



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

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