S.*FaT.*R.*T.*(Cf-Cp).*exp(Jv/k));
x=t;
plot(x,y,'r'), hold
plot(x,Jv, 'b')
legend('Jv Theoretical', 'Jv Experimental')

```

ANEXO 2. 20: Script de cálculo en Matlab de parámetros Lp y K, Jv teórico, para la concentración baja del manganeso

```

%MANGANESO (Mn) - CONCENTRACION BAJA
%CALCULO DE LOS PARAMENTROS LP Y k DEL MANGANESO PARA LA
CONCENTRACION BAJA de
%la sal de metal+NaCl
clear all
clc
load MNBAJOFAT
dp = MNBAJOFAT(:,3);
R = MNBAJOFAT(:,4);
T = MNBAJOFAT(:,5);
Cf = MNBAJOFAT(:,6);
Cp = MNBAJOFAT(:,7);
Jv = MNBAJOFAT(:,8);
FaT = MNBAJOFAT(:,11);
S=0.9905;
x1 = dp.*FaT;
x2 = S.*R.*T.*(Cf-Cp).*FaT;
x3 = Jv;
X = [x1, x2, x3];
Y = x3;
modelfun = @(b,x) (b(1)*x(:,1) - b(1)*x(:,2).*exp(x(:,3)/b(2)));
beta0 = [0.001;0.00001];%%
beta = nlinfit(X,Y,modelfun,beta0);
format long
disp(beta)

%MANGANESO (Mn) - CONCENTRACION BAJA
%CALCULO DEL JV (TEORICO) Y GRAFICAS COMPARATIVAS ENRE EL
Jv(Teórico) y el
%Jv(experimental)PARA EL MANGANESO EN LA CONCENTRACION BAJA de la
sal de metal+NaCl
clear all
clc
load MNBAJOFAT
t = MNBAJOFAT(:,2);
dp = MNBAJOFAT(:,3);
R = MNBAJOFAT(:,4);
T = MNBAJOFAT(:,5);
Cf = MNBAJOFAT(:,6);
Cp = MNBAJOFAT(:,7);
Jv = MNBAJOFAT(:,8);
FaT = MNBAJOFAT(:,11);
% probando
Lp = 0.0000000000181626548;
S = 0.9905;
k = 0.0000152357587640209;
x=t;
y = Lp*(dp.*FaT-S.*FaT.*R.*T.*(Cf-Cp).*exp(Jv/k));
plot(x,y,'r'), hold
plot(x,Jv, 'b')
legend('Jv Teórico', 'Jv Experimental')

```

ANEXO 2. 21: Script de cálculo en Matlab de parámetros Lp y K, Jv teórico, para la concentración media del manganeso

```

%MANGANESO (Mn) - CONCENTRACION MEDIA
%CALCULO DE LOS PARAMENTROS LP Y k DEL MANGANESO PARA LA
CONCENTRACION MEDIA de
%la sal de metal+NaCl
clear all
clc
load MNMEDIOFAT
dp = MNMEDIOFAT(:,3);
R = MNMEDIOFAT(:,4);
T = MNMEDIOFAT(:,5);
Cf = MNMEDIOFAT(:,6);
Cp = MNMEDIOFAT(:,7);
Jv = MNMEDIOFAT(:,8);
FaT = MNMEDIOFAT(:,11);
S=0.9908;
x1 = dp.*FaT;
x2 = S.*R.*T.*(Cf-Cp).*FaT;
x3 = Jv;
X = [x1, x2, x3];
Y = x3;
modelfun = @(b,x) (b(1)*x(:,1) - b(1)*x(:,2).*exp(x(:,3)/b(2)));
beta0 = [0.1;0.00001];%%
beta = nlinfit(X,Y,modelfun,beta0);
format long
disp(beta)

%MANGANESO (Mn) - CONCENTRACION MEDIA
%CALCULO DEL JV (TEORICO) Y GRAFICAS COMPARATIVAS ENRE EL
Jv(Teórico) y el
%Jv(experimental)PARA EL MANGANESO EN LA CONCENTRACION MEDIA de la
sal de metal+NaCl
clear all
clc
load MNMEDIOFAT
t = MNMEDIOFAT(:,2);
dp = MNMEDIOFAT(:,3);
R = MNMEDIOFAT(:,4);
T = MNMEDIOFAT(:,5);
Cf = MNMEDIOFAT(:,6);
Cp = MNMEDIOFAT(:,7);
Jv = MNMEDIOFAT(:,8);
FaT = MNMEDIOFAT(:,11);
% probando
Lp = 0.000000000015059;
S = 0.9908;
k = 0.006736241893978;
x=t;
y = Lp*(dp.*FaT-S.*FaT.*R.*T.*(Cf-Cp).*exp(Jv/k));
plot(x,y,'r'), hold
plot(x,Jv,'b')
legend('Jv Teórico', 'Jv Experimental')

```

ANEXO 2. 22: Script de cálculo en Matlab de parámetros Lp y K, Jv teórico, para la concentración alta del manganeso

```

%MANGANESO (Mn) - CONCENTRACION ALTA
%CALCULO DE LOS PARAMENTROS LP Y k DEL MANGANESO PARA LA
CONCENTRACION ALTA de
%la sal de metal+NaCl
clear all
clc
load MNALTOFAT
dp = MNALTOFAT(:,3);
R = MNALTOFAT(:,4);
T = MNALTOFAT(:,5);
Cf = MNALTOFAT(:,6);
Cp = MNALTOFAT(:,7);
Jv = MNALTOFAT(:,8);
FaT = MNALTOFAT(:,11);
S=0.9893;
x1 = dp.*FaT;
x2 = S.*R.*T.*(Cf-Cp).*FaT;
x3 = Jv;
X = [x1, x2, x3];
Y = x3;
modelfun = @(b,x) (b(1)*x(:,1) - b(1)*x(:,2).*exp(x(:,3)/b(2)));
beta0 = [0.22;0.00001];%%
beta = nlinfit(X,Y,modelfun,beta0);
format long
disp(beta)

%MANGANESO (Mn) - CONCENTRACION ALTA
%CALCULO DEL JV (TEORICO) Y GRAFICAS COMPARATIVAS ENRE EL
Jv(Teórico) y el
%Jv(experimental)PARA EL MANGANESO EN LA CONCENTRACION ALTA de la
sal de metal+NaCl
clear all
clc
load MNALTOFAT
t = MNALTOFAT(:,2);
dp = MNALTOFAT(:,3);
R = MNALTOFAT(:,4);
T = MNALTOFAT(:,5);
Cf = MNALTOFAT(:,6);
Cp = MNALTOFAT(:,7);
Jv = MNALTOFAT(:,8);
FaT = MNALTOFAT(:,11);
% probando
Lp = 0.000000000011144;
S = 0.9893;
k = 0.006814169126945;
x=t;
y = Lp*(dp.*FaT-S.*FaT.*R.*T.*(Cf-Cp).*exp(Jv/k));
plot(x,y,'r'), hold
plot(x,Jv, 'b')
legend('Jv Teórico', 'Jv Experimental')

```

ANEXO 2. 23: Script de cálculo en Matlab de parámetros Lp y K, Jv teórico, para la concentración baja del hierro

```

%HIERRO (He) - CONCENTRACION BAJA
%CALCULO DE LOS PARAMENTROS LP Y k DEL HIERRO PARA LA CONCENTRACION
BAJA de
%la sal de metal+NaCl
clear all
clc
load HEBAJOFAT
dp = HEBAJOFAT(:,3);
R = HEBAJOFAT(:,4);
T = HEBAJOFAT(:,5);
Cf = HEBAJOFAT(:,6);
Cp = HEBAJOFAT(:,7);
Jv = HEBAJOFAT(:,8);
FaT = HEBAJOFAT(:,11);
S=0.9900;
x1 = dp.*FaT;
x2 = S.*R.*T.*(Cf-Cp).*FaT;
x3 = Jv;
X = [x1, x2, x3];
Y = x3;
modelfun = @(b,x) (b(1)*x(:,1) - b(1)*x(:,2).*exp(x(:,3)/b(2)));
beta0 = [0.001;0.000015];%%
beta = nlinfit(X,Y,modelfun,beta0);
format long
disp(beta)

%HIERRO (He) - CONCENTRACION BAJA
%CALCULO DEL JV (TEORICO) Y GRAFICAS COMPARATIVAS ENRE EL
Jv(Teórico) y el
%Jv(experimental)PARA EL HIERRO EN LA CONCENTRACION BAJA de la sal
de metal+NaCl
clear all
clc
load HEBAJOFAT
t = HEBAJOFAT(:,2);
dp = HEBAJOFAT(:,3);
R = HEBAJOFAT(:,4);
T = HEBAJOFAT(:,5);
Cf = HEBAJOFAT(:,6);
Cp = HEBAJOFAT(:,7);
Jv = HEBAJOFAT(:,8);
FaT = HEBAJOFAT(:,11);
% probando
Lp = 0.0000000000203765609;
S = 0.9900;
k = 0.0000104006648062730;
x=t;
y = Lp*(dp.*FaT-S.*FaT.*R.*T.*(Cf-Cp).*exp(Jv/k));
plot(x,y,'r'), hold
plot(x,Jv, 'b')
legend('Jv Teórico', 'Jv Experimental')

```

ANEXO 2. 24: Script de cálculo en Matlab de parámetros Lp y K, Jv teórico, para la concentración baja del Hierro

```

%HIERRO (He) - CONCENTRACION MEDIA
%CALCULO DE LOS PARAMENTROS LP Y k DEL HIERRO PARA LA CONCENTRACION
MEDIA de
%la sal de metal+NaCl
clear all
clc
load HEMEDIOFAT
dp = HEMEDIOFAT(:,3);
R = HEMEDIOFAT(:,4);
T = HEMEDIOFAT(:,5);
Cf = HEMEDIOFAT(:,6);
Cp = HEMEDIOFAT(:,7);
Jv = HEMEDIOFAT(:,8);
FaT = HEMEDIOFAT(:,11);
S=0.9907;
x1 = dp.*FaT;
x2 = S.*R.*T.*(Cf-Cp).*FaT;
x3 = Jv;
X = [x1, x2, x3];
Y = x3;
modelfun = @(b,x) (b(1)*x(:,1) - b(1)*x(:,2).*exp(x(:,3)/b(2)));
beta0 = [0.001;0.000015];%%
beta = nlinfit(X,Y,modelfun,beta0);
format long
disp(beta)

%HIERRO (He) - CONCENTRACION MEDIA
%CALCULO DEL JV (TEORICO) Y GRAFICAS COMPARATIVAS ENRE EL
Jv(Teórico) y el
%Jv(experimental)PARA EL HIERRO EN LA CONCENTRACION MEDIA de la sal
de metal+NaCl
clear all
clc
load HEMEDIOFAT
t = HEMEDIOFAT(:,2);
dp = HEMEDIOFAT(:,3);
R = HEMEDIOFAT(:,4);
T = HEMEDIOFAT(:,5);
Cf = HEMEDIOFAT(:,6);
Cp = HEMEDIOFAT(:,7);
Jv = HEMEDIOFAT(:,8);
FaT = HEMEDIOFAT(:,11);
% probando
Lp = 0.000000000014697;
S = 0.9907;
k = 0.003096098555358;
x=t;
y = Lp*(dp.*FaT-S.*FaT.*R.*T.*(Cf-Cp).*exp(Jv/k));
plot(x,y,'r'), hold
plot(x,Jv, 'b')
legend('Jv Teórico', 'Jv Experimental')

```

ANEXO 2. 25: Script de cálculo en Matlab de parámetros Lp y K, Jv teórico, para la concentración baja del Hierro

```

%HIERRO (He) - CONCENTRACION ALTA
%CALCULO DE LOS PARAMENTROS LP Y k DEL HIERRO PARA LA CONCENTRACION
ALTA de
%la sal de metal+NaCl
clear all
clc
load HEALTOFAT
dp = HEALTOFAT(:,3);
R = HEALTOFAT(:,4);
T = HEALTOFAT(:,5);
Cf = HEALTOFAT(:,6);
Cp = HEALTOFAT(:,7);
Jv = HEALTOFAT(:,8);
FaT = HEALTOFAT(:,11);
S=0.9868;
x1 = dp.*FaT;
x2 = S.*R.*T.*(Cf-Cp).*FaT;
x3 = Jv;
X = [x1, x2, x3];
Y = x3;
modelfun = @(b,x) (b(1)*x(:,1) - b(1)*x(:,2).*exp(x(:,3)/b(2)));
beta0 = [0.1;0.00001];%%
beta = nlinfit(X,Y,modelfun,beta0);
format long
disp(beta)

%HIERRO (He) - CONCENTRACION ALTA
%CALCULO DEL JV (TEORICO) Y GRAFICAS COMPARATIVAS ENRE EL
Jv(Teórico) y el
%Jv(experimental)PARA EL HIERRO EN LA CONCENTRACION ALTA de la sal
de metal+NaCl
clear all
clc
load HEALTOFAT
t = HEALTOFAT(:,2);
dp = HEALTOFAT(:,3);
R = HEALTOFAT(:,4);
T = HEALTOFAT(:,5);
Cf = HEALTOFAT(:,6);
Cp = HEALTOFAT(:,7);
Jv = HEALTOFAT(:,8);
FaT = HEALTOFAT(:,11);
% probando
Lp = 0.0000000000116681759;
S = 0.9868;
k = 0.0000213590599629231;
x=t;
y = Lp*(dp.*FaT-S.*FaT.*R.*T.*(Cf-Cp).*exp(Jv/k));
plot(x,y,'r'), hold
plot(x,Jv, 'b')
legend('Jv Teórico', 'Jv Experimental')

```

7.3. ANEXO 3: Tablas y bases teóricas del análisis de partes interesadas

ANEXO 3. 1: Metodología de análisis de las partes interesadas

Método	Descripción	Recursos	Fortalezas	Debilidades
Grupos focales	Una lluvia de ideas en grupos pequeños partes interesadas, sus intereses, influencia y otros atributos, y categorizarlos	Facilitación de alta calidad; habitación alquiler; comida y bebida; facilitaciones materiales, p. ej. papel de rotafolio y post-its	Rápido y, por lo tanto, rentable; adaptable; posible de alcanzar consensos del grupo sobre categorías de partes interesadas; particularmente útil para generar datos sobre cuestiones complejas que requieren discusión para desarrollar comprensión.	Menos estructurado que algunas alternativas por lo que requiere de una eficaz facilitación para lograr buenos resultados
Entrevistas semiestructuradas	Entrevistas con corte transversal de las partes interesadas para comprobar/complementar los datos de los grupos focales	Tiempo de entrevista; transporte entre entrevistas; grabadora de voz, etc.	Útil para obtener información detallada, relaciones con las partes interesadas y triangular los datos recopilados en grupos de enfoque	Consume mucho tiempo y por lo tanto se torna costoso; difícil de alcanzar consensos sobre las categorías de las partes interesadas
Muestreo bola de nieve	Se entrevista a individuos desde el inicio de la categorización de partes interesadas, identificando nuevas categorías de partes interesadas y contactos.	Encuestas sucesivas encuestados en cada parte interesada identificando nuevas categorías durante las entrevistas	Entrevistas fáciles de asegurar y sin problemas de protección de datos; menos entrevistas rechazadas	La muestra puede estar sesgada por redes sociales del primer individuo en la bola de nieve muestra
Matriz de intereses e influencia	Las partes interesadas se colocan en una matriz de acuerdo con su interés e influencia relativos	Se puede realizar dentro de un grupo focal, o individualmente por parte interesada durante las entrevistas o por investigador/practicante	Posible priorizar partes interesadas para la inclusión; hace explícita la dinámica de poder	La priorización puede marginar ciertos grupos; asume categorías de partes interesadas basadas en interés-influencia son relevantes
Categorización de grupos de intereses	Las propias partes interesadas categorizan a las partes interesadas en categorías que tienen creadas	Igual que las entrevistas semi-estructuradas	Las categorías de partes interesadas se basan sobre las percepciones de las partes interesadas	Diferentes partes interesadas pueden ser colocadas en las mismas categorías por Diferentes encuestados, haciendo categorías sin sentido
Metodología Q	Las partes interesadas clasifican declaraciones extraídas de una explanada de acuerdo con cuantos de ellos están de acuerdo con ellos, el análisis permite discursos sociales a identificar	Materiales para clasificar estados de cuenta; tiempo de entrevista; transporte entre entrevistas	Diferentes discursos sociales que rodean un problema pueden ser identificadas y los individuos pueden ser categorizados según su "afinidad" dentro de estos discursos	No identifica todos los posibles discursos, solo los exhibido por el entrevistado interesados
Matriz de vínculo entre actores	Las partes interesadas se tabulan en una matriz bidimensional y sus relaciones descritas usando códigos	Se puede realizar dentro de un grupo focal, o individualmente por las partes interesadas durante las entrevistas o por investigador/practicante	Relativamente fácil, requiere pocos recursos	Puede volverse confuso y difícil de usar si hay muchos vínculos que son descritos
Análisis de redes sociales	Se utiliza para identificar la red de partes interesadas y medir lazos relacionales entre partes interesadas mediante el uso de entrevista estructurada/cuestionario.	Entrevistador, cuestionario, formación en el enfoque y análisis, tiempo, software	Obtener información sobre los límites de red de partes interesadas; la estructura de la red; identifica influyentes interesados e interesados periféricos	Pérdida de tiempo; cuestionario es un poco tedioso para los encuestados; Necesidad de especialistas en el método.
Mapa de conocimientos	Utilizado junto con SNA; Involucra entrevistas semi-estructuradas para identificar interacciones y conocimientos	Igual que las entrevistas semi-estructuradas	Identifica a las partes interesadas que funcionan bien juntos, así como los que tienen poder solos	Es posible que las necesidades de conocimiento puedan no cumplirse debido a diferencias en los tipos de conocimientos poseídos y necesitada por diferentes partes interesadas.

Método	Descripción	Recursos	Fortalezas	Debilidades
Transactividad radical	Muestreo de bolas de nieve para identificar partes interesadas marginales; desarrollo de estrategias para abordar sus preocupaciones	Entrenamiento en el enfoque, tiempo	Identifica a las partes interesadas y los problemas de modo que podrían ser riesgosos para el futuro del proyecto	Consume mucho tiempo y por lo tanto costoso

Fuente: elaboración propia en base a la propuesta de Reed et al. 2009

7.4. ANEXO 4: Análisis de redes sociales

ANEXO 4. 1: Matriz de redes sociales

ID	OI-BM-BID	ONG's	ALN	VRHR	AAPS	VMA B	VAP	OTNPB	ALD	SEDEGIA	CM	GAMT	CADECO	CAINCOTAR	UCB	UAJMS	SIB, CICT, ABIS	Comt. Civic	FEJUVE	Neighborhood	COSAALT	Comunities
OI-BM-BID	0	3	1	3	1	3	3	2	1	1	2	3	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0
ONG's	2	0	1	3	0	3	3	0	1	3	2	2	0	0	1	1	0	1	1	0	1	3
ALN	3	1	0	1	1	1	1	0	2	0	2	2	0	0	0	0	0	1	1	1	0	3
VRHR	3	1	1	0	0	1	1	3	0	2	1	2	0	0	0	0	0	1	2	0	1	0
AAPS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
VMAB	3	2	1	1	0	0	1	3	1	2	1	2	0	0	0	0	0	1	1	0	2	0
VAP	3	2	1	1	0	1	0	0	0	2	1	2	0	0	0	0	0	1	2	0	3	0
OTNPB	1	2	1	3	0	3	0	0	0	3	0	2	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0
ALD	0	0	2	1	0	1	1	1	0	2	0	1	0	0	0	0	0	2	2	2	0	3
SEDEGIA	2	2	0	3	0	3	3	3	1	0	0	1	0	0	3	3	1	1	1	1	1	1
CM	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	3	0	0	0	0	0	1	3	3	2	3
GAMT	3	2	2	2	0	2	2	1	0	1	3	0	1	1	1	1	1	1	3	3	2	3
CADECO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	1	2	0	0	0	0	0
CAINCOTAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	1	1	0	0	0	0	0
UCB	0	2	0	0	0	0	0	3	0	3	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0
UAJMS	0	2	1	0	0	0	0	3	1	3	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
SIB, CICT, ABIS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	1	2	0	2	2	2	1	0
Comt. Civic	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	2	0	0	0	0	1	0	2	2	1	2
FEJUVE	0	2	1	0	0	0	0	0	2	1	3	3	0	0	0	0	2	1	0	3	2	3
Neighborhood	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	0	0	3	1	3	0	3	2
COSAALT	0	0	0	0	3	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	3
Comunities	0	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	0	1	0	0	1	3	3	2	0

ANEXO 4. 2: Estadísticas

Input dataset: Matriz para redes-red1 (C:\Users\USUARIO\Documents\UCINET data\Matriz para redes-red1)
Output dataset: Matriz para redes-red1-density (C:\Users\USUARIO\Documents\UCINET data\Matriz para redes-red1-density)

	1	2	3	4
	Avg Value	Total	Std Dev	Avg Wtd Degree
1 Matriz para redes-red1	0.872	403	1.087	18.318

1 rows, 4 columns, 1 levels.

Running time: 00:00:01
Output generated: 13 jul. 22 11:34:21
UCINET 6.748 Copyright (c) 2002-2022 Analytic Technologies

Network Red1 was valued. For the purposes of this analysis, it has been dichotomized.

Whole network measures

		1
		Matriz p
		ara rede
		s-red1

1	# of nodes	22
2	# of ties	220
3	Avg Degree	10
4	Indeg H-Index	10
5	K-core index	10
6	Deg Centralization	0.405
7	Out-Centralization	0.449
8	In-Centralization	0.299
9	Indeg Corr	-0.154
10	Outdeg Corr	-0.189
11	Density	0.476
12	Components	1
13	Component Ratio	0
14	Connectedness	1
15	Fragmentation	0
16	Closure	0.647
17	Avg Distance	1.597
18	Prop within 3	0.996
19	# w/in 3	460
20	SD Distance	0.630
21	Diameter	4
22	Wiener Index	738
23	Dependency Sum	276
24	Breadth	0.274
25	Compactness	0.726
26	Small Worldness	1.354
27	Mutuals	0.368
28	Asymmetrics	0.216
29	Nulls	0.416
30	Arc Reciprocity	0.773
31	Dyad Reciprocity	0.630

7.5 ANEXO 5: Publicaciones y contribuciones

Durante el desarrollo de la investigación, se realizaron las siguientes contribuciones a través de publicaciones en revistas y congreso internacionales.

ANEXO 5. 1: Artículos en revistas

- Título: A Contamination of water supply sources by heavy metals: The price of development in Bolivia, a Latin American reality
 - Autores: Alvizuri-Tintaya, Paola Andrea; Villena-Martínez, Esteban Manuel; Nithya Avendaño-Acosta; Lo-lacono-Ferreira, Vanesa Gladys; Torregrosa-López, Juan Ignacio; Lora-García, Jaime.
 - Revista: Water
 - Categoría: JCR Q2
 - The CiteScore of this journal is 4.8.
 - DOI: <https://doi.org/10.3390/w14213470>
 - ISSN: 2073-4441
-
- Título: A Reverse Osmosis Modeling Study of Lead and Arsenic Removal from Drinking Water in Tarija and La Paz, Bolivia
 - Autores: Villena-Martínez, Esteban Manuel; Alvizuri-Tintaya, Paola Andrea; Lora-García, Jaime; Torregrosa-López, Juan Ignacio; Lo-lacono-Ferreira, Vanesa Gladys.
 - Revista: Processes
 - Categoría: JCR Q2
 - The CiteScore of this journal is 3.5.
 - DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10091889>
 - ISSN: 2227-9717
-
- Título: A Comparative Analysis of Statistical Models and Mathematics in Reverse Osmosis Evaluation Processes as a Search Path to Achieve Better Efficiency
 - Autores: Villena-Martínez, Esteban Manuel; Alvizuri-Tintaya, Paola Andrea; Lora-García, Jaime; Torregrosa-López, Juan Ignacio; Lo-lacono-Ferreira, Vanesa Gladys.
 - Revista: Water
 - Categoría: JCR Q2
 - The CiteScore of this journal is 4.8.
 - DOI: <https://doi.org/10.3390/w14162485>
 - ISSN: 2073-4441
-
- Título: On the Road to Sustainable Water Supply: Reducing Public Health Risks and Preserving Surface Water Resources in the Milluni Micro-Basin, Bolivia
 - Autores: Alvizuri Tintaya, Paola Andrea; Villena Martínez, Esteban Manuel; Micó Vicent, Bárbara; Lora García, Jaime; Torregrosa López, Juan Ignacio; Lo lacono Ferreira, Vanesa.
 - Revista: Environments
 - Categoría: JCR Q1

- The CiteScore of this journal is 4.1.
- DOI: <https://doi.org/10.3390/environments9010004>
- ISSN: 2076-3298

ANEXO 5. 2: Artículos publicados y participación en congreso internacionales

- Código de publicación: 04-013
- Título: STATE OF THE ART OF HYDROLOGICAL MODELS AND SUITABILITY IN BASINS WITH LIMITED INFORMATION
- Autores: Villena Martínez, Esteban Manuel (p); Torregrosa López, Juan Ignacio; Lo lacono Ferreira, Vanesa
- ISBN: 978-84-09-05132-8
- Congreso: 22nd International Congress on Project Management and Engineering Madrid, 11th – 13th July 2018
- URL donde está el fichero en pdf: http://dspace.aepro.com/xmlui/bitstream/handle/123456789/1638/AT04-013_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Código de publicación: 04-006
- Título: THE MEASUREMENT OF THE INFILTRATION OF THE SOILS OF THE ALTA CUENCA DEL GUADALQUIVIR, TARIJA, BOLIVIA
- Autores: Villena Martínez, Esteban Manuel (p); Torregrosa López, Juan Ignacio; Lo lacono Ferreira, Vanesa; Stolpa, David
- ISBN: 978-84-09-13557-8
- Congreso: 23rd International Congress on Project Management and Engineering Málaga, 10th – 12th July 2019
- URL donde está el fichero en pdf: http://dspace.aepro.com/xmlui/bitstream/handle/123456789/2314/AT04-006_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Código de publicación: 04-009
- Título: PROTOCOL TO MEASURE INFILTRATION SUBCUENCAS OF THE CORNER OF THE VITTORIA AND THE MOUNT OF THE ALTA CUENCA DEL GUADALQUIVIR
- Autores: Villena Martínez, Esteban Manuel (p); Stolpa, David; Torregrosa López, Juan Ignacio; Lo lacono Ferreira, Vanesa; Villena Morales, Jaime Eduardo; Rodríguez, Mario; Cárdenas, Milena; Sánchez, Oscar; Blades, Isacc; Garzón, Iván
- ISBN: 978-84-09-13557-8
- Congreso: 23rd International Congress on Project Management and Engineering Málaga, 10th – 12th July 2019
- URL donde está el fichero en pdf: http://dspace.aepro.com/xmlui/bitstream/handle/123456789/2316/AT04-009_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Código de publicación: 04-032
- Título: REVERSE OSMOSIS PILOT PLANT TO REMOVAL HEAVY METALS Pb, Fe, As, Zn AND Mn IN CONSUMPTION WATERS IN BOLIVIA

- Autores: Villena Martínez, Esteban Manuel (p); Alvizuri Tintaya, Paola Andrea; Lo Iacono Ferreira, Vanesa Gladys; Torregrosa López, Juan Ignacio; Lora García, Jaime
- ISBN: 978-84-09-21128-9
- Congreso: 24th International Congress on Project Management and Engineering Alcoi, 7th – 10th July 2020
- URL donde está el fichero en pdf: http://dspace.aepro.com/xmlui/bitstream/handle/123456789/2509/AT04-032_20.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Código de publicación: 04-019
- Título: Revisión de tecnologías de membranas en la eliminación de metales pesados en aguas superficiales para consumo humano
- Autores: Alvizuri Tintaya, Paola Andrea; Villena Martínez, Esteban Manuel; Lo Iacono Ferreira, Vanesa Gladys; Torregrosa López, Juan Ignacio; Lora García, Jaime
- ISBN: 978-84-09-21128-9
- Congreso: 24th International Congress on Project Management and Engineering Alcoi, 7th – 10th July 2020
- URL donde está el fichero en pdf: <http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/2498>

- Código de publicación: 04-021
- Título: Diseño de un programa de monitoreo con la aplicación de la Norma Boliviana NB / ISO 5667-4 - Caso Milluni, Bolivia
- Autores: Alvizuri Tintaya, Paola Andrea; Villena Martínez, Esteban Manuel; Lo Iacono Ferreira, Vanesa Gladys; Torregrosa López, Juan Ignacio; Lora García, Jaime
- ISBN: 978-84-09-21128-9
- Congreso: 24th International Congress on Project Management and Engineering Alcoi, 7th – 10th July 2020
- URL donde está el fichero en pdf: <http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/2499>

- Código de publicación: 04-027
- Título: CALIBRATION AND SIMULATION OF THE WATER BALANCE OF THE GUADALQUIVIR BASIN USING PARAMETERS OF THE SOILS OBTAINED IN FIELD WORK
- Autores: Villena Martínez, Esteban Manuel (p); Alvizuri Tintaya, Paola Andrea; Lo Iacono Ferreira, Vanesa Gladys; Torregrosa López, Juan Ignacio; Lora García, Jaime
- ISBN: 2695-5067
- Congreso: 25th International Congress on Project Management and Engineering Alcoi, 6th – 9th July 2021
- URL donde está el fichero en pdf: <http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/2971>

- Código de publicación: 04-026
- Título: THE ROLE OF STAKEHOLDERS IN WATER MANAGEMENT IN THE GUADALQUIVIR AND MILLUNI BASINS IN BOLIVIA
- Autores: Villena Martínez, Esteban Manuel (p); Alvizuri Tintaya, Paola Andrea; Lo lacono Ferreira, Vanesa Gladys; Torregrosa López, Juan Ignacio; Lora García, Jaime
- ISBN: 2695-5067
- Congreso: 25th International Congress on Project Management and Engineering Alcoi, 6th – 9th July 2021
- URL donde está el fichero en pdf:
<http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/2970>.