



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS



Elaboración de modelos hidrológico y de gestión en la cuenca del río Ocoña en Perú y análisis de resultados

Trabajo final de master

Titulación: Master Universitario en Ingeniería de
Caminos, Canales y Puertos

Curso: 2017/18

Autor: Santana Montesdeoca, Aarón D.

Tutora: Sanchis Plasencia, Amparo

Cotutor: Andreu Álvarez, Joaquín

Valencia, Enero de 2018

ÍNDICE DEL PROYECTO

- Memoria
- Anexos
 - Anexo 01. Información necesaria para la construcción de los modelos hidrológico y de gestión
 - Anexo 02. Planos

MEMORIA

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1.	Introducción	12
1.1.	Antecedentes	12
1.2.	Objetivos	12
2.	Descripción general de la cuenca	14
2.1.	Ámbito territorial y demarcación administrativa	14
2.2.	Marco físico.....	15
2.2.1.	Características topográficas y fisiográficas	15
2.2.2.	Climatología	17
2.2.3.	Caracterización geológica	19
2.2.4.	Usos del suelo	22
2.3.	Marco biótico	25
2.3.1.	Clasificación de los sistemas ecológicos	26
2.3.2.	Áreas protegidas	27
2.4.	Marco socioeconómico.....	30
2.4.1.	Demografía.....	30
2.4.2.	Aspectos sociales	31
2.4.3.	Servicios básicos.....	31
2.4.4.	Actividades económicas.....	33
2.5.	Infraestructura hidráulica	34
2.5.1.	Embalses	34
2.5.2.	Canales	35
2.5.3.	Bocatomas.....	37
2.5.4.	Centrales hidroeléctricas	37
2.5.5.	Pozos	37

2.6.	Ríos principales y otras fuentes de agua	37
2.6.1.	Ríos principales	37
2.6.2.	Manantiales	39
2.6.3.	Lagos y lagunas	39
2.6.4.	Glaciares.....	39
2.6.5.	Acuíferos	39
2.7.	Subcuencas	40
3.	Metodología para la evaluación de los recursos hídricos y el modelo de gestión	43
3.1.	Herramientas empleadas.....	43
3.1.1.	Módulo EvalHid.....	43
3.1.2.	Módulo de SimGes.....	45
3.2.	Modelos hidrológicos empleados.....	48
3.2.1.	Modelo nieve N-2	48
3.2.2.	Modelo de precipitación –escorrentía de Témez.....	50
3.3.	Calibración del modelo hidrológico	54
3.4.	Caudales ecológicos	59
3.5.	Criterios de garantía	59
4.	Modelo hidrológico	61
4.1.	Información para la construcción del modelo hidrológico.....	61
4.1.1.	Información hidrometeorológica de la cuenca.....	61
4.1.2.	Naturalización de la serie de caudales.....	68
4.1.3.	Información geológica y cobertura vegetal de la cuenca	70
4.2.	Resultados del modelo hidrológico	74
4.2.1.	Parámetros finales del modelo	74
4.2.2.	Calibración y validación del modelo	75

4.2.3.	Comparación con el modelo WEAP de la ANA	79
5.	Modelo de gestión.....	81
5.1.	Información para la construcción del modelo de gestión	81
5.1.1.	Aportaciones	81
5.1.2.	Manantiales	82
5.1.3.	Pozos	83
5.1.4.	Demandas	83
5.1.5.	Central hidroeléctrica Chococo.....	85
5.1.6.	Embalses y lagunas	85
5.1.7.	Régimen de explotación	86
5.2.	Modelo de gestión	88
5.2.1.	Subsistema de Parinacochas.....	91
5.2.2.	Subsistema Pacapausa-Pallancata	91
5.2.3.	Subsistema Mirmaca.....	92
5.2.4.	Subsistema Oyolo-Marán.....	93
5.2.5.	Subsistema Alto-medio Cotahuasi	94
5.2.6.	Sistema de Pampamarca y Bajo Cotahuasí.....	96
5.2.7.	Subsistema Arma-Chichas.....	97
5.2.8.	Subsistema Ocoña Valle.....	97
5.3.	Resultados del modelo de gestión.....	99
5.3.1.	Subsistema Pacapausa-Pallancata	99
5.3.2.	Subsistema Mirmaca.....	100
5.3.3.	Subsistema Alto-Medio Cotahuasí.....	101
5.3.4.	Subsistema Pampamarca-Bajo Cotahuasí	102
5.3.5.	Subsistema Arma-Chichas.....	103
5.3.6.	Subsistema Ocoña Valle.....	103

5.3.7.	Resultados en los embales y lagunas.....	104
5.3.8.	Resultados en la central hidroeléctrica de Chococo.....	105
5.3.9.	Balance del modelo.....	107
5.3.10.	Comparación con el modelo de la ANA	108
6.	Conclusiones	110
7.	Referencias bibliográficas.....	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Plano de geolocalización. (Fuente: Elaboración propia)	14
Figura 2. Plano de la demarcación administrativa (Fuente: Elaboración propia)	15
Figura 3. Laguna de Parinacochas y al fondo el nevado Sara Sara. (Fuente: www.chumpi.info).	16
Figura 4. Clasificación climática de la cuenca de Ocoña (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).	18
Figura 5. Mapa geológico de la cuenca de Ocoña. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).	22
Figura 6. Imagen de Bofedal típico de la zona. (Fuente: Mapa Nacional de Cobertura Vegetal).....	23
Figura 7. Imagen de bosque relictos altoandino, en la cuenca de Ocoña. (Fuente: Mapa Nacional de Cobertura).	24
Figura 8. Plano de cobertura vegetal en la cuenca de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).	25
Figura 9. Guanaco (<i>Lama guanicoe</i>). (Fuente: http://noticiasdesanluis.com/).	28
Figura 10. Kiula andina oinambú andino (<i>Tinamotis pentlandii</i>). (Fuente: Sergio Bitran M.).	28
Figura 11. Mapa de zonas protegidas de la cuenca de Ocoña. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).	29
Figura 12. Plano de demografía: densidad de población por distritos y centros poblados censados en 2017. (Fuente: Elaboración propia).....	30
Figura 13. Plaza de Armas en la población de Ocoña. (Fuente: http://fotos.miarroba.es , usuario: carlos3106).	32
Figura 14. Represa de Llawancocha o Quillunza. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).	35
Figura 15. Plano de infraestructuras hidráulicas. (Fuente: Elaboración propia).....	35
Figura 16. Canales principales de la cuenca de Ocoña. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).	36
Figura 17. Plano de ríos y quebradas. (Fuente: Elaboración propia).	38

Figura 18. Laguna de Huanzo. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Peru).....	39
Figura 19. Cuencas del nivel 3 del sistema Pfafstetter en Perú. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).	40
Figura 20. Subcuencas de la cuenca de Ocoña. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).	41
Figura 21. Plano de subcuencas de la cuenca de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).42	
Figura 22. Esquema del módulo EvalHid. (Fuente: Elaboración propia).....	44
Figura 23. Esquema del modelo de nieve. (Fuente: Routing System II – Modelización de flujos en sistemas hidráulicos, LCH N°32)	48
Figura 24. Esquema de flujos y almacenamientos del modelo de Témez. Fuente: (Andreu, 2017).....	51
Figura 25. Valores aproximados de H_{max} según usos del suelo (Fuente: Estrela, 1999) 54	
Figura 26. Valores aproximados de I_{max} según la litología del terreno (Fuente: Estrela, 1999).....	54
Figura 27. Ubicación de las estaciones hidrométricas. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).	56
Figura 28. Periodos de calibración y validación de la EH de Salamanca. (Fuente: Elaboración propia).	57
Figura 29. Periodos de calibración y validación de la EH de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).	57
Figura 30. Serie histórica de precipitaciones medias anuales en la cuenca de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).....	62
Figura 31. Precipitaciones medias mensuales multianuales por subcuencas. (Fuente: Elaboración propia).	63
Figura 32. Temperaturas medias mensuales multianuales por subcuencas. (Fuente: Elaboración propia).	65
Figura 33. Evapotranspiración potencial media mensual multianual por subcuencas. (Fuente: Elaboración propia).....	66
Figura 34. Serie histórica de caudales aforados en la EH de Salamanca. (Fuente: Elaboración propia).	67

Figura 35. Serie histórica de caudales aforados en la EH de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).	68
Figura 36. Caudal medio mensual interanual en la EH de Salamanca. (Fuente: Elaboración propia).	69
Figura 37. Caudal medio mensual interanual en la EH de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).	70
Figura 38. Serie de aportaciones mensuales, en el periodo de calibración de la EH de Salamanca. (Fuente: Elaboración propia).	76
Figura 39. Serie de aportaciones totales anuales y medias mensuales, en el periodo de calibración de la EH de Salamanca. (Fuente: Elaboración propia).	76
Figura 40. Serie de aportaciones mensuales, en el periodo de validación de la EH de Salamanca. (Fuente: Elaboración propia).	77
Figura 41. Serie de aportaciones totales anuales y medias mensuales, en el periodo de validación de la EH de Salamanca. (Fuente: Elaboración propia).	77
Figura 42. Serie de aportaciones mensuales, en el periodo de calibración de la EH de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).	78
Figura 43. Serie de aportaciones totales anuales y medias mensuales, en el periodo de calibración de la EH de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).	78
Figura 44. Serie de aportaciones mensuales, en el periodo de validación de la EH de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).	78
Figura 45. Serie de aportaciones totales anuales y medias mensuales, en el periodo de validación de la EH de Salamanca. (Fuente: Elaboración propia).	79
Figura 46. Series de aportaciones mensuales en el periodo de calibración. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).	79
Figura 47. Comparación series de aportaciones mensuales de la serie sin naturalizar y naturalizadas. (Fuente: Elaboración propia).	82
Figura 48. Comparación series de aportaciones medias mensuales de la serie sin naturalizar y naturalizadas. (Fuente: Elaboración propia).	82
Figura 49. Caudales en régimen natural y ecológicos mínimos en el tramo aguas abajo de la CH Chococo. (Fuente elaboración propia).	87
Figura 50. Plano de subsistemas del análisis del modelo de gestión de la cuenca de Ocoña. (Fuente Elaboración propia).	88

Figura 51. Agrupación de subcuencas en los distintos subsistemas. (Fuente: Elaboración propia).	88
Figura 52. Esquema del modelo de gestión de la cuenca del río Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).	90
Figura 53. Detalle del subsistema de Parinacochas. (Fuente: elaboración propia).	91
Figura 54. Detalle del subsistema de Pacapausa-Pallancata. (Fuente: elaboración propia).	92
Figura 55. Detalle del subsistema de Mirmaca. (Fuente: elaboración propia).	93
Figura 56. Detalle del subsistema de Oyolo-Marán. (Fuente: elaboración propia).	94
Figura 57. Detalle del subsistema de Alto-Medio Cotahuasí. (Fuente: elaboración propia).	95
Figura 58. Detalle del subsistema de Pampamarca-Bajo Cotahuasí. (Fuente: elaboración propia).	96
Figura 59. Detalle del subsistema de Arma-Chichas. (Fuente: elaboración propia).	97
Figura 60. Detalle del subsistema de Ocoña Valle. (Fuente: elaboración propia).	98
Figura 61. Garantías de servicio de las demandas en los distintos subsistemas del modelo de gestión de la cuenca de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).	99
Figura 62. Oferta, suministro y déficit medio mensual en el subsistema Pacapausa-Pallancata. (Fuente: Elaboración propia).	100
Figura 63. Oferta, suministro y déficit medio mensual en el subsistema Mirmaca. (Fuente: Elaboración propia).	101
Figura 64. Oferta, suministro y déficit medio mensual en el subsistema Alto-Medio Cotahuasí. (Fuente: Elaboración propia).	102
Figura 65. Oferta, suministro y déficit medio mensual en el subsistema Pampamarca-Bajo Cotahuasí. (Fuente: Elaboración propia).	102
Figura 66. Oferta, suministro y déficit medio mensual en el subsistema Arma-Chichas. (Fuente: Elaboración propia).	103
Figura 67. Oferta, suministro y déficit medio mensual en el subsistema Ocoña Valle. (Fuente: Elaboración propia).	104
Figura 68. Volumen almacenado de los embalses de la cuenca de Ocoña: Parinacochas, Llawancocha y Huanzo. (Fuente: Elaboración propia).	105

Figura 69. Caudales promedio mensuales en la CH Chococo y el tramo con caudal ecológico, y sus caudales objetivos respectivamente. (Fuente: Elaboración propia). 106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Superficie de la cuenca de Ocoña por departamentos y provincias (Fuente: Elaboración propia).	15
Tabla 2. Número de fenómenos de geodinámica externa en la cuenca de Ocoña. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).....	20
Tabla 3. Superficie ocupada por los distintos usos del suelo en la cuenca de Ocoña. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).....	25
Tabla 4. Población de la cuenca de Ocoña por provincia y departamento. (Fuente: Elaboración propia).	31
Tabla 5. Tasa de analfabetismo en la cuenca de Ocoña. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).	31
Tabla 6. Población sin acceso a los servicios básicos en la cuenca de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).	32
Tabla 7. Ríos y quebradas principales de la cuenca de Ocoña. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).	38
Tabla 8. Valores recomendados para los parámetros del modelo Nieve N-2. (Fuente: manual EvalHid).....	50
Tabla 9. Calidad del ajuste según el valor del índice PBIAS.....	58
Tabla 10. Calidad del ajuste según el valor de la eficiencia de Nash-Sutcliffe.....	58
Tabla 11. Criterio de cálculo de caudales ecológicos. (Fuente: Elaboración propia).....	59
Tabla 12. Resumen de criterios de garantía o confiabilidad. (Fuente: Elaboración propia).	60
Tabla 13. Precipitaciones medias mensuales multianuales por subcuencas. (Fuente: Elaboración propia).	64
Tabla 14. Temperaturas medias mensuales multianuales por subcuencas. (Fuente: Elaboración propia).	65
Tabla 15. Evapotranspiración potencial media mensual multianual por subcuencas. (Fuente: Elaboración propia).....	66

Tabla 16. Corrección de serie de caudales de la EH de Salamanca. (Fuente: Elaboración propia).	68
Tabla 17. Tabla 11. Corrección de serie de caudales de la EH de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).	69
Tabla 18. Estimación del parámetro H_{max} en función de los usos del suelo de la cuenca. (Fuente: Elaboración propia).....	71
Tabla 19. Estimación del parámetro I_{max} en función de la litología de la cuenca. (Fuente: Elaboración propia).	72
Tabla 20. Estimación inicial de los parámetros H_{max} e I_{max} para las subcuencas. (Fuente: Elaboración propia).	73
Tabla 21. Parámetros finales del Modelo de Témez para cada subcuenca. (Fuente: Elaboración propia).	74
Tabla 22. Bondad de ajuste en el periodo de calibración de la EH de Salamanca. (Fuente: Elaboración propia).....	75
Tabla 23. Bondad de ajuste en el periodo de validación de la EH de Salamanca. (Fuente: Elaboración propia).	76
Tabla 24. Bondad de ajuste en el periodo de calibración de la EH de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).	77
Tabla 25. Bondad de ajuste en el periodo de validación de la EH de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).	78
Tabla 26. Bondad del ajuste del modelo de la ANA. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).	79
Tabla 27. Caudales de aportación de los manantiales en el modelo de gestión de la Cuenca de Ocoña. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).	83
Tabla 28. Demandas anuales introducidas en el modelo de gestión de la cuenca de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).	84
Tabla 29. Valores de retornos de riego estimados en las demandas agrarias del río Ocoña. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).	85
Tabla 30. Demanda hidroenergética mensual de la CH de Chococo en Hm^3 . (Fuente: Elaboración propia).	85
Tabla 31. Características de las lagunas y embalses modelados en la cuenca de Ocoña. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).....	86

Tabla 32. Tasa de evaporación media mensual en los embalses y lagunas modelados. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).....	86
Tabla 33. Caudales en régimen natural y ecológicos mínimos en el tramo aguas abajo de la CH Chococo. (Fuente elaboración propia).....	87
Tabla 34. Orden de prioridad en el modelo. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).	87
Tabla 35. Cumplimiento de caudales ecológicos. (Fuente: Elaboración propia).	106
Tabla 36. Cumplimiento de caudales objetivos de la CH Chococo. (Fuente: Elaboración propia).	106
Tabla 37. Balance del modelo de gestión de la cuenca de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).	107
Tabla 38. Confiabilidad de servicio de las demandas por zonas y usos. Modelo de gestión de Ocoña. (Fuente: Elaborado por la Autoridad Nacional del Agua de Perú).	108

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

En los últimos años, Perú ha experimentado un gran cambio en la gestión de los recursos hídricos. Con la creación de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) en 2008, la derogación de la Ley General de Aguas de 1969 en el año 2009 y la creación de la Ley de Recursos Hídricos (Ley N° 29338), se inicia un proceso de modernización en la gestión de recursos hídricos y en el ordenamiento jurídico en materia de aguas en Perú, fijándose como objetivo lograr la conservación, preservación y buen uso del agua bajo los principios de equidad, eficiencia y sostenibilidad ecológica (Pinto Ortiz, 2015).

Con todo ello, la ANA en los últimos años ha comenzado a realizar diversos estudios de evaluación, planificación y gestión de recursos hídricos en las distintas cuencas de todo el territorio nacional, con el objetivo de conseguir una mejor gestión integrada de los recursos.

Entre las distintas cuencas donde se han realizado diversos estudios se encuentra la cuenca de Ocoña, que engloba los ríos de Ocoña, Marán (también conocido como el Alto Ocoña), Cotahuasi y Arma-Chichas entre otros. En dicha cuenca se determinó la disponibilidad hídrica de la cuenca hidrográfica con un modelo de soporte para toma de decisiones, de forma que se pudiera determinar los derechos de agua de los que podía disponer la Autoridad Nacional del Agua una vez descontados los derechos ya otorgados, así como analizar distintos escenarios futuros.

1.2. OBJETIVOS

El presente documento tiene como principal objetivo el análisis de la situación actual de la gestión de los recursos hídricos en la cuenca de Ocoña, identificando los problemas derivados del insuficiente nivel de satisfacción de las demandas de agua y de la ineficiente gestión de los sistemas de explotación.

Para ello será necesario elaborar un modelo hidrológico (transformación precipitación-escorrentía) y un modelo de gestión, que nos permitan evaluar la importancia de las aportaciones que recibe la cuenca y compararlas con las necesidades hídricas existentes en la zona de estudio.

Por tanto, se debe disponer de una serie suficientemente extensa de caudales registrados (en este caso de 48 años, desde 1965 hasta 2013) para poder representar con exactitud el comportamiento estocástico de la escorrentía.

A través de los modelos podrá realizarse un balance hídrico de la cuenca, y se podrá analizar adecuadamente el funcionamiento actual de la gestión de sus recursos

hídricos, detectando las deficiencias del sistema de explotación actual y proponiendo medidas que ayuden a mejorar el funcionamiento del mismo.

Por último, se realizará una comparación de los resultados obtenidos en los modelos desarrollados en este proyecto (elaborados mediante “Aquatool +”), con los resultados que se obtuvieron en el modelo realizado con anterioridad por la ANA en la cuenca, en este caso un único modelo elaborado mediante el software “WEAP”.

Mediante la realización de estos modelos se podrá llevar a la práctica la aplicación de conceptos de planificación hidrológica y de gestión de cuencas complejas a un caso real como es el de la cuenca de Ocoña, permitiendo alcanzar una mayor profundidad en dichos conceptos.

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CUENCA

2.1. ÁMBITO TERRITORIAL Y DEMARCACIÓN ADMINISTRATIVA

La cuenca de Ocoña se encuentra en la zona sur de la costa de Perú, en la vertiente del océano Pacífico. Tiene una extensión de 15998.13 km² situándose entre las longitudes Oeste: 72° 18' 5.71" y 73° 48' 19.60", y las latitudes Sur: 14° 30.22' y 16° 27' 29.61"; encontrándose limitada al norte por la cuenca de Pampas y la intercuenca Alto Apurímac, al este por la cuenca Camaná y la intercuenca 135, y al oeste por la cuenca Pescadores-Caraveli, cuenca Yauca y cuenca Chaparra y la intercuenca 13711.

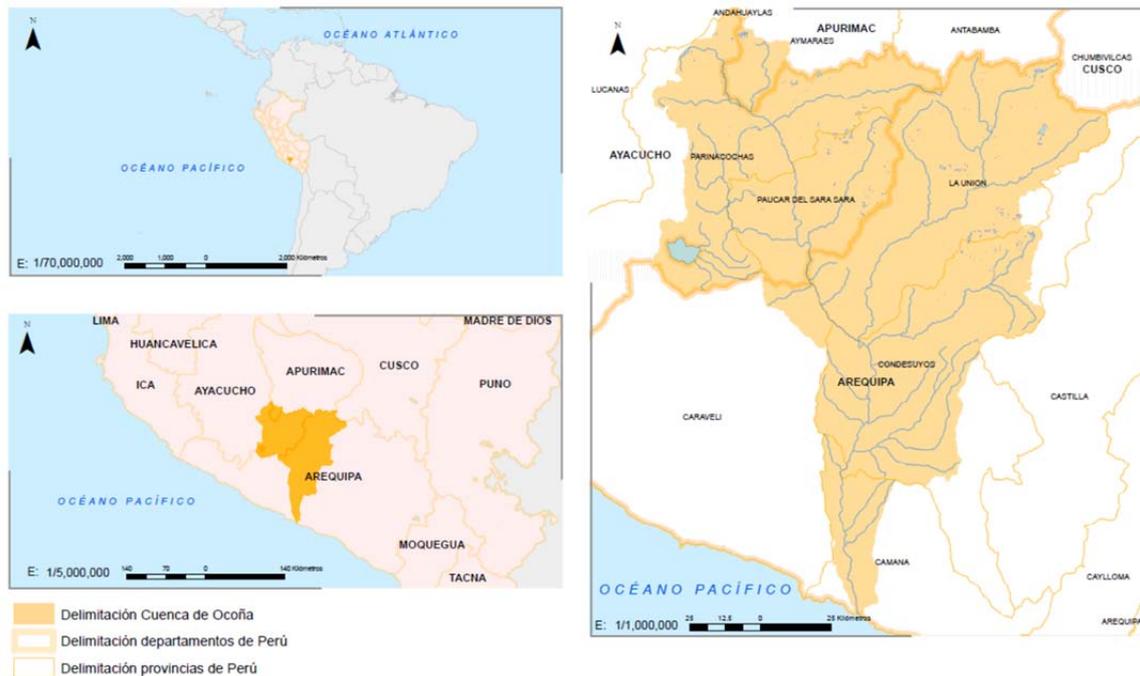


Figura 1. Plano de geolocalización. (Fuente: Elaboración propia)

Este ámbito se extiende dentro de 3 departamentos: Arequipa, Ayacucho y Apurímac, y de 7 provincias: Páucar del Sara Sara, Parinacochas, La unión, Condesuyos, Caravelí, Camaná y Aymaraes. Siendo el departamento de Arequipa el que ocupa una mayor extensión de la cuenca (más del 60%).

Además, el ámbito de la cuenca de Ocoña se encuentra en la jurisdicción de 2 Administraciones Locales del Agua (ALA):

- La ALA Ocoña-Pausa, que comprende la mayor parte de la superficie de la cuenca, ocupando 15352.67 km² de la misma, y pertenece a la Autoridad Administrativa del Agua (AAA) Caplina-Ocoña.

- La ALA Cháparra-Acarí, que comprende la subcuenca endorreica de Parinacochas al oeste de la cuenca de Ocoña, y ocupando una superficie de 646.06 km², y pertenece a la AAA Cháparra-Chincha.

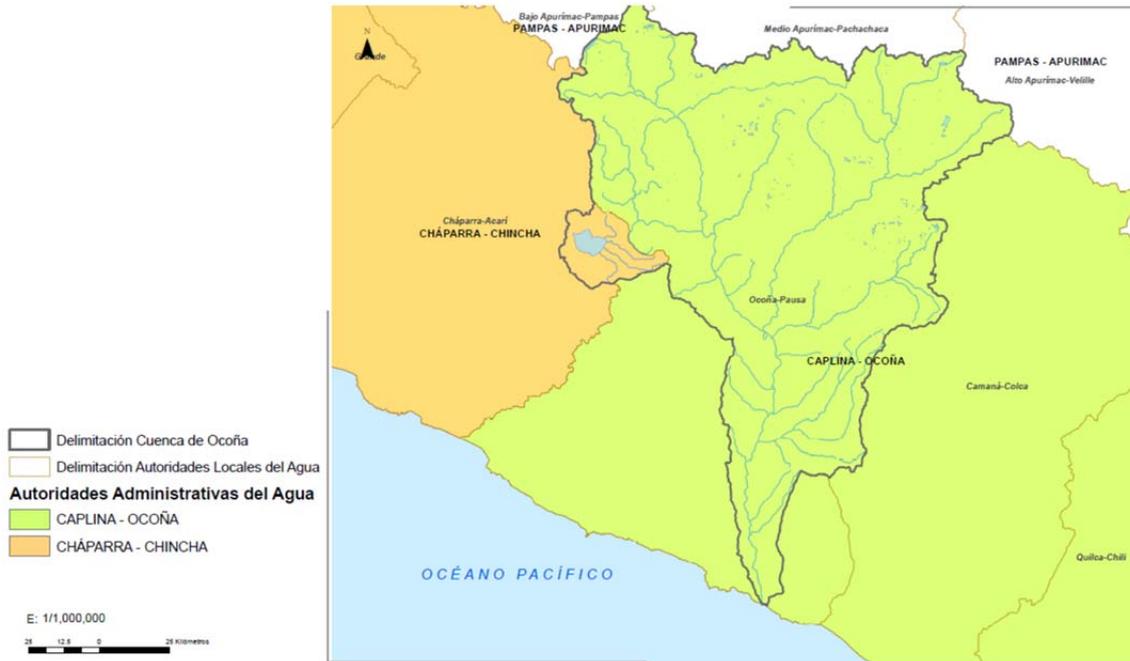


Figura 2. Plano de la demarcación administrativa (Fuente: Elaboración propia).

Provincia	Área de la provincia (km ²)	Área en el departamento	Departamento
Aymares	428.9	428.8	APURIMAC
Camana	851.8	9814.6	AREQUIPA
Caraveli	314.7		
Condesuyos	3881.6		
La unión	4766.5		
Parinacochas	3670.5	5754.7	AYACUCHO
Paucar del Sara Sara	2084.2		

Tabla 1. Superficie de la cuenca de Ocoña por departamentos y provincias (Fuente: Elaboración propia).

2.2. MARCO FÍSICO

En este apartado se describirán los rasgos más generales del terreno de la cuenca de Ocoña, tanto atendiendo a aspectos geológicos o geomorfológicos, como a usos del suelo o climatología.

2.2.1. CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS Y FISIOGRÁFICAS

La cuenca del río Ocoña está ubicada en los Andes Occidentales Meridionales del Perú, por lo que sus características físicas y climáticas se encuentran marcadas por la propia cordillera de los Andes.

La cuenca se caracteriza por poseer un relieve bastante variado; la zona costera es una de las porciones más secas del desierto costero, entretanto la región interior andina presenta valles escarpados y cañones:

- La zona costera (zona del valle de Ocoña) con alturas que van entre los 0 y 1000 msnm, se caracteriza por tener un relieve bastante plano.
- Conforme nos alejamos de la costa, y se alcanzan las zonas bajoandinas y mesoandinas donde el relieve se va tornando más accidentado encontrándonos con pequeñas zonas de planicie poco significativas, hasta alcanzar los 4000 msnm. En esta zona podemos encontrarnos el cañón del Cotahuasi, uno de los más profundos del mundo (3354 m).
- Por encima de los 4000 msnm nos encontramos en la zona altoandina caracterizada por las altiplanicies y colinas poco empinadas, que contrastan con las zonas más montañosas donde aparecen los picos y volcanes más importantes de la región (nevados de Cullpacucho, Huaytane, Huaña...). En zonas de alta montaña también se detectan zonas de nieves perpetuas importantes; los principales nevados son los de Firura, Solimana, Coropuna y Sara Sara.
- También cabe destacar la laguna de Parinacochas, una subcuenca endorreica al oeste de la cuenca de Ocoña que se caracteriza por ser una zona de poca pendiente por encima de los 3000 msnm.



Figura 3. Laguna de Parinacochas y al fondo el nevado Sara Sara. (Fuente: www.chumpi.info).

El curso del río de Ocoña es algo sinuoso, el relieve general de la cuenca es el que caracteriza a prácticamente todos los ríos de la costa, es decir, el de una hoya hidrográfica escarpada y alargada, de fondo profundo y quebrado y con fuertes pendientes.

Todo ello lleva a que el cauce principal del río tenga pendientes comprendidas entre el 0.85% y 5% de media, teniendo una media global en toda la cuenca del 1.64%.

2.2.2. CLIMATOLOGÍA

La climatología de la zona suroccidental de Perú está afectada por factores orográficos, oceánicos y latitudinales; estos factores interactúan estando a su vez condicionados por los Andes y las corrientes marinas cercanas al litoral occidental de América del Sur.

La cordillera de los Andes debido a su altura (4000 m de media) afecta a la distribución de temperaturas, humedad y presión atmosférica; además dada la orientación de sus valles también afecta a la dirección de los vientos. El resultado de todo ello, es una gran variación de tipos y densidad de vegetación entre unas zonas y otras.

En cuanto a las corrientes marinas, existen diversas corrientes que afectan a la costa de la región sur de Perú, las dos más significativas son la corriente de Humboldt y la corriente del Niño.

La corriente de Humboldt o corriente peruana, es una corriente oceánica de dirección sur a norte originada por el ascenso de aguas profundas, y por tanto, de baja temperatura. Estas aguas frías limitan la evaporación provocando la generación de neblinas en la costa peruana, estas neblinas provocan la ausencia de lluvias y temperaturas más bajas de las que tendrían de acuerdo a su latitud.

En el caso de la corriente del Niño, se produce un desplazamiento de agua cálida originada en la zona ecuatorial del Pacífico hacia el Sur, provocando un aumento de la evaporación del agua marina, y dando lugar a cumulonimbos que ocasionan tormentas y fuertes precipitaciones.

En la cuenca de Ocoña, por tanto, se distinguen fundamentalmente cinco tipos de climas correspondientes a la Clasificación Climática del Perú (SENAMHI), que definen sucintamente las distintas variedades climáticas de Perú:

- E(d) B'1 H3: Zona de Clima semicálido, árido, con deficiencia de lluvia en todas las estaciones, con humedad relativa calificada como húmeda. Éste clima se da fundamentalmente en el valle de Ocoña y en las cercanías a las cuencas medias.
- D(o,i,p) B'2 H2: Zona de Clima templado, semiárido, con deficiencia de lluvia en otoño, invierno y primavera, con humedad relativa calificada como seca. Se da en zonas aledañas al clima E(d) B'1 H3, identificándose como una transición hacia un clima más frío.

- C(o,i,p) C' H2: Zona de Clima frío, semiseco, con deficiencia de lluvia en otoño, invierno y primavera, con humedad relativa calificada como seca. Al igual que en el caso anterior este clima también hace de transición hacia un clima más frío, teniendo una mayor extensión en torno a la laguna de Parinacochas.
- B(o,i) D' H3: Zona de Clima semifrío, lluvioso, con deficiencia de lluvia en otoño y en invierno, con humedad relativa calificada como húmeda. Se da en las regiones más montañosas principalmente al norte y noreste de la cuenca, por encima de los 4000 msnm.
- N: Nieve

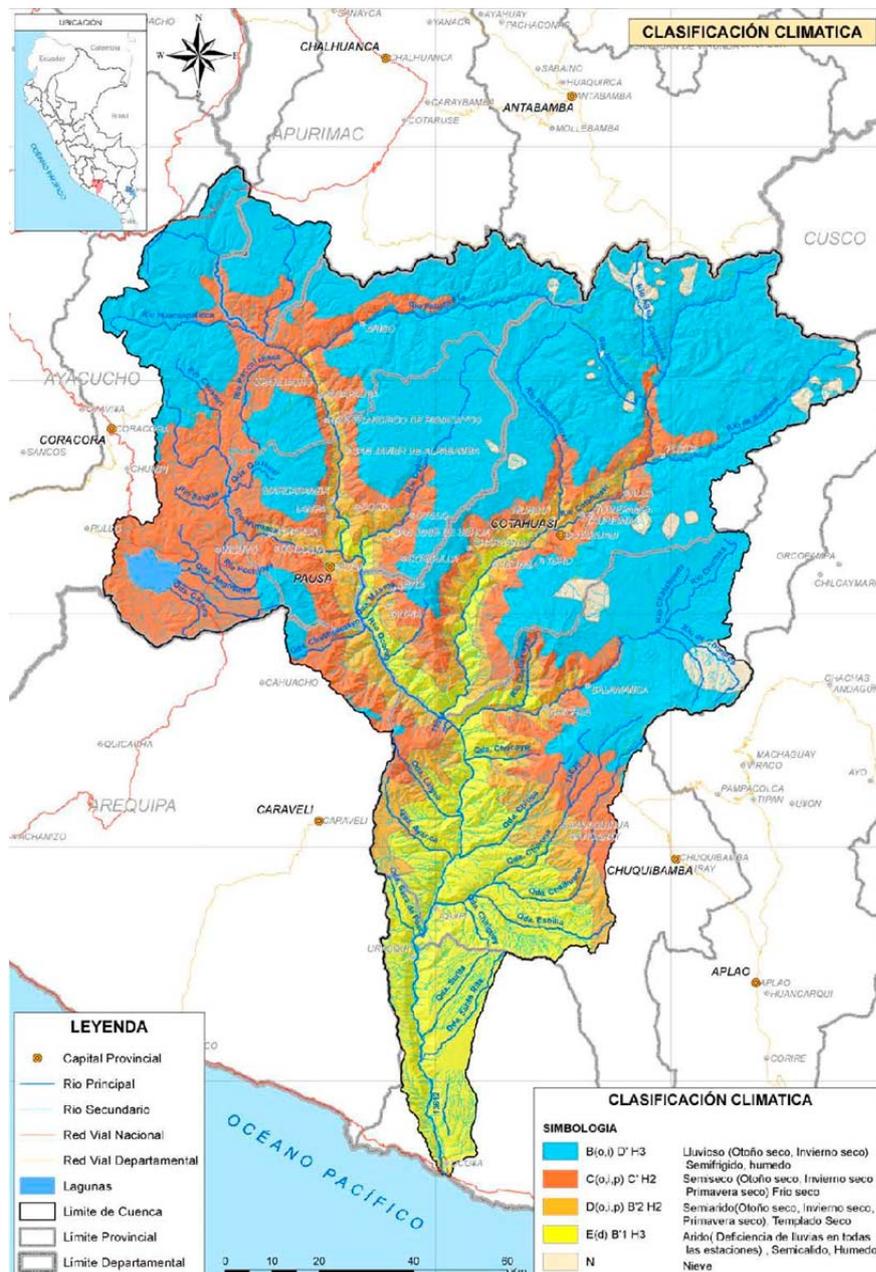


Figura 4. Clasificación climática de la cuenca de Ocoña (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).

2.2.3. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA

La cordillera de los Andes, es una de las áreas de mayor actividad sísmica y volcánica de la tierra, por tanto, es necesario caracterizar ambos fenómenos en la cuenca de Ocoña.

2.2.3.1. VULCANISMO

Dentro de la cuenca Ocoña, podemos encontrar varios volcanes, todos ellos inactivos: los volcanes Sara Sara de 5,505 m.s.n.m., Huañipaco (5,184 m.s.n.m.), Auquinato (5,021 m.s.n.m.) Solimana (6093 m.s.n.m), Firura (5498 m.s.n.m) y Coropuna (6425 m.s.n.m). Algunos conos volcánicos han sido parcialmente destruidos, sin embargo, otros como el Sara-Sara, conservan aún su cono volcánico completo.

El Volcán Sara-Sara está ubicado al oeste del pueblo de Pausa, presenta un aspecto cónico, cuyas lavas y piroclásticos se han acumulado e interestratificado a través de numerosas erupciones, constituyendo un aparato efusivo tipo estratovolcán. Lo mismo se puede decir del Volcán Solimana, ubicado en la parte central de la cuenca, el volcán Firura que actualmente se encuentra cubiertos por nieves perpetuas y el Volcán Coropuna, siendo éste el que ocupa mayor extensión.

2.2.3.2. SISMICIDAD

Respecto a la actividad sísmica, cabe destacar que en la cuenca de Ocoña se dan valores máximos de intensidad sísmica de VII y VIII en la escala Mercalli Modificada, siendo la mitad norte de la cuenca la de menor actividad sísmica, y la zona de costa la de mayor actividad.

Todo ello indica la importante actividad sísmica que nos podemos encontrar en la cuenca.

2.2.3.3. GEODINÁMICA EXTERNA

En la cuenca Ocoña se han identificado fenómenos geodinámicos que afectan negativamente al medio físico, poblaciones, infraestructuras y actividades socioeconómicas.

Los principales procesos geodinámicos que se observan en la cuenca son la caída de rocas, los flujos de barro y deslizamientos, entre otros.

Estos fenómenos geodinámicos se presentan agrupados principalmente en la región del cañón del río Cotahuasí y sus afluentes (Sumana, Pampamarca y Talinacocha), en el río Marán, y en el bajo y medio Ocoña (en este último caso sólo los fenómenos de caídas de rocas y flujos de barro).

En la Tabla 2 podemos comprobar el número de fenómenos de estas características que se dan en toda la cuenca:

Fenómeno	Cantidad	%
Caída	106	28.0%
Flujo	110	29.0%
Deslizamiento	410	11.0%
Movimiento Complejo	22	6.0%
Reptación	3	1.0%
Vuelco	1	0.0%
Otros	96	26.0%
TOTAL	379	100.0%

Tabla 2. Número de fenómenos de geodinámica externa en la cuenca de Ocoña. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).

2.2.3.4. LITOLOGÍA

Existen multitud de unidades estratigráficas en la cuenca de Ocoña, a continuación se resume brevemente las principales unidades en cuanto a la extensión que ocupa en la cuenca:

- Formación Alpbamba. Ocupa un 29% del área de la cuenca. Está constituida por una gruesa y monótona secuencia de tobas brechoides, riolíticas, compactas y resistentes a la erosión; constituyendo fuertes escarpas que le dan a esta unidad características topográficas notables.
- Grupo Barroso. Se extiende en un 28% de la superficie de la cuenca. Esta formación constituye los principales centros volcánicos de la región y está formado por rocas volcánicas, procedentes de lavas andesíticas porfíricas alternándose con flujos de andesita, e intercalaciones de brechas y aglomerados.
- Depósitos Fluvioglaciares. Que ocupa más de un 7% de la extensión de la cuenca, está constituida por derrubios procedente de la destrucción de morrenas, y están constituidos por fragmentos volcánicos dentro de una matriz desde arcillosa a limoarenosa.

Se sitúa principalmente rodeando a los tres grandes volcanes existentes en el área: Coropuna, Solimana y Firura.

- Unidad Incahuasi. Ocupa algo más de un 6% de la superficie de la cuenca, se trata de una unidad formada por rocas intrusivas granodioritas, tonalitas y dioritas. Ocupa la parte centro-sur de la cuenca.

- Depósitos aluviales. Los depósitos aluviales suponen un 4% de la extensión de la cuenca, éstos depósitos han sido transportados por la corriente de los ríos y flujos de agua producto de las precipitaciones pluviales. Están compuestos por niveles intercalados de arenas, limos, arcillas y conglomerados y se encuentran principalmente en las terrazas fluviales, en los flancos de los valles o rellenando el lecho de los diferentes ríos y barrancos.
- Grupo Tacaza. Suponen más de un 4% del territorio. La litología de esta formación consiste en una secuencia predominantemente volcánica, con intercalaciones sedimentarias de tipo lacustrino y un conglomerado volcánico en la base. Estas rocas afloran en el entorno de la población de Pausa, a ambos márgenes del río Cotahuasi y del río Huanca Huanca, así como en el río Marán.
- Complejo Basal de la costa. Se extienden en un 4% de la superficie. Son formaciones escarpadas que llegan a generar acantilados, que se caracterizan por ser rocas metamórficas e intrusivas, tales como gneis y esquistos, dioritas, granitos y migmatitas.

La Figura 5, es un plano elaborado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2015) en el que se puede comprobar cómo se extienden cada una de las distintas formaciones en la cuenca de Ocoña.

valles escarpados y cañones, altiplanicies, etc. Estas características determinan los distintos usos del suelo que se pueden dar en todo el territorio.

En la cuenca se diferencian 10 tipos característicos de usos del suelo, además de los cuerpos de agua (lagos y lagunas). Estos distintos usos han sido definidos por el Ministerio del Ambiente de Perú en el “Mapa nacional de cobertura vegetal” (MINAM, 2015) atendiendo al uso propio del suelo y al tipo de cobertura vegetal, y su distribución espacial ha sido determinada mediante imágenes satélite y verificaciones de campo.

Los usos de suelo existentes en la cuenca son:

- Agricultura costera y andina. Áreas de terreno dedicadas a los distintos tipos de cultivo de la región.
- Bofedal. Humedales de altura, característicos de las mesetas andinas ubicadas sobre los 3800 m. de altura.



Figura 6. Imagen de Bofedal típico de la zona. (Fuente: Mapa Nacional de Cobertura Vegetal).

- Bosque relicto alto andino. Bosque característico de los Andes representado por el género *Polylepis* sp., comúnmente denominada quinual, conformado por más de 19 especies.



Figura 7. Imagen de bosque relictivo altoandino, en la cuenca de Ocoña. (Fuente: Mapa Nacional de Cobertura).

- Núcleo urbano.
- Desierto costero.
- Glaciar. Masas de hielo formadas en la parte alta de montañas.
- Periglacial. Áreas en torno a los glaciares, en el que se da presencia de hielo en el suelo y rocas.
- Loma. Generada por las neblinas asociadas a la corriente de Humboldt, se caracteriza por especies arbóreas como *Capparis* sp. y especies arbustivas como *Croton alnifolius*.
- Matorral arbustivo. Área ocupada por especies arbustivas y un estrato inferior de herbáceas, tales como *Grindelia* sp. o *Mutisia acuminata*.
- Pajonal altoandino. Conformado principalmente por herbazales como: *Stipa hans-meyeri* y *Calamagrostis rígida*, que dejan más áreas con suelos desnudos conforme aumenta la altitud.

En la Tabla 3 se muestran la superficie ocupada por cada uno de los distintos usos, y en el plano nº 3: cobertura vegetal (Figura 8) su distribución en la cuenca:

Símbolo	Formación vegetal	Área	
		km ²	%
Agri	Agricultura costera y andina	533,52	3,3%
Ap	Periglaciario	2 357,38	14,75%
Bo	Bofedal	184,51	1,2%
Bral	Bosque relicto altoandino	47,88	0,3%
Ciu	Ciudad	0,46	<0,1%
D	Desierto costero	2 181,62	13,6%
Gl	Glaciar	75,75	0,5%
Lag	Lago y laguna	70,55	0,4%
Lo	Lomada	4,76	<0,1%
Ma	Matorral arbustivo	3 784,94	23,7%
Pj	Pajonal altoandino	6 756,76	42,2%

Tabla 3. Superficie ocupada por los distintos usos del suelo en la cuenca de Ocoña. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).

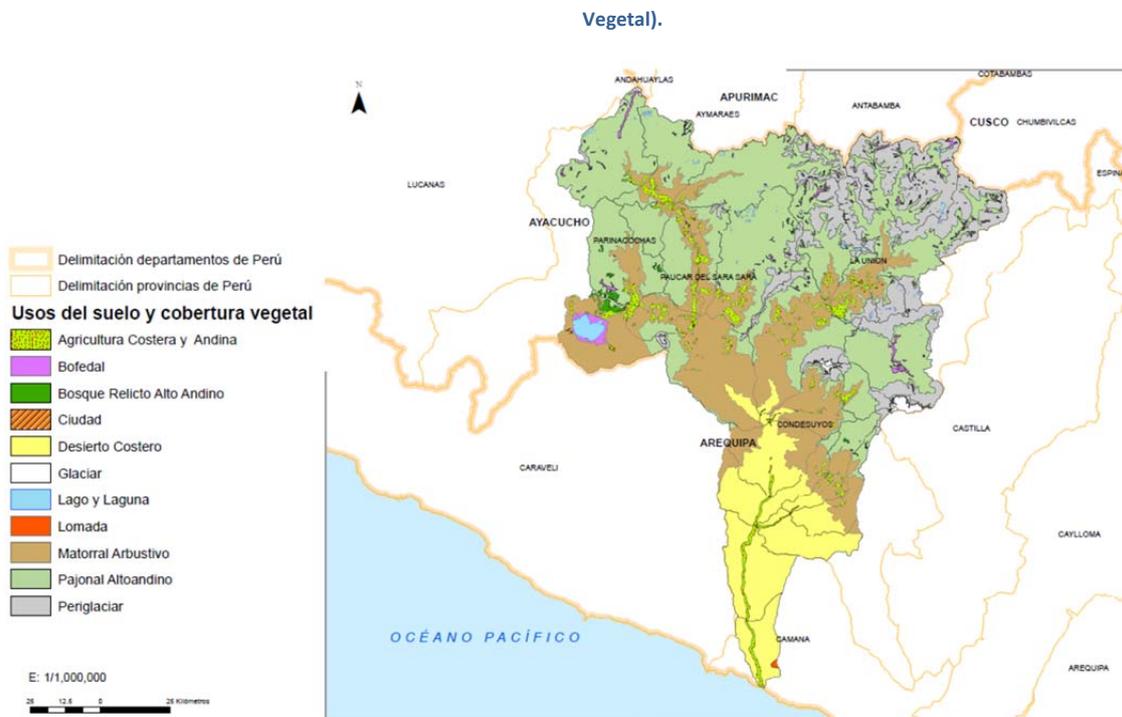


Figura 8. Plano de cobertura vegetal en la cuenca de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).

2.3. MARCO BIÓTICO

En este apartado se dará a conocer la clasificación de sistemas ecológicos en la cuenca de Ocoña, que en definitiva resume las distintas condiciones de vida que pueden darse; también se realiza un breve resumen de las áreas protegidas de la cuenca.

2.3.1. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS ECOLÓGICOS

El marco biótico de la cuenca de Ocoña se caracteriza por presentar una gran biodiversidad y un gran abanico de ecosistemas. Estos ecosistemas se clasifican mediante el Sistema de Clasificación de Zonas de Vida de Holdridge, que permite clasificar las distintas áreas del territorio con similares condiciones de vida atendiendo a la temperatura, precipitación y evapotranspiración potencial, con el objetivo de agrupar y analizar las diferentes poblaciones y comunidades bióticas.

Atendiendo a este sistema de clasificación, en la cuenca de Ocoña se pueden llegar a distinguir hasta 22 sistemas ecológicos distintos. Los principales ecosistemas (descritos en el informe de Evaluación de Recursos Hídricos de la Cuenca de Ocoña) que podemos encontrar en el ámbito de la cuenca de Ocoña son los siguientes:

- Desierto desecado – Subtropical (dd-S)

Esta distribuido en el litoral de la región de la Costa, sobre una extensión superficial de 1176 Km², equivalente al 7.4% del área de la cuenca. Posee un clima desecado desértico y semicálido, con temperatura media anual entre 18°C y 19°C; y precipitación pluvial total promedio anual, entre 15 y 30 milímetros. La cubierta vegetal es nula o muy escasa, predominando el paisaje de planicie cubiertos por mantos de arena y algunos afloramientos de colinas y lomadas con afloramientos líticos. La actividad agrícola en las tierras de esta zona de vida, sólo es posible donde existe agua para regadío.

- Estepa espinosa - Montano Bajo Subtropical (ee-MBS)

Esta distribuido en los valles interandinos y laderas de la vertiente occidental de la Cordillera de los Andes, entre los 2000 y 3000 m.s.n.m., sobre una extensión superficial de 2048 Km², equivalente al 12.9% del área de la cuenca. Posee un clima semiárido-Templado Cálido, con temperatura media anual entre 12°C y 17°C; Y precipitación pluvial total, promedio anual entre 250 y 450 mm. La cubierta vegetal es abundante, conformada por una vegetación herbácea, asociada con arbustos como la "chamana" dodonea viscosa y árboles como el "molle" y cactáceas. La agricultura en esta zona de vida es practicada en los lugares donde hay disponibilidad de agua para regar, cultivándose productos de pan llevar y frutales como manzanos y duraznos.

- Páramo húmedo - Subalpino Subtropical (ph-SaS)

Esta distribuido entre los 3900 y 4200 m.s.n.m. sobre una extensión superficial de 2544 Km², equivalente al 16.0% del área de la cuenca. Posee un clima húmedo-Frío, con temperatura media anual entre 4°C y 6°C; y precipitación pluvial total, promedio anual, entre 450 y 550 milímetros. La cubierta vegetal lo conforma una vegetación típica de pradera alto andina constituida por pastos naturales principalmente de la

familia Gramínea más o menos densos con presencia de algunas cactáceas postradas del género *Opuntia* así como arbustos y especies arbóreas del género *Polylepis*, comúnmente llamado "quinual". Las tierras de esta zona de vida son utilizadas para el pastoreo de ganado lanar y vacuno.

- Tundra húmeda - Alpino Subtropical (th-AS)

Esta distribuido entre los 4500 y 5000 m.s.n.m., sobre una extensión superficial de 392 Km², equivalente al 2.5% del área de la cuenca. Posee un clima húmedo-Muy Frío, con temperatura media anual entre 1.5°C y 3°C; y precipitación pluvial total, promedio anual, entre 150 y 250 mm. La cubierta vegetal es escasa, destacando las especies de los géneros *Stipa*, *Calamagrostis*, *Festuca*, etc., así como plantas arrosetadas, constituyendo comunidades muy abiertas y dispersas, dejando el suelo casi desnudo. Las tierras de esta zona de vida son utilizadas para el pastoreo estacional trashumante.

2.3.2. ÁREAS PROTEGIDAS

En el término de la cuenca de Ocoña, encontramos un Área Natural Protegida (ANP): la Reserva Paisajística Subcuenca del Cotahuasi (RPSCC), situada en la zona noreste de la cuenca coincidiendo con el territorio de la provincia La Unión.

Este categoría de reserva se caracteriza por tener como objetivo conservar los valores de biodiversidad, cultural, paisajística y de ecosistemas, fomentando el desarrollo sostenible de la cuenca del Cotahuasi (SERNANP).

Se considera que es un punto importante desde el punto de vista ecológico de los Andes Meridionales por tener unas muy buenas características de conservación e importante biodiversidad.

Se han registrado numerosas especies en peligro de extinción así como especies amenazadas y vulnerables:

- En Peligro Critico (PC): murciélago longirostro peruano (*Platalina genovensium*),
- En Peligro (EN): Guanaco (*Lama guanicoe*), el gato andino (*Oreailurus jacobita*), arriero colibranca (*Agriomis andicola*), torito pechicenizo (*Anairetes alpinus*), cóndor andino (*Vultur Gryphus*) y nutria marina (*Lontra felina*).



Figura 9. Guanaco (*Lama guanicoe*). (Fuente: <http://noticiasdesanluis.com/>).

- Vulnerables (VU): murciélago (*Amorphochilus schnablii*), taruca (*Hippocamelus antisensis*), fringilo apizarrado (*Xenospingus concolor*) y jergón de costa (*Bothrops pictus*).
- Casi amenazadas (NT): puma (*Puma concolor*), vicuña (*Vicugna vicugna*), halcón peregrino (*Falco peregrinus*), gallareta gigante (*Fulica gigantea*), parihuana (*Phoenicopterus chilensis*), zambullidor blanquillo (*Podiceps occipitalis*), kiula andina (*Tinamotis pentlandii*) y sapo (*Bufo spinulosus*).



Figura 10. Kiula andina oinambú andino (*Tinamotis pentlandii*). (Fuente: Sergio Bitran M.).

También existen dos Áreas de Conservación Privada (ACP): Uchumiri y Huamanmarca-Ochuro-Tumpullo. Las ACP, son zonas de conservación propuestas de forma voluntaria por la sociedad civil, con el objetivo de ayudar a preservar los valores biológicos de la zona y promover actividades económicas que sean ambientalmente sostenibles (SERNANP, 2014).

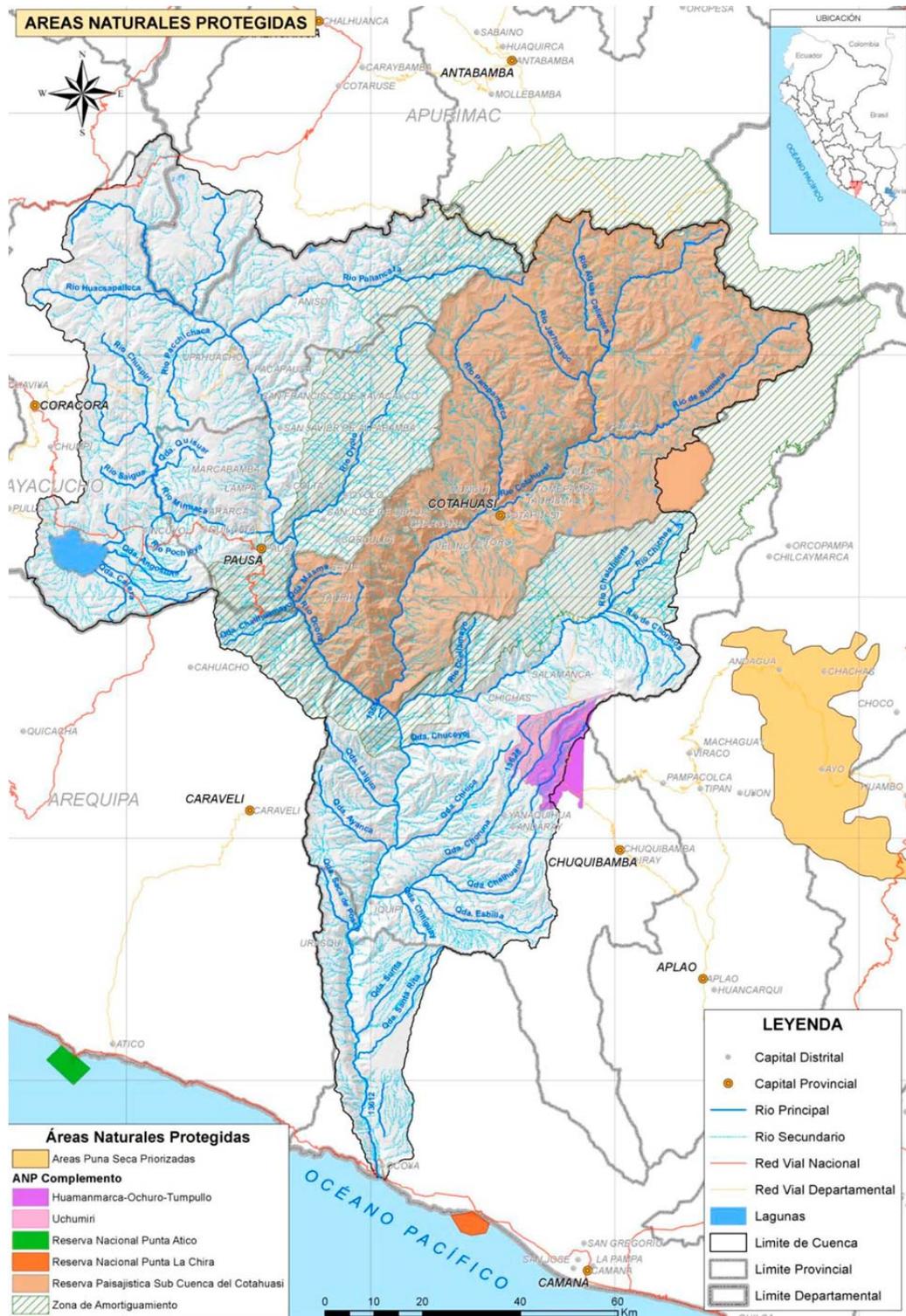


Figura 11. Mapa de zonas protegidas de la cuenca de Ocoña. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).

2.4. MARCO SOCIOECONÓMICO

En este apartado, se pretende describir los aspectos socioeconómicos fundamentales de la región de Ocoña, y las diferencias principales entre las poblaciones pertenecientes a distintos departamentos.

2.4.1. DEMOGRAFÍA

Como ya se ha comentado anteriormente, la cuenca de Ocoña se extiende dentro de 3 departamentos: Arequipa, Ayacucho y Apurímac, siendo las dos primeras las que mayor ocupación tiene en la cuenca.

Del mismo modo, son los dos departamentos donde se concentra la población según datos del INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática de Perú) en 2010; el departamento de Apurímac tiene 2499 habitantes dentro de la cuenca, mientras que la población de Ayacucho suma 23108 habitantes y la de Arequipa 36131 habitantes, de un total de 61738 de personas que habitan en el ámbito de la cuenca de Ocoña.

Como se puede observar en el plano n° 4: demografía (Figura 12), las principales poblaciones se sitúan en las cercanías del río de Ocoña a lo largo de todo su recorrido, y en los de sus afluentes principales: Cotahuasi y Marmaca; concentrándose en la zona baja y media de la subcuenca del río Cotahuasi y en el alto y bajo Ocoña. Siendo los distritos más poblados el de Mariano Nicolás Valcárcel (6890 habitantes) en la provincia de Camaná y Yanaquihua (5820 habitantes) en la provincia de Condesuyos.

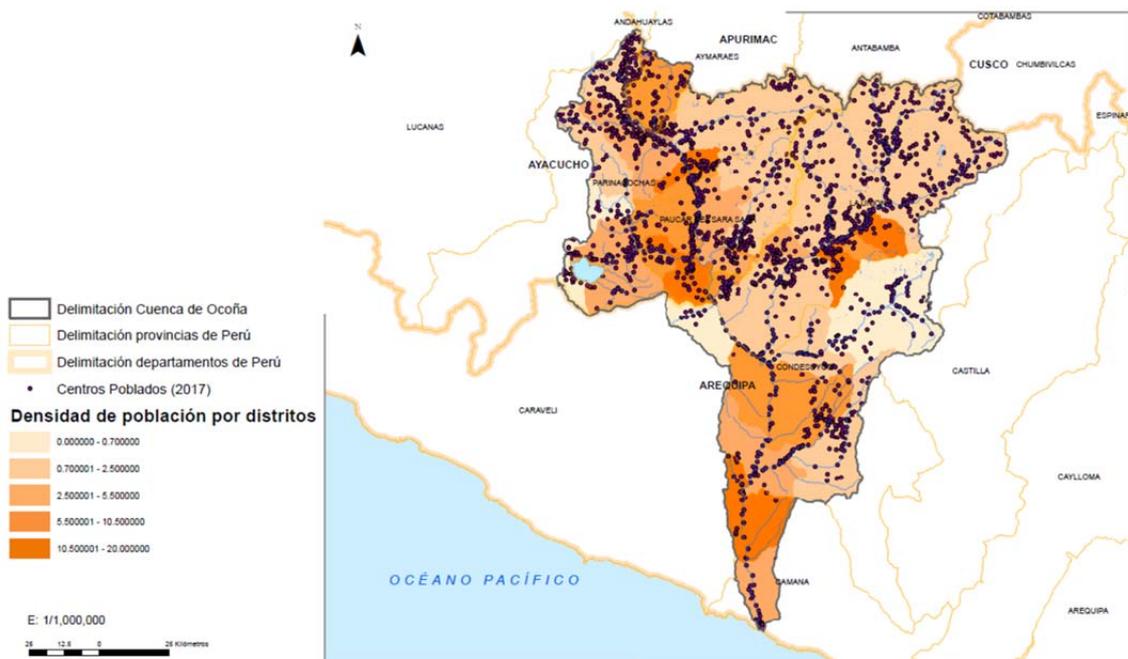


Figura 12. Plano de demografía: densidad de población por distritos y centros poblados censados en 2017. (Fuente: Elaboración propia).

Departamento	Población	%	Provincia	Población	%
Apurímac	2501	4%	Aymares	2501	4%
Arequipa	36130	59%	Camana	10751	17%
			Caraveli	100	0%
			Condesuyos	10685	17%
			La Unión	14594	24%
Ayacucho	23108	37%	Parinacochas	12119	20%
			Paucar del Sara Sara	10989	18%
Total	61739	100%	Total	61739	100.0%

Tabla 4. Población de la cuenca de Ocoña por provincia y departamento. (Fuente: Elaboración propia).

2.4.2. ASPECTOS SOCIALES

En cuanto a los aspectos sociales, cabe destacar las diferencias importantes que podemos encontrar a lo largo de la cuenca; según datos del INEI la tasa de analfabetismo de la región ronda el 14%, siendo las provincias con mayores tasas las de La Unión y Aymares (ambas con una tasa mayor del 20%), mientras que las tienen una menor tasa de analfabetismo son las de Camaná y Caravelí (con una tasa menor al 5%). Además, se observa mayores tasas en las mujeres que en los hombres.

Departamento	Provincia	Tasa de analfabetismo (%)		
		Total	Sexo	
			Hombre	Mujer
Apurímac	Aymaraes	23.1%	10.0%	36.6%
Árequipa	Camana	4.2%	2.1%	6.6%
	Caraveli	4.6%	2.2%	8.0%
	Condesuyos	10.1%	3.3%	19.4%
	La Union	20.8%	8.6%	32.6%
Ayacucho	Parinacochas	17.3%	9.0%	25.6%
	Paucar del Sara Sara	14.5%	6.6%	22.6%
Media de la cuenca		14.3%	6.3%	22.8%

Tabla 5. Tasa de analfabetismo en la cuenca de Ocoña. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).

Respecto a la economía familiar, las provincias con mayores porcentajes de pobreza son: Aymares, Parinacochas, Páucar del Sara Sara y La Unión (todas con umbrales de pobreza por encima del 50%), siendo especialmente preocupante la provincia de Aymares en la que existe un 34.6 % de pobreza extrema. Por el contrario, las regiones con menos pobreza son las de Camaná y Caravelí.

2.4.3. SERVICIOS BÁSICOS

Por último, también encontramos grandes deficiencias en los servicios básicos a los que tiene acceso la población. En las provincias de Condesuyos, La Unión y Aymares más de un 50% de la población no dispone de agua potable en sus hogares, siendo la

media de la cuenca del 43.5%. En cuanto a la red de saneamiento, sólo un 25.8% de la población dispone de ella, siendo prácticamente inexistente en toda la cuenca. Y respecto al alumbrado público, en torno al 50% de la población carece de la misma, siendo las zonas con mayores deficiencias Páucar del Sara Sara, Parinacochas y Aymares.

Departamento	Provincia	Población sin acceso a Servicios Básicos en el hogar		
		Sin agua	Sin desagüe a la Red Pública	Sin alumbrado de la Red Pública
Apurímac	Aymaraes	63%	100%	56%
Arequipa	Camana	30%	52%	27%
	Caraveli	49%	71%	44%
	Condesuyos	57%	73%	46%
	La Unión	54%	84%	41%
Ayacucho	Parinacochas	40%	70%	61%
	Páucar del Sara Sara	29%	83%	77%
Media en la cuenca		43%	74%	50%

Tabla 6. Población sin acceso a los servicios básicos en la cuenca de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).

En general, podemos observar como las provincias más pobres coinciden con las que tienen un mayor analfabetismo y peor situación respecto a los servicios básicos, dejando en evidencia las importantes diferencias existentes en toda la cuenca. Finalmente, es importante tener en cuenta los aspectos socioeconómicos de la región a lo largo de todo el presente documento, pues las soluciones que deben ser propuestas deben tener una cierta consonancia con la situación social y económica de la región.



Figura 13. Plaza de Armas en la población de Ocoña. (Fuente: <http://fotos.miarroba.es>, usuario: carlos3106).

2.4.4. ACTIVIDADES ECONÓMICAS

Las actividades económicas en la cuenca de Ocoña se centran en el sector primario, siendo los sectores secundarios y terciarios minoritarios en todo su territorio.

2.4.4.1. SECTOR PRIMARIO

- Agricultura y ganadería:

El sector agrario tiene una gran importancia en toda la cuenca, sobre todo en las provincias de Camaná, Condesuyos y La Unión, y en menor medida en las provincias de Páucar del Sara Sara y Parinacochas. En estas provincias la población depende fundamentalmente de las actividades agrarias, vinculadas especialmente en actividades agrícolas, mientras que las actividades ganaderas tienen una menor importancia.

La actividad agrícola ocupa en torno a 18000 ha. en toda la cuenca, siendo los cultivos con mayor participación en cuanto a superficie cultivada el maíz (en torno a un 40% de la superficie), la alfalfa (40%), la papa (10%) y la cebada (5%).

También cabe mencionar, que la actividad agrícola actualmente está en crecimiento en esta región, existiendo en la actualidad proyectos que tienen como objetivo potenciar e incrementar la producción agrícola. En resumen estos proyectos contemplan la posibilidad de llegar a incrementar el área de riego de distintas zonas de la cuenca en 15000 ha., así como modernizar de riego tradicional a riego por goteo en un total de 4500 ha.

Todo ello nos muestra la gran importancia que tiene el regadío en la gestión de recursos hídricos de la región, y por tanto, es fundamental unos niveles adecuados de garantías que aseguren la continuidad de la actividad agrícola a lo largo del año.

- Pesca:

La actividad pesquera en la cuenca de Ocoña se limita prácticamente en la pesca de camarón de río de forma artesanal durante los meses de marzo a diciembre.

Además, en la cuenca existen 7 instalaciones de piscifactoría, situadas en las provincias de Condesuyos y La Unión. Dichas instalaciones requieren de unos caudales pequeños (inferiores a 0.3 hm³/año) como demanda no consuntiva.

- Minería:

El sector minero tiene una gran importancia en la economía de la región, existen 20 empresas registradas dedicadas a esta actividad, además de cerca de 500 mineros que realizan actividades mineras de forma artesanal.

Esta actividad se caracteriza por el bajo requerimiento de recursos hídricos, y por la alta contaminación que puede generar sus residuos.

La principal actividad minera se concentra en las provincias de Condesuyos, Páucar del Sara Sara y Parinacochas.

2.4.4.2. INDUSTRIA

Como ya se ha comentado anteriormente, la actividad industrial carece de importancia en la cuenca, esta actividad se limita a la producción de vino y pisco artesanal en diversas zonas de la cuenca.

2.4.4.3. SERVICIOS

En cuanto al sector servicios, cabe destacar la actividad turística de la subcuenca del Cotahuasi, donde se encuentra la Reserva Paisajística Subcuenca del Cotahuasi.

2.5. INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA

El objetivo de este apartado es inventariar las principales infraestructuras hidráulicas que existen en la cuenca de Ocoña, comprender mejor el funcionamiento del sistema de explotación y las limitaciones existentes en cuanto a la gestión de recursos hídricos.

2.5.1. EMBALSES

En total existen 5 embalses en toda la cuenca, pero sólo 3 de ellas están actualmente operativas. Las presas que actualmente están operativas son:

- Embalse Llawancocha o represa de Quillunza, con una capacidad de 0.017 Hm^3 , y altura de presa de 15 m.
- Ocoruro que tiene una capacidad de 0.015 Hm^3 , y una altura de presa de 10 m.
- Micropresa Incuyo, que sólo dispone de 1200 m^3 de capacidad, siendo la represa de un metro de altura.

Por otro lado la Minipresa Angostura-Lacaya con 0.1 Hm^3 y con una altura de presa de 15 m y el embalse de Uzuro con 0.05 Hm^3 de capacidad y una altura de presa de 10 m, no están operativas.



Figura 14. Represa de Llawancocha o Quillunza. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).

La situación geográfica de estas presas puede comprobarse en el plano nº 5: infraestructuras hidráulicas (Figura 15).



Figura 15. Plano de infraestructuras hidráulicas. (Fuente: Elaboración propia).

2.5.2. CANALES

En la cuenca de Ocoña hay 123 canales principales de derivación, dedicados al uso agrícola. Éstos se ubican principalmente en la parte baja del río Ocoña (Provincias de Camaná y Condesuyos), y en la parte alta del Ocoña y en su afluente Mirmaca.

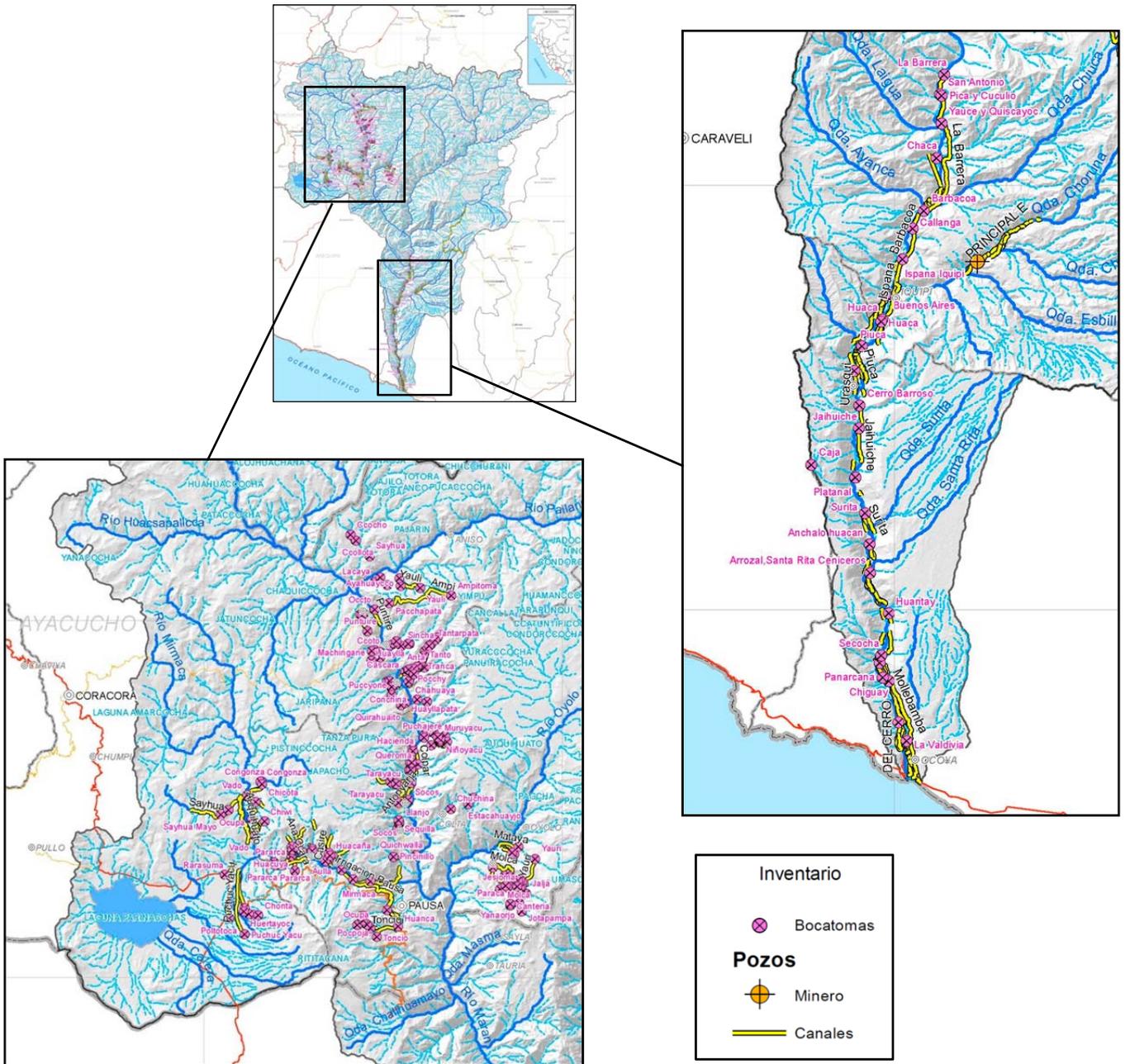


Figura 16. Canales principales de la cuenca de Ocoña. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).

2.5.3. BOCATOMAS

Existen un total de 241 bocatomas a lo largo de toda la cuenca que recogen agua para satisfacer las demandas agrarias y poblacionales. Estas tomas de agua tiene una capacidad que van de entre 1.2 m³/s (la de mayor capacidad) a tomas con capacidades inferiores a 0.01 m³/s.

2.5.4. CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Existe una central hidroeléctrica, situada en el río Chococo, con una potencia de 0.67 MW.

2.5.5. POZOS

En toda la cuenca sólo hay dos pozos, el primero sirve para satisfacer una demanda minera en el río Oyolo (SC-08), el segundo satisface parte de la demanda de los riegos de la Chorunga Baja (SC-25).

2.6. RÍOS PRINCIPALES Y OTRAS FUENTES DE AGUA

2.6.1. RÍOS PRINCIPALES

La red hidrográfica de la cuenca de Ocoña está formada por 1060 ríos y quebradas, donde cabe destacar al río de Ocoña, que en su desembocadura pasa un caudal medio superior a los 120 m³/s, y su afluente principal el río Cotahuasi con una aportación media superior a los 40 m³/s.

Otros ríos de gran importancia en la cuenca son: el río Arma Chichas (con un caudal medio de 12 m³/s) afluente del Ocoña en su parte media; los ríos Pallancata, Mirmaca y Oyolo (caudales medios entorno a los 8-10 m³/s), afluentes en la parte alta del río de Ocoña, también conocido como río Marán; los ríos Sumana y Pampamarca afluentes del río Cotahuasi (con caudales medios entorno a los 8 y 6 m³/s, respectivamente), y por último la quebrada de Chorunga que recoge aguas de varias quebradas, aportando en su punto final un caudal medio en torno a los 5m³/s al río Ocoña.

En la siguiente tabla se muestran los 27 ríos y quebradas más importantes de la cuenca según la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2015):

Ríos y quebradas	Longitud (km)	Pendiente (m/m)
Calera	17,01	0,03
Huilajro	11,08	0,04
Atunmayo	14,09	0,05
Enno	15,59	0,12
Joripaccha	14,07	0,12
Xexejaya	6,57	0,18
Fillo	12,08	0,15
Timpuya	12,37	0,15
Chacarumi	4,17	0,28
Oyolo	70,76	0,05
Mirmaca	83,18	0,03
Pacchichaca	32,5	0,04
Pochjoya	21,3	0,06
Pallancata	74,88	0,03
Masma	13,36	0,23
Angostura	21,82	0,05
Ullacha Grande	26,85	0,04
Pongomayo	16,36	0,04
Ocoña	286,65	0,02
Chorunga	69,07	0,06
Chiuca	37,63	0,1
Chichas	92,26	0,04
Ccellamayo	21,18	0,14
Pampamarca	57,08	0,04
Cotahuasi	161,07	0,03
Sumana	60,56	0,03
Aguas Calientes	34,66	0,02

Tabla 7. Ríos y quebradas principales de la cuenca de Ocoña. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).



Figura 17. Plano de ríos y quebradas. (Fuente: Elaboración propia).

2.6.2. MANANTIALES

En la cuenca de Ocoña los manantiales cumplen un papel importante, pues es una de las fuentes principales de agua de la región, empleándose tanto para abastecimiento poblacional como agrícola o en minería. En la cuenca existen 834 manantiales, según datos de la ANA, de la mayoría (más del 80%) corresponden a pequeños manantiales cuyo caudal no superan el $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$, y en sólo dos casos se superan el $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

2.6.3. LAGOS Y LAGUNAS

Existen 488 lagos y lagunas en el territorio de la cuenca de Ocoña, siendo el más importante de todos el Lago de Parinacochas con una superficie de 67.36 km^2 y dando lugar a una subcuenca endorreica. Otra laguna de gran importancia es la laguna de Huanzo con una superficie de 1.5 km^2 .



Figura 18. Laguna de Huanzo. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).

2.6.4. GLACIARES

En la cuenca hay una extensión total de 117 km^2 de nevados, siendo el más importante el nevado Coropuna situado al noreste de la provincia de Condesuyos, y que ocupa una superficie de 81 km^2 .

2.6.5. ACUÍFEROS

La mayor parte del recurso hídrico empleado en la cuenca procede de fuentes superficiales, únicamente se conocen dos demandas que tengan como fuente el recurso subterráneo (procedente de los dos pozos vistos anteriormente), estas demandas son de escaso caudal: una de ellas para uso minero y la otra para uso agrario sólo usado en épocas secas.

El único acuífero conocido existente en la cuenca, es un acuífero detrítico de fin de cuenca asociado a depósitos aluviales del Cuaternario emplazado en el cono deyectivo del río Ocoña, del que no se tiene mucha información ya que al no estar siendo explotado no existen estudios del subsuelo que permitan conocer las características del mismo.

Es por ello que no se ha tenido en cuenta la posible conexión del flujo subterráneo con el flujo superficial en el modelo de gestión que se desarrolla en el presente trabajo.

2.7. SUBCUENCAS

La cuenca del río de Ocoña se encuentra ubicada en la vertiente del Océano Pacífico del Perú, y sus límites están definidos según el método Pfafstetter. Éste método se basa en la superficie que ocupa las distintas unidades de drenaje de una cuenca y en su ubicación en relación con las unidades de drenaje vecinas, se trata pues de un método basado en criterios topológicos. La cuenca de Ocoña se define a partir del nivel 3 del sistema Pfafstetter, como la subcuenca con el código 136:



Figura 19. Cuencas del nivel 3 del sistema Pfafstetter en Perú. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).

Para poder realizar un análisis y una gestión adecuados en una cuenca es necesario dividirla en unidades de drenaje más pequeñas. Esta división de la cuenca en varias subcuencas o grupo de subcuencas, puede realizarse bajo distintos criterios.

En el caso de la cuenca de Ocoña, la ANA realizó una subdivisión de la cuenca en base a criterios topológicos (codificación Pfafstetter en los niveles 4 y 5), criterios hidrológicos (homogeneidad en características climatológicas...) y criterios de gestión (interrelación entre subcuenca-origen de recursos, existencia de embalse).

De este modo, se han obtenido las siguientes 32 subcuencas:

Código	Nombre subcuenca	Área (km ²)
SC-01	Laguna Parinacochas	644.23
SC-02	Alto Ocoña 01	821.49
SC-03	Alto Ocoña 02	575.92
SC-04	Pallancata	981.78
SC-05.01	Pacchichaca	219.75
SC-05.02	Alto Ocoña 03 MD	389.71
SC-05.03	Alto Ocoña 03 MI	331.00
SC-06	Mirmaca 01	681.84
SC-07	Mirmaca 02	297.10
SC-08	Oyolo	1058.06
SC-09	Resto de MA Ocoña	940.95
SC-10	Alto Cotahuasi 01	997.73
SC-11	Alto Cotahuasi 02	342.54
SC-12	Sumana	775.99
SC-13	Chococo	155.26
SC-14	Represa CR Quillunza	1.23
SC-15	Bajo Huarcaya	325.80
SC-16	Laguna Huanzo	4.55
SC-17	Pampamarca	650.70
SC-18	Bajo Cotahuasi	1153.59
SC-19	Medio Ocoña	14.25
SC-20.01	Nevado Arma-Chichas	50.51
SC-20.02	El Vado	845.53
SC-21	Medio Bajo Chichas	223.17
SC-22	Bajo Chichas	462.44
SC-23	MB Ocoña 01	595.21
SC-24	MB Ocoña 02	490.00
SC-25	Chorunga 01	357.37
SC-26	Chalhuane	339.30
SC-27	Chorunga 02	369.72
SC-28	Bajo Ocoña 01	591.13
SC-29	Bajo Ocoña 02	310.28

Figura 20. Subcuencas de la cuenca de Ocoña. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).

En la Figura 21, pueden observarse algunas singularidades de la división en subcuencas:

- La subcuenca SC-01, corresponde a la cuenca endorreica de la laguna de Parinacochas.
- La subcuenca SC-05, ha sido dividida en tres partes: SC-05.01 (zona alta de la cuenca), SC-05.02 y SC-05.03 que se sitúan a ambos márgenes del río Ocoña (alta Ocoña).
- La subcuenca SC-14 corresponde el embalse Llawancocha o represa Quillunza.
- La subcuenca SC-16 es el área que aporta agua a la laguna Huanzo.



Figura 21. Plano de subcuencas de la cuenca de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).

3. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS Y EL MODELO DE GESTIÓN

En este apartado explicaremos la metodología empleada para la realización del modelo hidrológico y del modelo de gestión. Se describirán las herramientas informáticas empleadas, así como el método seleccionado y el modo de calibrar los modelos.

3.1. HERRAMIENTAS EMPLEADAS

Para la realización de la evaluación de los recursos hídricos de la cuenca se ha empleado el software AQUATOOL +, un entorno de trabajo que proporciona acceso directo a otros programas específicos, todo el conjunto permite el desarrollo y análisis de sistemas de ayuda a la decisión en planificación y gestión de recursos hídricos (Andreu, 2015).

Para el desarrollo del presente trabajo se han empleado los siguientes programas o módulos de AQUATOOL +:

- **EvalHid**, programa de **EVAL**uación de los recursos **HÍDR**icos, que permite desarrollar un modelo precipitación-escorrentía en las cuencas de estudio.
- **SimGes**, para la **SIM**ulación de la **GEST**ión de cuencas incluyendo utilización conjunta.

3.1.1. MÓDULO EVALHID

El módulo de EvalHid permite el desarrollo de Modelos Precipitación-Escorrentía en cuencas complejas y con el objetivo de evaluar la cantidad de recurso hídrico que producen las mismas (Andreu, 2017).

Este programa tiene integrado distintos tipos de modelos que tratan de reproducir el ciclo hidrológico: modelo de Témez, modelo HBV, modelo Sacramento, modelo GR4J, modelo GR2M y modelo AWBM; además de estos modelos incluye dos modelos para el caso de precipitaciones en forma de nieve, en los que es necesario modelar el proceso de fusión previo a la transformación en escorrentía: modelo nieve N-1 y modelo nieve N-2.

Todos estos modelos pertenecen al grupo de modelos denominados modelos agregados de simulación de cuencas, los cuales simulan el ciclo hidrológico mediante balances de humedad entre los distintos procesos que tienen lugar a lo largo de todo el ciclo (ESTRELA, 1992).

El funcionamiento del programa viene resumido en la Figura 22; en ella se puede comprobar que los datos de partida necesarios para el modelo son las series de precipitación, ETP, temperatura y la superficie de cada una de las subcuencas. Los datos de temperatura sólo son necesario introducirlos si se selecciona un modelo de nieve.

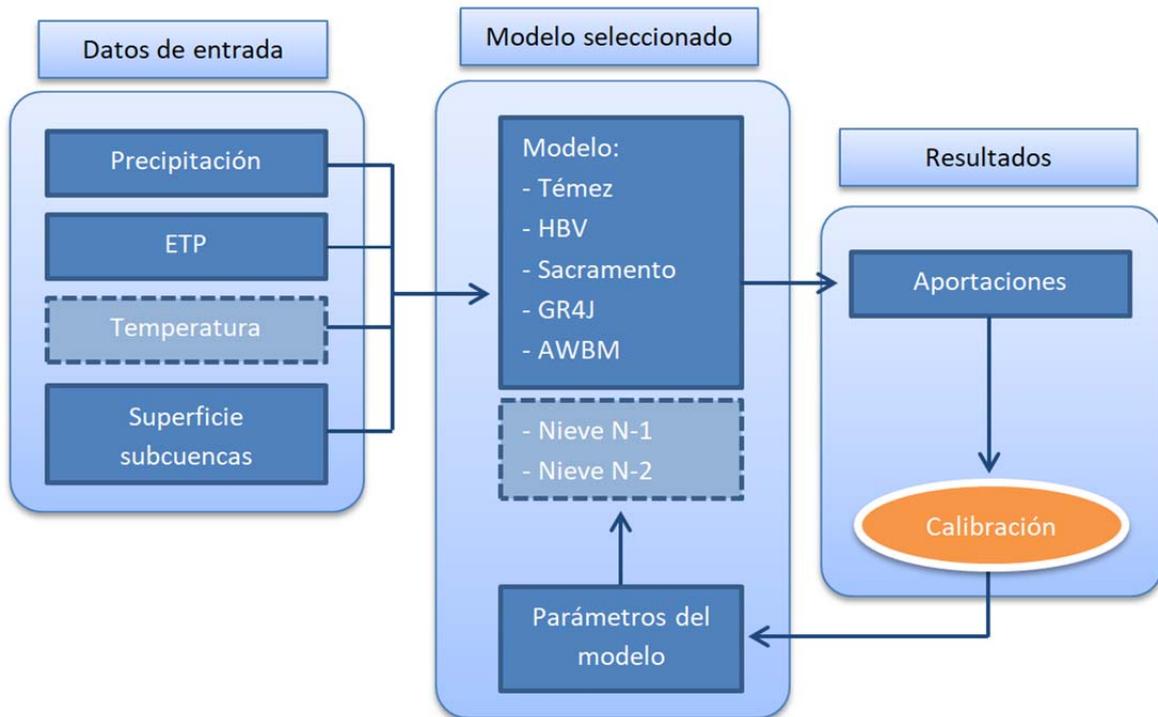


Figura 22. Esquema del módulo EvalHid. (Fuente: Elaboración propia).

Una vez se han aportado los datos de entrada del modelo, podemos seleccionar el tipo de modelo en cuestión que tendrá cada una de las subcuencas (pudiendo ser diferentes entre sí), debiendo seleccionar por un lado el modelo lluvia-escorrentía y sólo en los casos que sean necesarios un modelo de nieve.

Posteriormente, es necesario introducir los parámetros del modelo para cada una de las subcuencas. Para ello, se debe tratar de realizar una adecuada estimación inicial de dichos parámetros en base a la realidad física, es por ello que es necesario tener ciertos conocimientos previos de la hidrogeología de la zona.

Creado el modelo de la cuenca, se obtienen los resultados del modelo como las aportaciones de la cuenca en los distintos puntos de desagüe del modelo, es decir, en los distintos puntos donde se quiere conocer la escorrentía existente.

Esta escorrentía se puede comparar con los datos de caudales registrados a lo largo de toda la cuenca, de forma que podamos comprobar como de acertados han sido los parámetros estimados inicialmente. Conociendo estos resultados y el significado hidrogeológico de cada uno de los parámetros del modelo, podemos

reestimar los parámetros del modelo en un proceso iterativo de “calibración” del modelo, en el que trataremos de averiguar con cierta exactitud qué valores deben tener los distintos parámetros para que los resultados de aportaciones obtenidos en el modelo sean semejantes a los caudales medidos realmente.

En nuestro caso se ha decidido emplear el modelo de Témez en todas las subcuencas y el modelo nieve N-2 en la subcuenca 20.01 “Nevado Arma-Chichas”, la única subcuenca con temperaturas lo suficientemente bajas para dar lugar a precipitaciones en forma de nieve.

El modelo de Témez (Témez, 1977) es un modelo sencillo que requiere de pocos parámetros y que reproduce el ciclo hidrológico de una forma simplificada. Su sencillez lo hace ideal para cuencas donde no existe suficiente información, pues al introducir un mayor número de parámetros que no somos capaces de caracterizar correctamente se aumenta la incertidumbre del modelo, además la subdivisión de la cuenca en subcuencas más pequeñas permite una aplicación correcta del modelo de Témez. En cuanto al modelo de nieve, en primer lugar se han probado ambos modelos y finalmente se ha escogido el modelo nieve N-2 por arrojar mejores resultados.

3.1.2. MÓDULO DE SIMGES

El modelo SIMGES es un modelo general para la Simulación de la Gestión de Cuencas, o sistemas de recursos hidráulicos complejos, en los que se dispone de elementos de regulación o almacenamiento tanto superficiales como subterráneos, de captación, de transporte, de utilización y/o consumo, y de dispositivos de recarga artificial (Andreu).

Se trata por tanto de un programa que permite la implementación de los distintos elementos existentes relevantes en las tareas de gestión de cuencas, con la posibilidad de obtener como resultados del modelo, la evolución de cada una de las variables de interés en cada elemento así como comprobar las garantías de abastecimiento de los distintos usos del agua, o la implementación de reglas de operación en el sistema, y comprobación de los distintos resultados obtenidos en distintos escenarios futuros.

Todos los elementos del modelo deben introducirse formando un esquema, de modo que dichos elementos estén combinados adecuadamente para generar un modelo representativo de la cuenca. En el caso del modelo de la cuenca de Ocoña, se han empleado los siguientes elementos:

- Embalses. Son puntos donde existe cierta capacidad de almacenamiento de agua de forma superficial. El cálculo de su volumen se realiza con un balance de aguas (el volumen de agua en el embalse será al volumen del mes anterior más las entradas de agua menos las salidas). Además, se puede calcular las pérdidas

por filtración y por evaporación, y permite fijar volúmenes de gestión en los mismos: volumen objetivo, volumen mínimo, volumen máximo.

- Ecuación de balance de los embalses, para el cálculo del volumen (V_f):

$$V_f = V_i + A_e + A_a - P_f - E - S_c - S_v$$

Siendo:

V_i , volumen al inicio

A_e , aportaciones directas al embalse

A_a , aportaciones aguas arriba del embalse

P_f , pérdidas por filtración

E , pérdidas por evaporación

S_c , sueltas controladas (incluidas las tomas del embalse)

S_v , vertidos no controlados producidos al superarse la capacidad máxima del embalse

- Las pérdidas por filtración se calculan con la siguiente ecuación:

$$P_f = a + \frac{b}{(c + 1) \cdot (V_f - V_i)} \cdot (V_f^{c+1} - V_i^{c+1})$$

que es la ecuación que resulta de integrar la ley de pérdidas:

$$P = a + b \cdot V^c$$

Debiendo ser los parámetros a , b y c conocidos previamente.

- Las pérdidas por evaporación se calculan a partir de las superficies (en H_a) de la lámina libre del embalse al inicio y final del mes, y del valor de la evaporación (en mm):

$$E = \frac{S_f + S_i}{2} \cdot e \cdot 10^{-5}$$

- Aportaciones. Son los puntos de entrada de datos de las aportaciones de cada subcuenca (o embalse). Estos datos se obtienen del modelo hidrológico, una vez calibrado; la escorrentía generada en cada subcuenca será una aportación en el modelo de gestión.
- Conducciones. Elementos de conexión entre los otros elementos, cuyo objetivo fundamental es traspasar agua de un punto a otro: ríos, canales, etc. Existen varios tipos de conducciones en función de que se quieran introducir pérdidas,

conexión río-acuífero, etc. También se pueden fijar caudales máximos y mínimos (que pueden ser determinados por limitaciones físicas o para respetar los caudales ecológicos).

- Demandas consuntivas. Elementos de demanda que consumen agua, de forma que el agua consumida se pierde del sistema. Se pueden definir curvas de demanda, parámetros de consumo, tomas y su conexión a otros elementos.
- Elementos de retorno. Define donde se producen los puntos de reintegro de agua al sistema tras pasar por las demandas consuntivas.
- Demandas no consuntivas. Son elementos que emplean agua pero no la consumen. Es un elemento pensado principalmente para centrales hidroeléctricas, permitiendo introducir un caudal máximo, caudales objetivos mensuales y número de prioridad. Además, en los resultados se puede comprobar la energía producida cada mes, calculada con la siguiente ecuación:

$$E = H_m \cdot \mu \cdot V_T$$

Siendo H_m , el salto bruto medio:

$$H_m = \frac{H(V_{i-1}) + H(V_i)}{2} - H_c$$

dónde:

$H(V_i)$, es la cota del embalse para el volumen V_i

μ , es el coeficiente global de eficiencia ($\text{Gw}\cdot\text{h}/\text{Hm}^3\cdot\text{m}$)

V_T , volumen total de agua turbinada

H_c , cota a descontar para el cálculo de producción hidroeléctrica

- Bombeos. Elementos de captación de agua procedente de acuíferos.
- Acuíferos. En nuestro caso, los dos acuíferos definidos se consideran como acuíferos potenciales con una extracción puntual singular que no tiene significancia en el funcionamiento de la cuenca, es decir, simplemente cumplen la función abastecer a los bombeos de los dos existentes. Como se comentó en el apartado 2.6.5. no se ha modelado ningún acuífero como tal, al no disponer de datos suficientes sobre el terreno.

Los datos de entrada de éste módulo son las aportaciones obtenidas en el módulo de EvalHid, los parámetros necesarios para estimar adecuadamente las pérdidas, evaporaciones, etc., el propio esquema del sistema y valores de demandas, retornos, etc. Por tanto, no es un modelo que haya que calibrar, pues normalmente la información necesaria para su construcción es conocida.

3.2. MODELOS HIDROLÓGICOS EMPLEADOS

3.2.1. MODELO NIEVE N-2

El modelo de nieve N-2 coincide con el modelo de nieve considerado en el programa Routing System II desarrollado por el EPFL de la universidad de Laussane (Andreu, 2017).

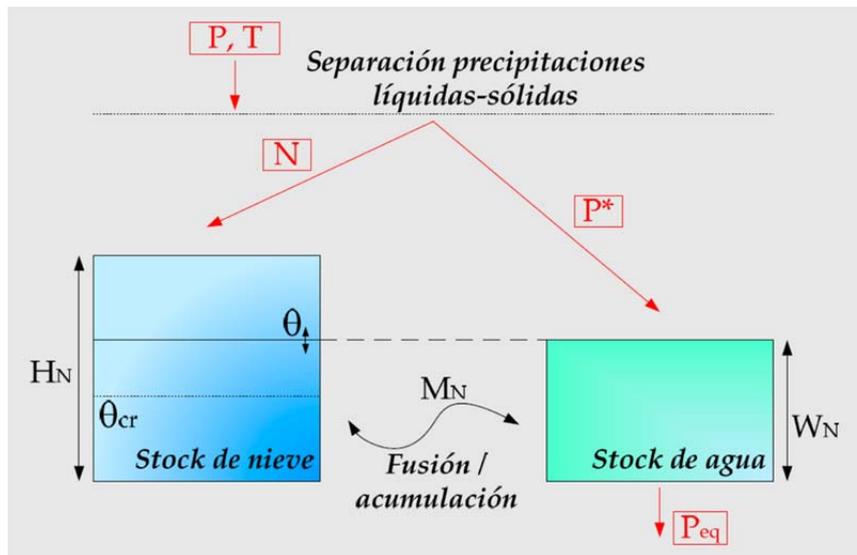


Figura 23. Esquema del modelo de nieve. (Fuente: Routing System II – Modelización de flujos en sistemas hidráulicos, LCH N°32)

Este modelo de nieve tiene como entradas los datos de precipitación (P) y temperatura (T), y arroja el resultado de precipitación equivalente (P_{eq}) que es el parámetro empleado para el modelo de precipitación-escorrentía posterior (en nuestro caso, el modelo de Témez).

Para ello, en primer lugar en función de la temperatura ambiental se obtiene la precipitación líquida (P*) y la precipitación sólida (N), en función de dos parámetros: temperatura crítica máxima para que se produzca precipitación sólida (T_{cp1}) y temperatura crítica mínima para que se produzca precipitación líquida (T_{cp2}), es decir, si la temperatura es inferior a T_{cp1} (normalmente valor de 0°C) sólo se producirá nieve y si es superior a T_{cp2} (normalmente se adopta como valor 4°C) sólo se producirá lluvia, y si está en un valor intermedio se producirá una parte líquida y una parte sólida de forma proporcional al valor de la temperatura:

$$P^* = \alpha \cdot P$$

$$N = (1 - \alpha) \cdot P$$

$$\alpha = 0 \quad \text{si } T < T_{cp1}$$

$$\alpha = \frac{T - T_{cp1}}{T_{cp2} - T_{cp1}} \quad \text{si } T_{cp1} < T < T_{cp2}$$

$$\alpha = 1 \quad \text{si } T > T_{cp2}$$

Posteriormente, se calcula el contenido de nieve sólida en el suelo en el instante actual (H_N), para ello es necesario conocer el parámetro M_N , que fija el cambio de estado agua-nieve, en función si su valor es mayor que 0 (fusión) o si es menor que 0 (congelación):

$$H_{Nt} = H_{Nt-1} + N - M_N$$

El parámetro M_N a su vez depende de otros tres parámetros: la temperatura crítica de fusión de nieve (T_{cr} , habitualmente 0°C), el coeficiente de fusión de la precipitación (b_p , que suele tomar un valor de 0.0125) y un coeficiente que regula la fusión de nieve (A_n , este es el parámetro que realmente es necesario calibrar con valores recomendados entre 0.5-20 mm/°C/día). Su cálculo se realiza con las siguientes ecuaciones:

- Si la temperatura es superior a la crítica la nieve se fundirá, teniendo como límite la nieve existente en el instante actual:

$$M_N = A_n \cdot (1 + b_p \cdot P^*) \cdot (T - T_{cr}) \quad \text{si } T > T_{cr}$$

$$\text{siendo } M_N \leq N + H_N$$

- Si la temperatura es inferior a la crítica el agua se congelará, teniendo como límite el stock de agua actual (W_N):

$$M_N = A_n \cdot (T - T_{cr}) \quad \text{si } T \leq T_{cr}$$

$$\text{siendo } -W_N \leq M_N \leq 0$$

Para conocer la cantidad de agua existente (W_N) además de los parámetros anteriores habrá que tener en cuenta la parte de precipitación que pasa al modelo precipitación-escorrentía (P_{eq}):

$$W_{Nt} = W_{Nt-1} + P^* + M_N - P_{eq}$$

Este valor de precipitación equivalente se obtiene a partir de las siguientes ecuaciones:

- Si no queda nieve en stock:

$$P_{eq} = P^* + W_N \quad \text{si } H_N = 0$$

- Si queda nieve, es necesario conocer la relación agua/nieve existente en la subcuenca (θ), y el parámetro de contenido crítico de agua en la nieve (θ_{cr} , habitualmente 0.1), es decir un parámetro que define a partir

de qué relación agua/nieve en stock se considera que se puede generar flujo de agua:

$$\theta = W_N/H_N$$

$$P_{eq} = 0 \quad \text{si } \theta \leq \theta_{cr}$$

$$P_{eq} = (\theta - \theta_{cr}) \cdot H_N \quad \text{si } \theta > \theta_{cr}$$

En resumen:

- El principal parámetro de calibración es A_n
- Las condiciones iniciales de contenido de nieve (H_{N0}) y contenido relativo agua-hielo (θ_0), estos parámetros tienen poca importancia conforme transcurre el tiempo (periodo de calentamiento), por lo que sólo resultan significativos en los años iniciales de la serie.
- Para el resto de parámetros del modelo se suele mantener los valores recomendados:

Parámetro	Descripción	Valores recomendados	Unidades
A_n	Coeficiente que regula la velocidad de fusión de nieve	0.5 a 20	Mm7 ^o C/día
θ_{cr}	Humedad crítica	0.1	
b_p	Coeficiente de licuado de la precipitación de nieve	0.0125	mm ⁻¹
T_{cp1}	Temperatura máxima para precipitación en forma de nieve	0	°C
T_{cp2}	Temperatura mínima para precipitación en forma de agua	4	°C
T_{cr}	Temperatura umbral para cambio de estado agua-nieve. Este parámetro debería quedar comprendido entre los dos anteriores	0	°C

Tabla 8. Valores recomendados para los parámetros del modelo Nieve N-2. (Fuente: manual EvalHid).

3.2.2. MODELO DE PRECIPITACIÓN –ESCORRENTÍA DE TÉMEZ

El modelo de Témez consiste en la aplicación de balances de humedad en los distintos procesos de transporte del agua durante el ciclo hidrológico. De forma que en cada uno de estos procesos se realiza un balance de masas y se fijan leyes de transferencia entre los distintos términos del balance (Andreu, 2017).

El modelo divide el terreno en dos zonas: una superior que recibe la precipitación y que tiene capacidad para retener el agua como humedad del suelo, y donde además, se produce la evapotranspiración y la escorrentía superficial; y una zona inferior que recibe el agua infiltrada de la zona superior, donde se producirá la escorrentía subterránea y se puede almacenar el agua.

Este funcionamiento del modelo se puede comprobar en la siguiente figura:

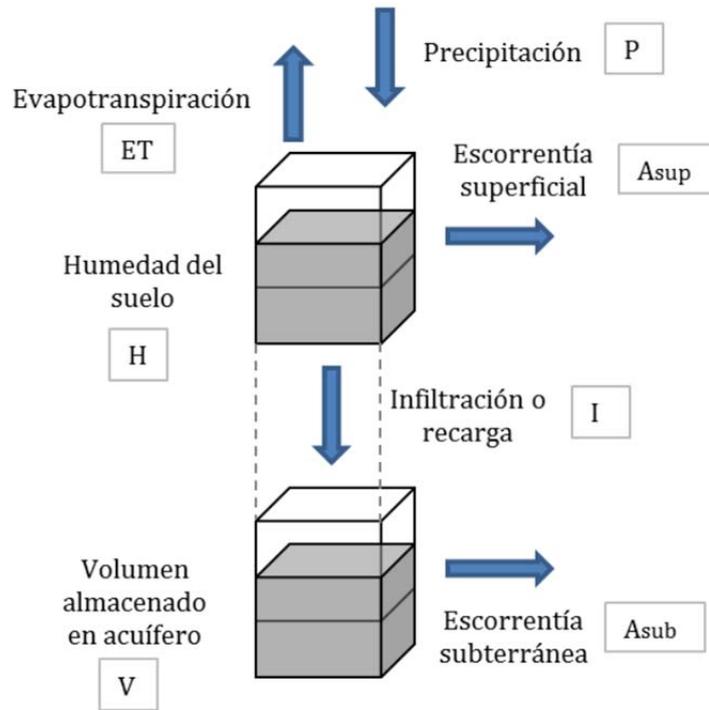


Figura 24. Esquema de flujos y almacenamientos del modelo de Témz. Fuente: (Andreu, 2017)

El dato de entrada del modelo es la precipitación (P), o en su caso, la precipitación equivalente del modelo de nieve. Ésta precipitación se almacena en la parte superior del suelo en forma de humedad (H) y se evapotranspira (ET), al resto de agua sobrante se le llama excedente (T) y parte se transforma en escorrentía superficial (o aportación superficial, A_{sup}) y parte se infiltra a la zona de suelo inferior.

Por tanto, en primer lugar es necesario conocer el umbral de excedencia (P_0):

$$P_0 = C \cdot (H_{max} - H_{t-1})$$

De forma que si la precipitación (P) es superior a dicho umbral habrá un excedente (T) y sino no:

$$T_t = 0 \quad \text{si } P_t \leq P_0$$

$$T_t = \frac{(P_t - P_0)^2}{P_t - \delta_t - 2 \cdot P_0} \quad \text{si } P_t > P_0$$

Siendo:

- δ , las pérdidas y se calcula como:

$$\delta = H_{max} - H_{t-1} + ETP_t$$

- H_{max} , la humedad máxima que puede almacenar el suelo. Es un factor que depende de las características del suelo y de la vegetación existente.
- C , el coeficiente de inicio de excedencia. Se trata de un factor adimensional que toma valores en torno a 0.3 (Témez, 1977)
- ETP_t , evapotranspiración potencial en el intervalo de tiempo t . Es la máxima evapotranspiración que se puede dar, siempre y cuando haya suficiente humedad.

Una vez conocido el valor de excedente (T), la parte que no excede pasa a almacenarse en el suelo en forma de humedad (H) o se evapotranspira (ET):

$$H_t = \max \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ H_{t-1} + P_t - T_t - ETP_t \end{array} \right.$$

$$ET_t = \min \left\{ \begin{array}{l} ETP_t \\ H_{t-1} + P_t - T_t \end{array} \right.$$

Es decir, la parte que no excede ($P-T$), se evapotranspirará hasta alcanzar el máximo (ETP), y en caso de alcanzar dicho valor, el resto de agua se almacenará en forma de humedad (H).

Como se ha comentado anteriormente, la parte que excede (T) se transforma en aportación superficial (A_{sup}) o se infiltra (I) al nivel inferior del suelo:

$$I_t = I_{max} \cdot \frac{T_t}{T_t + I_{max}}$$

$$A_{sup,t} = T_t - I_t$$

La infiltración depende de la infiltración máxima (I_{max}), que es un parámetro del modelo que varían en función de la hidrogeología del terreno y de la concentración de las precipitaciones (Témez, 1977), y determina cuanta infiltración puede llegar a producirse en un intervalo de tiempo t . Mientras que, la parte que no se infiltra, se convierte en aportación superficial.

La parte infiltrada (I), en caso de existir acuífero, será la recarga del mismo, y por tanto será necesario conocer el proceso de entradas y salidas de flujo del mismo así como su volumen en cada instante; por el contrario, en caso de no existir ningún tipo de almacenamiento subterráneo toda la infiltración se transformará en aportación subterránea (A_{sub}):

$$V_t = V_{t-1} \cdot e^{-\alpha \cdot \Delta t} + \frac{S \cdot I_t}{\alpha} \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot \Delta t})$$

$$A_{sub,t} = V_{t-1} - V_t + I_t \cdot S$$

Como podemos comprobar, el volumen del acuífero está muy relacionado con el parámetro α , que representa la velocidad de descarga del acuífero, regulando así el drenaje subterráneo. En estas ecuaciones también aparece la superficie de la cuenca (S).

En resumen, podemos comprobar que existen 4 parámetros que deben conocerse y que dependen de las condiciones hidrogeológicas de la cuenca: C, H_{max} , I_{max} y α . Los umbrales de estos parámetros son los siguientes:

- C, el coeficiente de inicio de excedencia. Toma valores en torno a 0.3 (Témez, 1977) aunque puede llegar a valores entre 0.2 y 1 (Andreu, 2017).
- H_{max} (mm), la humedad máxima que puede almacenar el suelo. Entre 50 y 250 mm (Andreu, 2017).
- I_{max} (mm), la infiltración máxima. Toma valores entre 10 y 150 mm (Andreu, 2017), 100 y 400 mm (Témez, 1977), y adopta los siguientes valores según Murillo J. M. (2011): 100 mm para suelos poco permeables, 300 mm para acuíferos mayoritariamente detríticos de permeabilidad alta, 450 mm para acuíferos detríticos de permeabilidad muy alta y kársticos de permeabilidad alta y 500 mm para acuíferos kársticos de permeabilidad muy alta.
- α , la velocidad de descarga del acuífero. Toma valores entre 0.001 y 0.9 mes^{-1} .

Además, los parámetros de I_{max} y H_{max} fueron aproximados (Estrela, 1999), teniendo en cuenta la calibración del modelo SIMPA (que emplea la misma base teórica que el modelo de Témez) en España:

Uso del suelo	H_{\max} (mm)
Superficies artificiales	40
Espacios con poca vegetación	100
Tierras de labor en secano	155
Tierras de labor en regadío	215
Praderas y pastizales naturales	150
Sistemas agrícolas heterogéneos	195
Cultivos permanentes	210
Vegetación arbustiva	135
Bosque mixto	220
Bosques de frondosas y coníferas	230
Zonas húmedas, superficies de agua y artificiales	300

Figura 25. Valores aproximados de H_{\max} según usos del suelo (Fuente: Estrela, 1999)

Litología	I_{\max} (mm)
Material aluvial de origen indiferenciado	400
Calizas y dolomías	1000
Margas	85
Margas yesíferas	75
Yesos	64
Materiales arenosos	450
Materiales gravo-arenosos	500
Calcarenitas (macigno)	250
Arcosas	150
Rañas	95
Granitos	65
Rocas metamórficas	20
Gneiss	55
Pizarras	40
Rocas volcánicas	275

Figura 26. Valores aproximados de I_{\max} según la litología del terreno (Fuente: Estrela, 1999)

También se debe tener en cuenta las condiciones iniciales de humedad (H_0) y volumen en el acuífero (V_0), estos parámetros tienen poca importancia conforme transcurre el tiempo (periodo de calentamiento), por lo que sólo resultan significativos en los años iniciales de la serie.

3.3. CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO

Como se ha comentado anteriormente, la calibración del modelo consiste en la corrección de los parámetros del modelo de los que se parte, comprobando que las aportaciones obtenidas coinciden con la serie de caudales medida

En un proceso iterativo en el que se trata de obtener los parámetros adecuados del modelo de forma que las aportaciones obtenidas mediante la modelización coincidan con los caudales registrados en la serie histórica.

Es necesario comentar que el modelo representará mejor la realidad cuanto mayor número de puntos de calibración se pueda disponer, esto es, tener un mayor número de puntos de control en el que se puedan comprobar que los caudales reales (los medidos) coinciden con los obtenidos en el modelo.

En nuestro caso tan sólo se disponen de dos puntos de calibración, correspondientes a las siguientes estaciones hidrométricas:

- Estación Hidrométrica de Salamanca. Código: 204501. Coordenadas: Longitud 72° 50' 32", Latitud 15° 30' 33". Situada a una altura de 3153 msnm, se sitúa en el río Chichas y recoge las aguas de las subcuencas: SC-20.01, SC-20.02 y SC-21.
- Estación Hidrométrica de Ocoña. Código: 204504. Coordenadas: Longitud 73° 06' 01", Latitud 16° 26' 01". Situada a una altura de 270 msnm, se sitúa en la desembocadura del río Ocoña, recogiendo las aguas de la totalidad de la cuenca.

Por tanto, para la calibración del modelo hidrológico en primer lugar se calibrarán las subcuencas SC-20.01, SC-20.02 y SC-21, con los datos de la EH de Salamanca, y en segundo lugar, se calibrarán el resto de subcuencas con los datos de la EH de Ocoña.



Figura 27. Ubicación de las estaciones hidrométricas. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).

Los datos de la serie histórica de caudales registrados en ambas estaciones hidrométricas se encuentran en régimen alterado, es decir, son los caudales resultantes tras ser abastecidos las distintas demandas existentes aguas arriba; por tanto es necesario previamente naturalizar dichas series.

Para ello, habría que sumar a los caudales medidos en las estaciones los consumos de agua que ha habido aguas arriba, así como restar los retornos de las distintas actividades. Como no se disponen datos de consumos reales, se emplearán los datos de demandas estimados.

Por otro lado, en las últimas versiones de AQUATOOL+ se ha introducido una nueva característica que nos permite en la propia interfaz de AQUATOOL + los módulos de EvalHid y SimGes. En versiones anteriores, el módulo de EvalHid era completamente independiente y las aportaciones se introducción en el SimGes como datos, actualmente el modelo hidrológico se puede realizar desde la misma interfaz que SIMGES, permitiendo realizar la calibración del modelo hidrológico sin necesidad de naturalizar la serie de caudales, pues en las aportaciones que se obtienen al correr el modelo ya se habrán tenido en cuenta las demandas existentes.

En nuestro caso, se han realizado ambas tareas: en primer lugar, se naturalizó la serie de caudales y se calibró el modelo hidrológico, y posteriormente se introdujeron los datos en el módulo SimGes (interfaz AQUATOOL +). Y en segundo

lugar, se realizó una comprobación de la calibración del modelo hidrológico directamente en la interfaz AQUATOOL +, de forma que podremos comprobar que la calibración y la naturalización de los caudales se realizó correctamente.

Para realizar la calibración no se tomará el periodo completo disponible de caudales, sino que se empleará el periodo 2004-2013 para la EH de Salamanca y el periodo 2003-2013 para la EH de Ocoña, esta decisión se toma teniendo en cuenta que en estos periodos la calidad de los aforos es mejor (según la propia ANA). Así mismo, para el proceso de validación se empleará el periodo 1979-1996 para la EH Salamanca y el periodo 1986-2002 para la EH de Ocoña, tal y como lo hizo la ANA con su modelo en WEAP, con el objetivo de facilitar posteriormente los resultados de ambos modelos:



Figura 28. Periodos de calibración y validación de la EH de Salamanca. (Fuente: Elaboración propia).

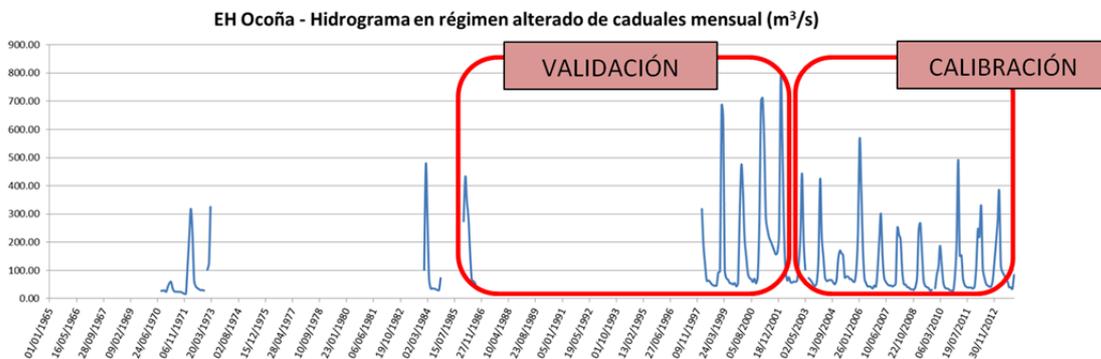


Figura 29. Periodos de calibración y validación de la EH de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).

Para facilitar el proceso de calibración es aconsejable seguir un procedimiento ordenado que nos permita acercarnos a soluciones mejores en cada iteración, además, las comprobaciones deben ser relativamente sencillas.

En este caso, seguiremos el siguiente procedimiento (UPV, 2015):

1. Ajustar los parámetros H_{max} y C , mediante el gráfico de la serie anual de aportaciones, y comprobando el valor de aportación anual media, es decir, la cantidad de agua total que se produce. Para ello, calculamos la diferencia entre

el valor obtenido mediante el modelo y el aforado, siendo nuestro objetivo alcanzar una diferencia cercana a cero.

2. Ajustar la variación temporal de las aportaciones mediante los parámetros I_{max} y α , el gráfico de aportación media mensual nos servirá de referencia, y con ello podremos obtener las condiciones iniciales de almacenamiento.
3. Mejora del ajuste del modelo, fijándonos en la serie mensual de aportaciones, y en dos criterios de bondad de ajuste: el índice BIAS y el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe.

El índice PBIAS mide la tendencia promedio del modelo a sobreestimar o subestimar los caudales observados, cuantifica el error sistemático del mismo. Siendo los valores cercanos a cero los más óptimos:

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (\Phi_{i \text{ observado}} - \Phi_{i \text{ simulado}})}{\sum_{i=1}^N (\Phi_{i \text{ observado}})} \cdot 100$$

La calidad del ajuste del PBIAS se considerará con el siguiente criterio (Moriasi, 2007):

PBIAS	Ajuste
<10%	Muy bueno
10%-15%	Bueno
15%-25%	Satisfactorio
>25%	Insuficiente

Tabla 9. Calidad del ajuste según el valor del índice PBIAS.

El coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe es un criterio habitual en hidrología que mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación.

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

En este caso la calidad de las simulaciones es perfecta cuando su valor es igual a 1, y empeora conforme el coeficiente es más bajo (Molnar, 2011):

E	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2-0.4	Satisfactorio
0.4-0.6	Bueno
0.6-0.8	Muy bueno
>0.8	Excelente

Tabla 10. Calidad del ajuste según el valor de la eficiencia de Nash-Sutcliffe.

Durante la calibración, para simplificar durante el proceso de calibración se ha optado por modificar los parámetros en todas las subcuencas de forma uniforme y

proporcionalmente a los valores iniciales de los parámetros, dado al gran número de subcuencas (32) y al escaso número de puntos de calibración (2).

3.4. CAUDALES ECOLÓGICOS

Según la Ley de Recursos Hídricos de Perú de 2009 (Ley N° 29.338) y el Reglamento que lo desarrolla (DS 001-2010-AG), es necesario determinar los tramos de río en los que sean necesarios fijar un caudal ecológico mínimo que asegure una adecuada sostenibilidad del recurso hídrico y calidad ambiental.

En julio de 2012 la ANA realizó un informe en el que se fijaron los criterios técnicos para la determinación de los caudales ecológicos, basándose en el Método Hidrológico:

- Para cursos con caudales medios anuales menores o iguales a 20 m³/s, el caudal ecológico será como mínimo el 10% del caudal medio mensual para la época de avenida, y del 15% para la época de estiaje.
- Para cursos con caudales medios anuales comprendidos entre los 20 y 50 m³/s, el caudal ecológico será como mínimo el 10% del caudal medio mensual para la época de avenida, y del 12% para la época de estiaje.
- Para cursos con caudales medios anuales mayores a 50 m³/s, el caudal ecológico será como mínimo el 10% del caudal medio mensual.

Caudal medio anual del curso de agua	Época de avenida	Época de estiaje
Menor o igual a 20 m ³ /s	10 % Q _{medio mensual}	15 % Q _{medio mensual}
Entre 20 y 50 m ³ /s	10 % Q _{medio mensual}	12 % Q _{medio mensual}
Mayor a 50 m ³ /s	10 % Q _{medio mensual}	

Tabla 11. Criterio de cálculo de caudales ecológicos. (Fuente: Elaboración propia).

En el caso, de la cuenca de Ocoña, en el modelo de gestión realizado por la ANA se determinó un único tramo en el que fuera necesario fijar un caudal ecológico mínimo, correspondiente al tramo aguas abajo de la central hidroeléctrica de Chococo.

3.5. CRITERIOS DE GARANTÍA

Los criterios de garantía empleados en el presente trabajo para la evaluación de los recursos hídricos en el modelo de gestión, corresponden con los que empleó la ANA en el proyecto desarrollado anteriormente, con el objetivo de poder comparar posteriormente los resultados del modelo desarrollado en el presente proyecto con el desarrollado por la ANA mediante el software WEAP.

Estos criterios de garantía servirán por un lado para definir el criterio de fallo al abastecer las demandas del sistema en el periodo de un mes o año determinado, así

como delimitar los umbrales para los que puede considerarse que a lo largo de la serie las demandas de un sistema, éstas han sido abastecidas correctamente o no.

- Criterios de garantía en demandas agrícolas

Se tienen en cuenta dos criterios: la garantía anual y la garantía mensual:

- Garantía anual, es el porcentaje de años sin fallos respecto el número total de años simulados. Se considera que en un año se produce fallo si el déficit de ese año es superior al 20% de la demanda anual. La garantía anual de un sistema se considera aceptable si es superior al 75%.
- Garantía mensual, es el porcentaje de meses sin fallos respecto el número total de meses simulados (sólo se consideran meses no demanda no nula). Se considera que en un mes se produce fallo si el déficit de ese mes es superior al 20% de la demanda mensual. La garantía mensual de un sistema se considera aceptable si es superior al 90%.
- Criterios de garantía en demandas poblacionales, industriales, mineras, energéticas y recreativas. En este caso, sólo hay un criterio mensual, en el que se considera que en un mes se produce fallo si el déficit de ese mes es superior al 10% de la demanda mensual. La garantía mensual de un sistema sólo se considera aceptable si alcanza el 100%.
- Criterios de garantía volumétrica. Además de los criterios anteriores, se tiene en cuenta otro criterio de garantía basado en el volumen abastecido: volumen servido/volumen demandado. En demandas agrícolas se exige un 90%, mientras que en el resto de demandas un 95%.

	Garantía anual			Garantía mensual			Garantía volumétrica	
	Definición	Criterio de fallo	Aceptabilidad	Definición	Criterio de fallo	Aceptabilidad	Definición	Aceptabilidad
Demandas agrícolas	Años con fallo/años simulados %	Déficit anual > 20% demanda anual	Garantía > 75%	Meses con fallo/meses simulados % (demanda ≠ 0)	Déficit mensual > 20% demanda mensual	Garantía > 90%	Volumen servido/Volumen demandado %	Garantía > 90%
Demandas poblacionales, mineras, etc.	---	---	---		Déficit mensual > 10% demanda mensual	Garantía = 100%		Garantía > 95%

Tabla 12. Resumen de criterios de garantía o confiabilidad. (Fuente: Elaboración propia).

4. MODELO HIDROLÓGICO

En este apartado se comentarán los aspectos fundamentales del modelo hidrológico realizado; como se ha comentado en el capítulo anterior, dicho modelo realiza la transformación precipitación-escorrentía mediante el software EvalHid, empleando el modelo de Témez y el modelo de Nieve N-2.

En primer lugar se realizará una descripción de la información de partida necesaria para la realización del modelo, posteriormente se comentará la calibración realizada, así como los resultados obtenidos del modelo. Finalmente se compararán los resultados de nuestro modelo con los obtenidos por la ANA mediante el software WEAP.

4.1. INFORMACIÓN PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO

Para la elaboración del modelo hidrológico se parte por un lado por información hidrometeorológica de la cuenca: datos de precipitación, evapotranspiración potencial (ETP), temperatura, velocidad de viento, y caudales aforados y naturalizados de las estaciones hidrométricas; y por otro lado información geológica y de cobertura vegetal mostrada anteriormente en el capítulo 2: Descripción general de la cuenca.

4.1.1. INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA DE LA CUENCA

La información hidrológica de la cuenca ha sido facilitada ANA (Autoridad Nacional del Agua del Perú); dicha información consiste en las series mensuales medias hidrológicas de precipitación, evapotranspiración potencial (ETP), temperatura media y velocidad del viento, para cada una de las subcuencas definidas en el apartado de “Ríos principales y fuentes de agua//Subcuencas”, y con periodo de datos que comienza en enero de 1965 y finalizan en diciembre de 2013, y en las dos series de caudales en régimen alterado procedente de las estaciones hidrométricas existentes en la cuenca.

Estos datos originalmente provenían de un total de 19 estaciones meteorológicas, 11 de ellas dentro de la cuenca de Ocoña y 8 en las inmediaciones a la cuenca, que han servido para mejorar la interpretación y estimación de los datos. Dado que en muchos de los casos la información existente estaba incompleta, la ANA realizó un análisis de consistencia y un relleno de series en aquellos meses y años en los que no existieran datos completos (hasta un 20%). Finalmente, se realizó una interpolación lineal de las series mensuales obtenidas en las estaciones para obtener los valores en cada una de las subcuencas.

Dado que el modelo elegido para realizar el presente proyecto es el modelo de Témez, no ha sido necesario emplear los datos de velocidad de viento. Estos datos si

sirvieron en el caso del modelo realizado por la ANA mediante el software WEAP (Water Evaluation And Planning System), éste modelo se basó en el Rainfall Runoff Method que requiere de un mayor detalle de parámetros del suelo y una mayor caracterización de las condiciones meteorológicas.

Los datos de precipitación, ETP, temperatura media mensual y caudales a lo largo de toda la serie puede ser consultada, en el “Anexo 1. Información necesaria para la construcción de los modelos hidrológico y de gestión”. A continuación, se realiza un resumen y análisis de estos datos:

4.1.1.1. PRECIPITACIÓN

Tal como se observa en la Figura 30, la serie es suficientemente amplia como para llegar a identificar grupos de años secos y grupos de años húmedos, que van alternándose por ciclos. También podemos comprobar que en los años más húmedos en la cuenca se llegan a alcanzar una precipitación en la cuenca de hasta 900 mm de media, mientras que en los años más secos no alcanzan los 100 mm. Esta gran variabilidad nos muestra que en la cuenca es necesario realizar una gestión adecuada de los recursos, así como la necesidad de disponer infraestructuras suficientes para conseguir una buena explotación del agua a lo largo del tiempo.

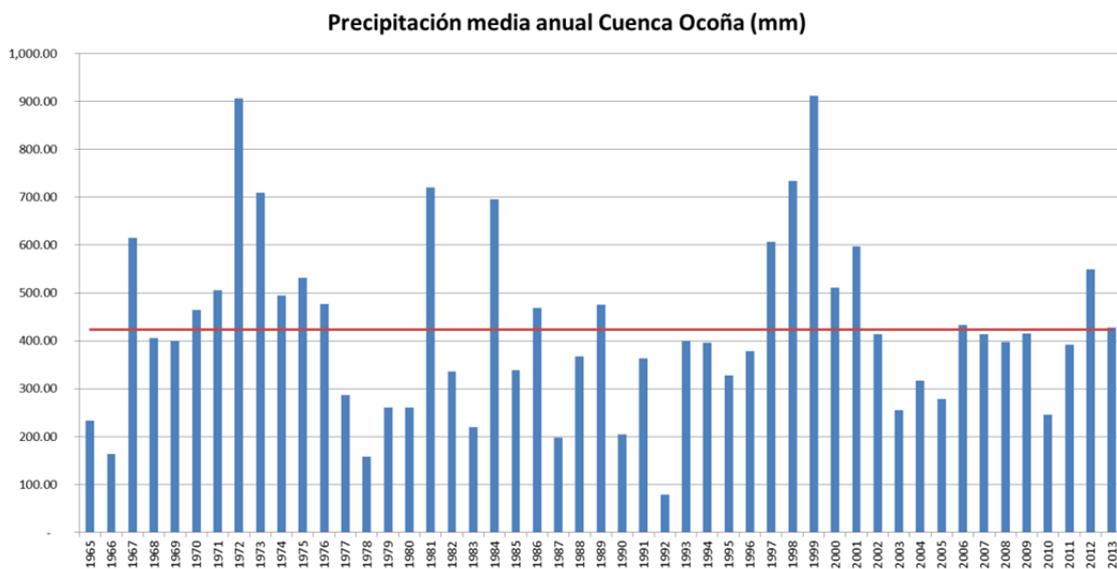


Figura 30. Serie histórica de precipitaciones medias anuales en la cuenca de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).

Por otro lado, observado las siguientes figuras (Figura 31 y Tabla 13), se puede comprobar que la distribución de las precipitaciones a lo largo del año es muy variable, comenzando el periodo húmedo en el mes de Diciembre y finalizando en el mes de abril siendo el mes de febrero en el que en media se producen mayores precipitaciones.

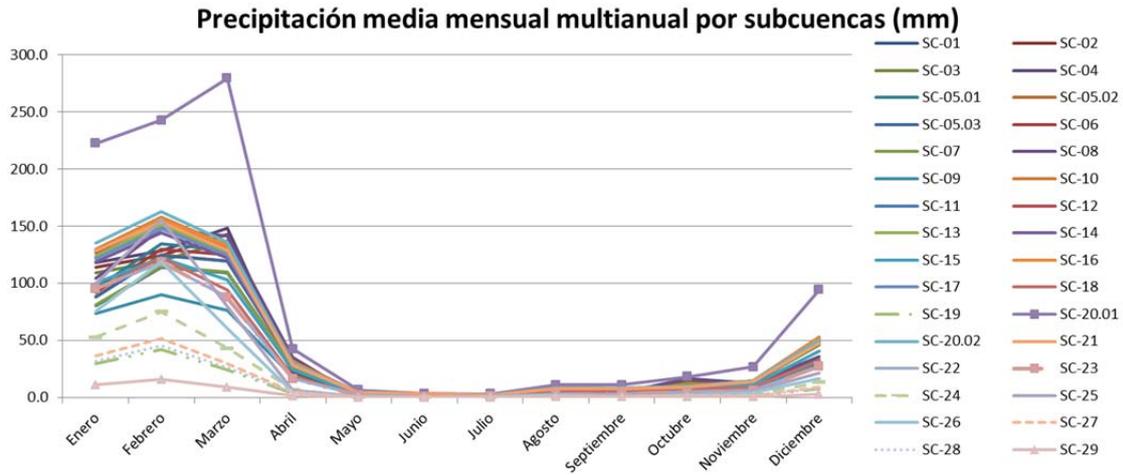


Figura 31. Precipitaciones medias mensuales multianuales por subcuencas. (Fuente: Elaboración propia).

Respecto a los periodos húmedos, cabe resaltar que la mayoría de las subcuencas tienen precipitaciones máximas entre 100 y 150 mm (en los meses de enero, febrero y marzo), siendo la subcuenca con mayores precipitaciones el nevado Arma-Chichas (SC-20.01) donde se llega a alcanzar de media más de 250 mm en el mes de Abril. Además, las subcuencas con menores precipitaciones coinciden con las subcuencas más cercanas a la costa donde el clima es más árido.

En cuanto a los periodos secos, los valores de precipitación son más homogéneos en todas las subcuencas siendo inferiores a los 25 mm de media. Además, en los meses de junio y julio la escasez de precipitaciones se acentúa con precipitaciones que no superan los 3 mm en la mayoría de los casos.

Subcuencas	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
SC-01	80.8	114.0	109.3	27.1	0.4	0.0	0.4	0.2	3.2	12.8	9.9	28.1
SC-02	113.9	124.3	143.1	21.9	3.5	1.9	1.7	5.8	5.6	9.4	13.8	48.3
SC-03	109.4	119.3	137.4	21.1	3.3	1.8	1.6	5.6	5.4	9.0	13.2	46.4
SC-04	117.9	128.5	148.1	22.7	3.6	2.0	1.8	6.0	5.8	9.8	14.3	50.0
SC-05.01	95.5	134.8	129.1	32.1	0.5	0.0	0.5	0.2	3.8	15.1	11.7	33.2
SC-05.02	88.6	125.1	119.9	29.8	0.4	0.0	0.5	0.2	3.5	14.0	10.9	30.8
SC-05.03	88.3	124.7	119.5	29.7	0.4	0.0	0.5	0.2	3.5	14.0	10.8	30.7
SC-06	92.2	130.2	124.7	31.0	0.4	0.0	0.5	0.2	3.7	14.6	11.3	32.1
SC-07	81.1	114.5	109.7	27.3	0.4	0.0	0.4	0.2	3.2	12.8	9.9	28.2
SC-08	104.4	147.4	141.2	35.1	0.5	0.0	0.6	0.3	4.2	16.5	12.8	36.3
SC-09	73.9	90.0	76.1	18.1	2.4	1.8	1.3	4.9	4.7	5.9	8.5	30.2
SC-10	129.6	157.9	133.5	31.7	4.2	3.2	2.2	8.7	8.2	10.3	14.9	53.1
SC-11	123.0	149.9	126.7	30.1	4.0	3.1	2.1	8.2	7.8	9.8	14.1	50.4
SC-12	126.9	154.6	130.7	31.1	4.1	3.2	2.2	8.5	8.0	10.1	14.6	52.0
SC-13	124.0	151.1	127.7	30.4	4.0	3.1	2.1	8.3	7.9	9.8	14.3	50.8
SC-14	118.6	144.5	122.1	29.0	3.8	2.9	2.0	7.9	7.5	9.4	13.6	48.6
SC-15	100.4	122.3	103.4	24.6	3.2	2.5	1.7	6.7	6.4	8.0	11.5	41.1
SC-16	128.5	156.5	132.3	31.5	4.1	3.2	2.2	8.6	8.1	10.2	14.8	52.6
SC-17	121.3	147.8	124.9	29.7	3.9	3.0	2.1	8.1	7.7	9.6	13.9	49.7
SC-18	95.0	122.4	94.2	19.2	1.9	1.5	3.3	5.5	5.4	7.1	9.5	32.7
SC-19	29.7	42.1	24.2	3.9	0.3	0.3	0.5	1.0	1.0	1.5	1.2	7.7
SC-20.01	222.4	242.6	279.4	42.8	6.8	3.7	3.4	11.3	11.0	18.4	26.9	94.3
SC-20.02	135.6	162.5	136.3	29.8	4.5	4.1	2.6	8.4	8.4	9.7	14.7	50.6
SC-21	128.2	153.7	128.9	28.2	4.3	3.9	2.5	8.0	7.9	9.2	13.9	47.8
SC-22	95.3	118.4	87.9	16.5	2.1	0.8	1.4	2.6	3.3	5.0	6.3	27.4
SC-23	95.3	118.4	87.9	16.5	2.1	0.8	1.4	2.6	3.3	5.0	6.3	27.4
SC-24	52.9	75.2	43.2	7.0	0.6	0.6	0.9	1.9	1.8	2.6	2.1	13.7
SC-25	99.6	156.1	79.9	6.7	1.0	0.7	1.3	3.3	1.7	3.0	5.9	21.9
SC-26	76.0	119.1	61.0	5.1	0.8	0.5	1.0	2.5	1.3	2.3	4.5	16.7
SC-27	36.6	52.0	29.9	4.8	0.4	0.4	0.6	1.3	1.3	1.8	1.5	9.5
SC-28	32.2	45.8	26.3	4.3	0.4	0.3	0.5	1.1	1.1	1.6	1.3	8.3
SC-29	11.2	15.9	9.2	1.5	0.1	0.1	0.2	0.4	0.4	0.5	0.5	2.9

Tabla 13. Precipitaciones medias mensuales multianuales por subcuencas. (Fuente: Elaboración propia).

4.1.1.2. TEMPERATURA

Observando las figuras (Tabla 14 y Figura 32) de valores medios mensuales multianuales de temperatura, se puede comprobar que la variación de temperaturas medias a lo largo del año en la cuenca de Ocoña es bastante pequeña: 1.8°C como máximo, a excepción de la subcuenca 20.01, donde esta variación llega a alcanzar los 8°C. También podemos comprobar que los meses más cálidos se sitúan desde Octubre hasta Marzo, y los más fríos de abril a septiembre.

Por otro lado, la mayor parte de la cuenca se sitúa con valores medios de temperatura entre los 5 y 12°C, siendo las subcuencas más cálidas las que están a menor altura y más cerca de la costa, llegando las más cálidas a alcanzar valores medios de temperatura de 24 °C. La subcuenca más fría es la SC-20.01, donde se sitúa el nevado Arma-Chichas con temperaturas de hasta -1.9°C de media; razón por la cual se decide que sea la única subcuenca donde se ejecute el modelo de nieve.

Subcuencas	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
SC-01	11.8	11.8	11.6	11.5	11.0	10.4	10.6	10.7	11.1	11.4	11.6	11.8
SC-02	7.9	7.9	7.8	7.7	7.4	7.0	7.2	7.2	7.5	7.7	7.8	7.9
SC-03	8.7	8.6	8.5	8.4	8.0	7.7	7.8	7.8	8.1	8.4	8.5	8.7
SC-04	7.3	7.3	7.2	7.1	6.8	6.5	6.6	6.6	6.9	7.1	7.2	7.3
SC-05.01	9.3	9.2	9.1	9.0	8.6	8.2	8.3	8.4	8.7	9.0	9.1	9.3
SC-05.02	10.5	10.4	10.3	10.2	9.7	9.2	9.4	9.4	9.8	10.1	10.3	10.4
SC-05.03	10.5	10.5	10.3	10.3	9.8	9.3	9.4	9.5	9.9	10.2	10.3	10.5
SC-06	9.9	9.8	9.7	9.6	9.1	8.7	8.8	8.9	9.3	9.5	9.7	9.8
SC-07	11.7	11.7	11.5	11.4	10.9	10.4	10.5	10.6	11.0	11.3	11.5	11.7
SC-08	7.7	7.7	7.6	7.5	7.2	6.8	7.0	7.0	7.3	7.5	7.6	7.7
SC-09	14.3	14.2	14.0	13.9	13.2	12.6	12.8	12.9	13.4	13.8	14.1	14.3
SC-10	5.5	5.4	5.4	5.4	5.3	5.1	5.1	5.3	5.5	5.7	5.7	5.6
SC-11	6.4	6.3	6.4	6.4	6.2	6.0	6.0	6.2	6.5	6.7	6.7	6.5
SC-12	5.9	5.8	5.8	5.8	5.7	5.5	5.5	5.7	5.9	6.1	6.1	6.0
SC-13	6.3	6.2	6.3	6.3	6.1	5.9	5.9	6.1	6.4	6.6	6.5	6.4
SC-14	7.1	7.0	7.1	7.1	6.9	6.6	6.6	6.9	7.2	7.4	7.4	7.2
SC-15	10.0	9.8	9.8	9.7	9.5	9.3	9.3	9.5	9.7	9.8	10.0	10.0
SC-16	5.7	5.6	5.6	5.6	5.5	5.3	5.3	5.4	5.6	5.6	5.7	5.7
SC-17	6.8	6.7	6.7	6.7	6.5	6.4	6.3	6.5	6.7	6.7	6.8	6.9
SC-18	11.1	11.0	10.9	10.9	10.6	10.4	10.4	10.6	10.9	11.0	11.1	11.2
SC-19	21.1	20.8	21.0	20.8	20.2	20.0	19.6	20.7	21.0	21.0	21.0	20.8
SC-20.01	4.7	5.3	4.8	2.8	0.2	-1.9	-2.7	-1.8	-0.5	0.6	1.8	3.4
SC-20.02	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	5.9	5.8	6.1	6.2	6.3	6.3	6.3
SC-21	7.1	7.1	7.1	7.2	7.1	6.8	6.8	7.1	7.2	7.4	7.4	7.3
SC-22	12.2	12.0	12.1	12.0	11.6	11.5	11.3	11.9	12.1	12.1	12.1	12.0
SC-23	18.1	17.8	18.0	17.8	17.3	17.1	16.8	17.7	18.0	18.0	18.0	17.8
SC-24	18.0	17.7	17.9	17.7	17.2	17.0	16.7	17.6	17.9	17.9	17.9	17.7
SC-25	11.3	11.0	11.3	11.7	11.4	11.2	10.9	11.4	11.7	12.0	11.8	11.6
SC-26	14.4	14.0	14.4	14.9	14.5	14.2	13.9	14.5	14.9	15.2	15.0	14.7
SC-27	19.5	18.9	19.5	20.2	19.7	19.2	18.8	19.7	20.2	20.7	20.3	20.0
SC-28	20.8	20.4	20.7	20.5	19.9	19.7	19.3	20.3	20.7	20.7	20.6	20.5
SC-29	23.6	23.2	23.5	23.3	22.6	22.3	21.9	23.1	23.5	23.5	23.4	23.2

Tabla 14. Temperaturas medias mensuales multianuales por subcuencas. (Fuente: Elaboración propia).

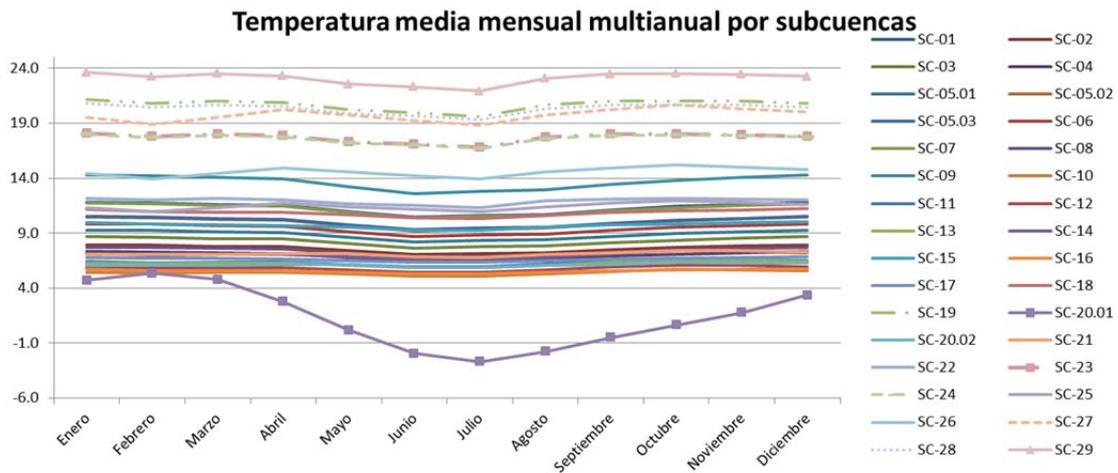


Figura 32. Temperaturas medias mensuales multianuales por subcuencas. (Fuente: Elaboración propia).

4.1.1.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ETP)

En la tabla y figura siguiente se pueden comprobar los valores medios de ETP mensual en cada una de las subcuencas. En ellas se puede comprobar que en las

subcuencas más áridas (zonas cercanas a la costa), los valores de la evapotranspiración potencial son inferiores a las zonas de la cuenca con mayor vegetación y humedad.

Subcuencas	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
SC-01	128.7	108.4	111.8	102.2	101.6	93.1	101.4	111.1	123.0	139.2	138.4	142.5
SC-02	103.1	87.4	90.7	83.1	83.1	76.5	83.0	90.7	99.6	111.8	111.0	114.4
SC-03	107.0	90.6	93.9	86.1	85.9	79.1	85.7	93.7	103.1	115.9	115.2	118.6
SC-04	106.1	82.5	94.4	94.9	96.4	95.6	105.9	117.0	122.4	134.9	128.9	110.5
SC-05.01	109.6	92.7	96.0	87.8	87.6	80.5	87.5	95.6	105.4	118.7	118.0	121.5
SC-05.02	114.0	96.2	99.5	91.0	90.5	83.1	90.3	98.9	109.3	123.4	122.7	126.3
SC-05.03	115.1	97.1	100.4	91.9	91.6	84.0	91.3	100.0	110.3	124.5	123.8	127.5
SC-06	113.1	95.5	98.8	90.4	90.0	82.6	89.8	98.3	108.5	122.4	121.7	125.3
SC-07	117.9	99.4	102.6	93.7	93.2	85.4	92.9	101.9	112.8	127.6	126.8	130.6
SC-08	109.4	85.0	97.1	97.6	99.0	97.9	108.7	120.2	126.0	139.0	132.9	114.0
SC-09	130.8	109.9	113.2	103.4	102.4	93.7	102.2	112.1	124.6	141.5	140.7	144.8
SC-10	74.1	58.1	66.4	66.2	66.1	67.8	72.2	82.0	86.1	92.0	87.3	77.1
SC-11	86.1	67.4	76.8	76.6	76.4	78.5	83.5	94.9	99.9	106.9	101.4	89.5
SC-12	81.6	63.9	72.9	72.6	72.5	74.4	79.3	90.1	94.6	101.1	96.0	84.9
SC-13	77.5	60.6	69.1	68.7	68.5	70.3	74.9	85.2	89.8	96.1	91.2	80.7
SC-14	111.5	87.2	99.2	98.7	98.4	101.0	107.5	122.7	129.2	138.3	131.3	116.1
SC-15	113.6	88.6	100.1	99.7	99.5	102.7	108.9	124.2	130.6	138.6	131.8	117.8
SC-16	85.4	66.9	76.1	75.5	75.7	77.9	82.9	93.9	98.2	104.5	99.7	88.7
SC-17	92.6	72.5	82.3	81.8	82.0	84.4	89.8	101.9	106.6	113.3	108.0	96.1
SC-18	121.8	94.9	107.0	106.5	106.3	109.8	116.3	132.9	140.0	148.6	141.1	126.3
SC-19	62.8	49.0	54.9	54.6	53.8	56.3	58.6	68.7	72.8	76.2	71.2	64.1
SC-20.01	59.5	43.6	49.4	50.6	55.6	59.8	65.2	72.4	73.9	78.2	74.5	64.8
SC-20.02	84.0	65.9	74.8	74.6	74.9	76.8	81.6	93.0	97.2	103.9	98.9	87.6
SC-21	93.6	73.4	83.1	83.0	83.3	85.3	90.5	103.5	108.5	116.1	110.4	97.8
SC-22	131.4	102.4	115.8	115.0	114.2	118.6	124.8	144.5	152.1	160.6	151.6	135.0
SC-23	95.0	74.0	83.1	82.6	81.5	85.2	89.0	104.1	110.1	115.6	108.4	97.2
SC-24	70.3	60.9	64.0	55.0	49.0	44.0	44.9	52.7	59.3	68.1	69.7	70.5
SC-25	112.8	87.4	99.6	100.7	100.1	103.4	108.8	125.5	132.7	141.5	133.0	117.9
SC-26	87.3	75.3	79.9	70.0	62.3	55.5	56.8	66.0	74.8	87.1	88.8	89.5
SC-27	38.6	33.1	35.1	31.1	27.8	24.8	25.3	29.6	33.6	39.0	39.4	39.6
SC-28	39.0	33.7	35.4	30.5	27.1	24.4	24.9	29.3	33.0	37.9	38.6	39.1
SC-29	47.0	40.5	42.4	36.7	32.6	29.5	30.0	35.4	39.9	45.6	46.4	47.0

Tabla 15. Evapotranspiración potencial media mensual multianual por subcuencas. (Fuente: Elaboración propia).

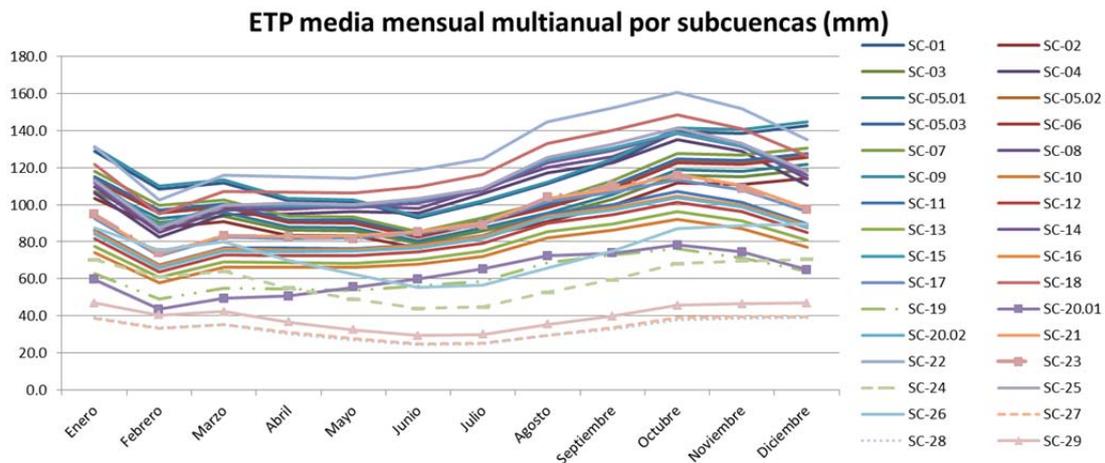


Figura 33. Evapotranspiración potencial media mensual multianual por subcuencas. (Fuente: Elaboración propia).

4.1.1.4. CAUDALES AFORADOS

Como se comentó en el apartado de metodología, existen dos estaciones hidrométricas de las que se han conseguido obtener datos de caudales fiables.

Los datos de la serie de caudales disponibles son mensuales y no están completos en ninguna de las dos estaciones, siendo la estación de Ocoña la que tiene menor número de registros:

- Estación Hidrométrica de Salamanca. Código: 204501. Los datos recogidos en esta estación comprende el periodo completo desde 1965 hasta 2013, con algunos pequeños períodos donde no hay datos: 1970-1972, 1978, 2000.

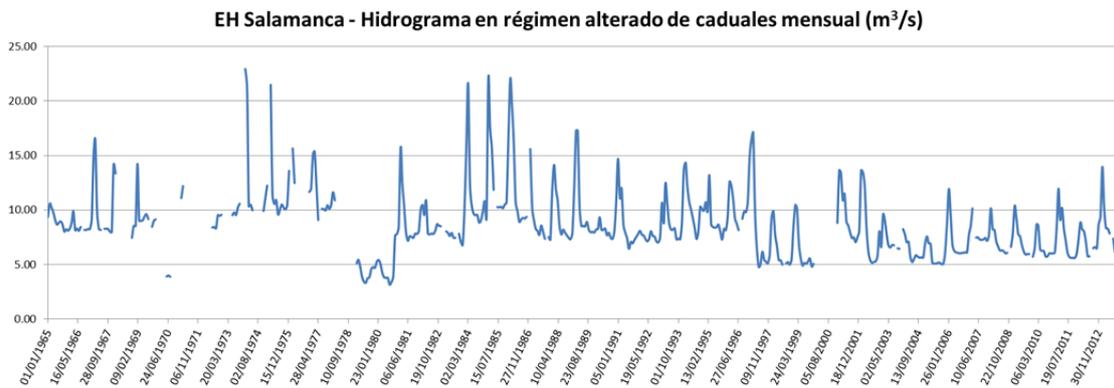


Figura 34. Serie histórica de caudales aforados en la EH de Salamanca. (Fuente: Elaboración propia).

Podemos comprobar que los datos en la serie son bastante constantes en valor numérico por lo que la serie parece válida. Se observa que el caudal base de la serie disminuye teniendo en los años 60-70 un caudal en torno a 8m³/s y a partir del año 2000 dicho caudal base disminuye hasta 5-6 m³/s.

- Estación Hidrométrica de Ocoña. Código: 204504. Los datos recogidos por esta estación comprende los siguientes periodos: 1970-1973, 1984, 1986, 1998-2013.

Como se puede observar (Figura 35), hasta 1998 no hay datos suficientes como para poder conocer adecuadamente los caudales de la cuenca, ya que apenas se pueden comprobar cuatro valores picos muy aislados. A partir de 1998, sí que podemos observar que el caudal base a lo largo del año está entre los 30 m³/s (últimos años de la serie) y los 50 m³/s; alcanzándose picos de hasta 700 y 800 m³/s.

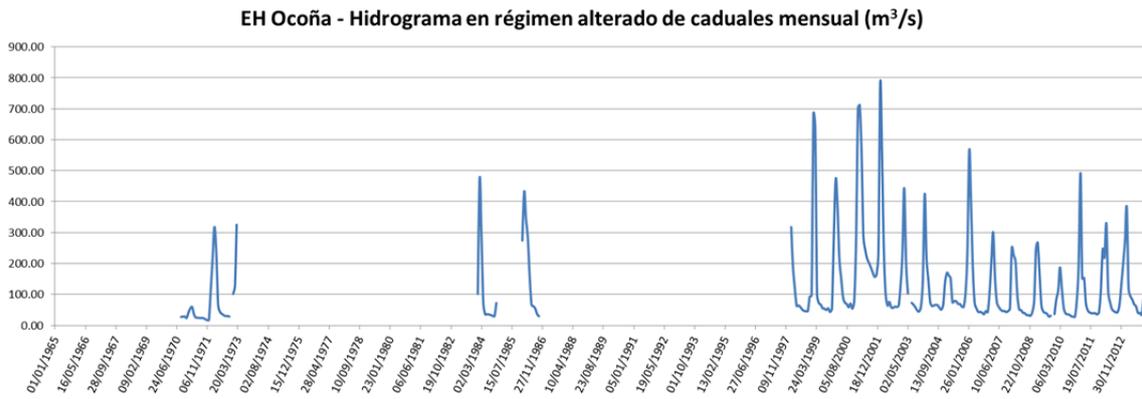


Figura 35. Serie histórica de caudales aforados en la EH de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).

4.1.2. NATURALIZACIÓN DE LA SERIE DE CAUDALES

Los datos de la serie histórica de caudales registrados en ambas estaciones hidrométricas se encuentran en régimen alterado, es decir, son los caudales resultantes tras abastecer las distintas demandas existentes aguas arriba; por tanto es necesario naturalizar dichas series:

- Estación Hidrométrica de Salamanca

Analizando los datos de demandas estimados por la ANA, así como los retornos existentes en cada una de dichas demandas. Se han calculado el valor de la demanda en cada mes, y se le ha sumado a cada mes de la serie, obteniendo así una nueva serie desplazada de la serie de caudales aforados.

Mes	Demandas	Retornos	Variación de Caudal
Enero	1.57	0.63	0.94
Febrero	0.45	0.18	0.27
Marzo	1.25	0.50	0.75
Abril	2.66	1.06	1.60
Mayo	2.55	1.02	1.53
Junio	2.68	1.07	1.61
Julio	2.78	1.11	1.67
Agosto	3.04	1.22	1.83
Septiembre	3.24	1.29	1.94
Octubre	3.42	1.37	2.05
Noviembre	3.23	1.29	1.94
Diciembre	2.61	1.04	1.56

Tabla 16. Corrección de serie de caudales de la EH de Salamanca. (Fuente: Elaboración propia).

Las demandas corresponden a una industria minera (valores inferiores a 0.002 m³/s) y a un regadío, dicho regadío tiene un 40 % de retornos (según la ANA) con lo que esos caudales vuelven al río.

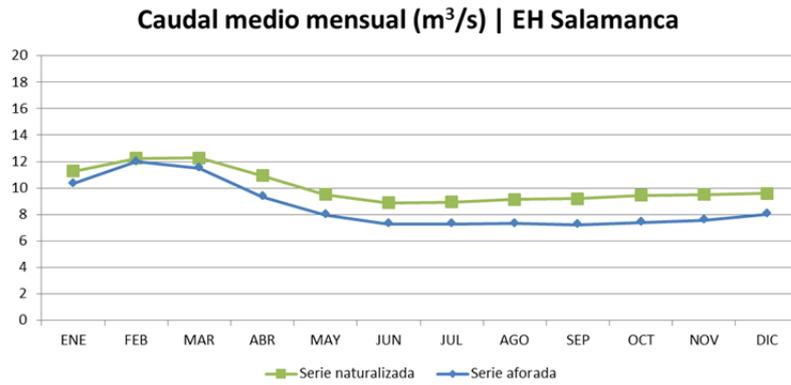


Figura 36. Caudal medio mensual interanual en la EH de Salamanca. (Fuente: Elaboración propia).

- Estación Hidrométrica de Ocoña.

Del mismo modo que en el caso anterior, se han restituido la serie de caudales del río a su paso por la estación hidrométrica. En este caso habrá que tener en cuenta todas las demandas y retornos existentes en la cuenca.

Mes	Demandas	Retornos	Variación de Caudal
Enero	35.46	17.92	17.53
Febrero	27.70	14.89	12.82
Marzo	29.92	14.50	15.42
Abril	41.28	19.74	21.54
Mayo	41.49	20.39	21.11
Junio	39.93	19.66	20.27
Julio	37.83	18.51	19.32
Agosto	31.51	13.74	17.77
Septiembre	34.92	15.41	19.51
Octubre	44.17	20.29	23.88
Noviembre	48.38	22.99	25.38
Diciembre	45.54	21.91	23.63

Tabla 17. Tabla 11. Corrección de serie de caudales de la EH de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).

Para tratar de cometer el mínimo error posible, en los casos donde el agua consumida procede de manantiales (considerados en el modelo de gestión como fuentes de agua con caudal constante sin ninguna otra limitación) y éstos producen un retorno al cauce fluvial: la demanda no habría que tenerla en cuenta pero sí los retornos, y además, dado que se conoce tanto la demanda como el recurso disponible, se puede calcular el consumo real, con lo que el retorno se ha calculado a partir de dicho consumo.

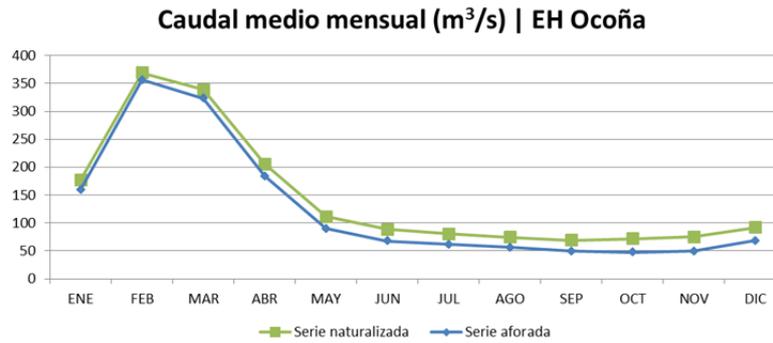


Figura 37. Caudal medio mensual interanual en la EH de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).

4.1.3. INFORMACIÓN GEOLÓGICA Y COBERTURA VEGETAL DE LA CUENCA

Como se ha comentado en el capítulo 3 de metodología, el modelo hidrológico de Témez consta de 4 parámetros a determinar. Dichos parámetros pueden estimarse en base a la hidrogeología del terreno, a priori, distinto en cada una de las subcuencas.

Esta estimación puede llegar a requerir un estudio muy complejo y costoso en la cuenca, es por ello, que habitualmente se parte de unos parámetros estimados (basándose en la información disponible que se haya podido recopilar) y se procede a la calibración del modelo con el objetivo de conocer con mayor exactitud los valores de los parámetros, y así, finalmente obtener un modelo que represente adecuadamente la realidad.

Los parámetros de Témez a estimar son:

- C , el coeficiente de inicio de excedencia. Toma valores en torno a 0.3 (Témez, 1977) aunque puede llegar a valores entre 0.2 y 1 (Andreu, 2017).
- H_{\max} (mm), la humedad máxima que puede almacenar el suelo. Entre 50 y 250 mm (Andreu, 2017).
- I_{\max} (mm), la infiltración máxima. Toma valores entre 10 y 150 mm (Andreu, 2017), 100 y 400 mm (Témez, 1977), y adopta los siguientes valores según Murillo J. M. (2011): 100 mm para suelos poco permeables, 300 mm para acuíferos mayoritariamente detríticos de permeabilidad alta, 450 mm para acuíferos detríticos de permeabilidad muy alta y kársticos de permeabilidad alta y 500 mm para acuíferos kársticos de permeabilidad muy alta.
- α , la velocidad de descarga del acuífero. Toma valores entre 0.001 y 0.9 mes^{-1} .

Además, se cuenta con las tablas (Estrela, 1999) obtenidas de la calibración del modelo SIMPA (vistas en el capítulo de metodología). Aunque estos valores son buenas referencias para el territorio español en otros lugares del mundo puede no ser tan válido, a pesar de ello se usarán como primera aproximación en el modelo hidrológico, y se partirán de estos valores para realizar la calibración del modelo.

Por tanto, para comenzar de unos valores aceptables se tomará como valores inicial de C , el recomendado por Témez: 0.3, y para los parámetros H_{\max} e I_{\max} , se tratará de realizar una estimación en base a la información geológica (parámetro I_{\max}) y la información de usos del suelo (parámetro H_{\max}), vista capítulo 2 del presente documento.

El parámetro α , tendremos que estimarlo sin tener ninguna referencia, pero impondremos como limitaciones físicas las recomendadas en el manual EvalHid.

Para realizar la estimación de los parámetros H_{\max} e I_{\max} en primer lugar será necesario tratar de asignar un valor de referencia de estos parámetros a cada tipo de uso de suelo y a cada tipo de geología, respectivamente (Tabla 18 y Tabla 19). Para ello, nos apoyaremos en los valores comentados y referenciados anteriormente.

Uso del suelo	H_{\max} (mm)
Agricultura Costera y Andina	210
Bofedal	300
Bosque Relicto Alto Andino	230
Ciudad	40
Desierto Costero	100
Glaciar	100
Lago y Laguna	300
Lomada	135
Matorral Arbustivo	135
Pajonal Altoandino	150
Periglaciar	100

Tabla 18. Estimación del parámetro H_{\max} en función de los usos del suelo de la cuenca. (Fuente: Elaboración propia).

Litología	I_{max} (mm)
Depósitos Aluviales	500
Depósitos Fluvioglaciares	500
Depósitos Morrénicos	400
Grupo Barroso	275
Formación Andamarca	275
Grupo Pisco	400
Formación Huaylillas	275
Volcánico Saycata/Chacoma/Chibemi	275
Formación Aniso	250
Formación Alpabamba	275
Grupo Tacaza	275
Formación Camaná	250
Formación Millo	250
Formación Moquegua	85
Formación Sotillo	150
Formación Arcurquina	1000
Formación Murco	85
Grupo Yura	85
Formación Socosani	85
Formación Chocolate	275
Grupo Mitu	150
Grupo Ambo	150
Complejo Basal de la costa	20
Unidad Incahuasi	65
Gran Unidad Tiabaya	65
Subvolcánica andesita	65
Diorita	65

Tabla 19. Estimación del parámetro I_{max} en función de la litología de la cuenca. (Fuente: Elaboración propia).

Posteriormente, a través de herramientas de SIG y/o “Autocad” podemos conocer la superficie que ocupa cada uno de estos tipos de usos de suelo y tipos de geología, en las distintas subcuencas; con lo que se podrá ponderar estos valores en cada subcuenca en función de la superficie ocupada y así obtener un valor medio de estos parámetros en cada una de las subcuencas.

Nombre	I_{\max} (mm)	H_{\max} (mm)
SC-01	414	171
SC-02	294	153
SC-03	305	152
SC-04	270	144
SC-05.01	277	152
SC-05.02	301	152
SC-05.03	323	146
SC-06	278	153
SC-07	284	150
SC-08	309	148
SC-09	313	137
SC-10	299	122
SC-11	290	127
SC-12	316	126
SC-13	309	117
SC-14	275	150
SC-15	291	146
SC-16	275	129
SC-17	286	136
SC-18	257	139
SC-19	158	111
SC-20.01	282	100
SC-20.02	338	137
SC-21	243	142
SC-22	95	136
SC-23	115	116
SC-24	114	115
SC-25	200	137
SC-26	163	123
SC-27	220	103
SC-28	264	106
SC-29	231	110

Tabla 20. Estimación inicial de los parámetros H_{\max} e I_{\max} para las subcuencas. (Fuente: Elaboración propia).

Por último, como se comentó en el capítulo de metodología, el resto de parámetros del modelo (tanto en el modelo de nieve como en el de Témez) que es necesario introducir, estos parámetros normalmente no forman parte de la calibración, y se suelen tomar siempre los recomendados:

En cuanto al modelo de nieve, como se comentó en el capítulo de metodología, sólo tiene un parámetro de calibración: A_n , en este caso se partirá de un valor arbitrario: $A_n = 1$. Por último, para el resto de parámetros de ambos modelos se seguirá lo recomendado en el apartado de metodología.

4.2. RESULTADOS DEL MODELO HIDROLÓGICO

4.2.1. PARÁMETROS FINALES DEL MODELO

Los parámetros finales obtenidos tras la calibración del modelo en cada una de las subcuencas son los siguientes:

- Modelo de Témez

Nombre	I_{\max} (mm)	H_{\max} (mm)	α	C	V_0	H_0
SC-01	222	319	0.30	0.1	24.0	0.0
SC-02	198	227	0.30	0.1	41.0	0.0
SC-03	198	235	0.30	0.1	37.0	20.0
SC-04	187	208	0.30	0.1	46.0	0.0
SC-05.01	197	214	0.30	0.1	238.5	0.0
SC-05.02	198	232	0.30	0.1	202.9	0.0
SC-05.03	190	249	0.30	0.1	39.0	0.0
SC-06	198	214	0.30	0.1	490.0	0.0
SC-07	195	219	0.30	0.1	0.0	0.0
SC-08	192	238	0.30	0.1	59.0	0.0
SC-09	178	241	0.30	0.1	11.0	0.0
SC-10	159	230	0.30	0.1	70.0	0.0
SC-11	165	223	0.30	0.1	57.0	0.0
SC-12	164	244	0.30	0.1	64.0	0.0
SC-13	152	238	0.30	0.1	65.0	0.0
SC-14	195	212	0.30	0.1	40.7	0.0
SC-15	189	224	0.30	0.1	27.7	0.0
SC-16	168	212	0.30	0.1	60.0	0.0
SC-17	176	221	0.30	0.1	51.0	0.0
SC-18	180	198	0.30	0.1	29.0	0.0
SC-19	145	122	0.30	0.1	5.0	0.0
SC-20.01	139	308	0.05	0.3	66.7	0.0
SC-20.02	190	370	0.05	0.3	0.9	30.0
SC-21	196	266	0.05	0.3	14.5	0.0
SC-22	176	73	0.30	0.1	25.0	0.0
SC-23	151	89	0.30	0.1	13.7	0.0
SC-24	150	88	0.30	0.1	15.9	0.0
SC-25	178	154	0.30	0.1	40.6	0.0
SC-26	160	125	0.30	0.1	29.0	0.0
SC-27	134	170	0.30	0.1	14.0	4.0
SC-28	138	203	0.30	0.1	10.0	0.0
SC-29	142	178	0.30	0.1	0.0	0.0

Tabla 21. Parámetros finales del Modelo de Témez para cada subcuenca. (Fuente: Elaboración propia).

Observando los valores de los parámetros I_{\max} , se puede comprobar que los valores adoptados finalmente son significativamente superiores a los estimados inicialmente, mientras que en el caso de H_{\max} sucede justo al contrario.

En cuanto al valor de alfa, se ha tomado un único valor en las subcuencas SC-20.01, SC-20.02 y SC-21, de 0.05, y para el resto de subcuencas un valor de 0.3.

El parámetro C, se ha mantenido con el valor de 0.3 en las subcuencas SC-20.01, SC-20.02 y SC-21 y se ha bajado hasta 0.1 en el resto de subcuencas.

Los valores de volumen inicial de acuífero se han estimado como la aportación subterránea inicial dividida de α , mientras que para la humedad inicial se han tomado valores similares a los que hay en la subcuenca tras unos meses.

- Modelo de nieve N-2

El parámetro A_n , del modelo de nieve en la subcuenca SC-20.01, toma como valor 4.3; el resto de parámetros del modelo se han mantenido según las recomendaciones del manual de EvalHid vistas en el capítulo de metodología.

4.2.2. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

A continuación, comprobaremos los resultados obtenidos de la calibración, es decir, la comparación entre los caudales aforados y los obtenidos del modelo, el índice PBIAS, la eficiencia de Nash-Sutcliffe, así como los resultados de la validación del mismo.

4.2.2.1. PRIMER PUNTO DE CALIBRACIÓN: EH DE SALAMANCA

En este primer punto de calibración, se obtuvieron los resultados de las subcuencas: SC-20.01, SC-20.02 y SC-21.

Viendo los resultados del periodo de calibración podemos comprobar que la diferencia entre caudal total simulado y aforado es pequeña, cometiéndose un error del 3%, también se observa un resultado muy bueno del índice PBIAS; por otro lado, el valor de la eficiencia de Nash es bastante bajo siendo un valor que puede ser considerado como suficiente (Molnar, 2011).

Calibración Salamanca (2004-2013)	
Caudal total simulado	1009.17
Caudal total aforado	981.01
Diferencia	28.16 (3%)
PBIAS	1.48%
E (Eficiencia de Nash)	0.23

Tabla 22. Bondad de ajuste en el periodo de calibración de la EH de Salamanca. (Fuente: Elaboración propia).

En las siguientes gráficas podemos comprobar la comparativa entre la serie de aportación aforada y simulada. En ellas observamos que de media, los valores picos

obtenidos son más altos que los aforados y que en periodos de sequía los primeros valores sobreestiman los caudales y en los meses siguientes se subestiman.

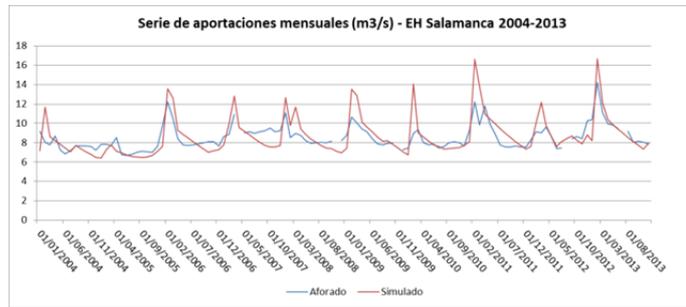


Figura 38. Serie de aportaciones mensuales, en el periodo de calibración de la EH de Salamanca. (Fuente: Elaboración propia).

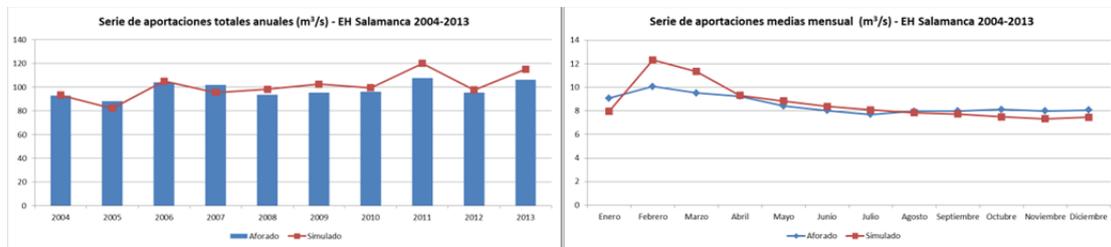


Figura 39. Serie de aportaciones totales anuales (izquierda) y medias mensuales (derecha), en el periodo de calibración de la EH de Salamanca. (Fuente: Elaboración propia).

En cuanto a los resultados del periodo de validación, hemos obtenido valores similares en las distintas medidas de bondad de ajuste:

Validación Salamanca (1979-1996)	
Caudal total simulado	2158.20
Caudal total aforado	2190.72
Diferencia	-32.52 (-1.5%)
PBIAS	-1.96%
E (Eficiencia de Nash)	0.20

Tabla 23. Bondad de ajuste en el periodo de validación de la EH de Salamanca. (Fuente: Elaboración propia).

Si comprobamos las gráficas de comparación entre serie aforada y simulada, también observamos un comportamiento similar al del periodo de calibración:

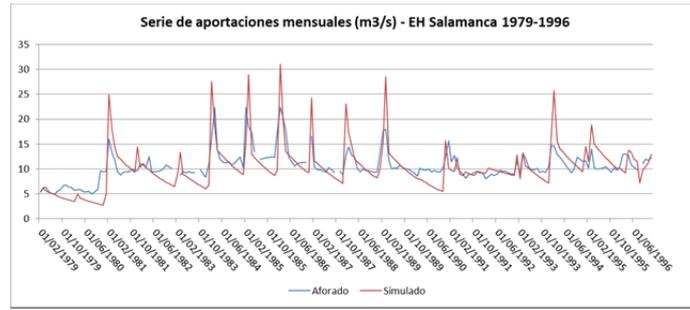


Figura 40. Serie de aportaciones mensuales, en el periodo de validación de la EH de Salamanca. (Fuente: Elaboración propia).

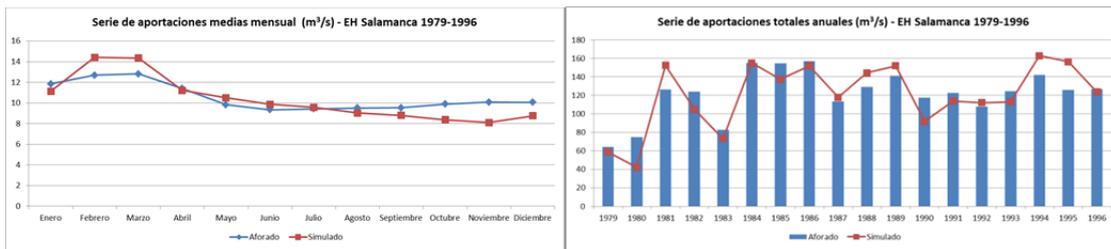


Figura 41. Serie de aportaciones totales anuales (izquierda) y medias mensuales (derecha), en el periodo de validación de la EH de Salamanca. (Fuente: Elaboración propia).

4.2.2.2. SEGUNDO PUNTO DE CALIBRACIÓN: EH DE OCOÑA

En este segundo punto de calibración, se obtuvieron los resultados del resto de subcuencas del modelo.

Viendo los resultados del periodo de calibración podemos comprobar que la diferencia entre caudal total simulado y aforado no es muy alta, cometiéndose un error del 5%, también se observan valores muy buenos del coeficiente del índice PBIAS y del coeficiente de eficiencia de Nash.

Calibración Ocoña (2003-2013)	
Caudal total simulado	14428.75
Caudal total aforado	15243.14
Diferencia	814.39 (5%)
PBIAS	9.50%
E (Eficiencia de Nash)	0.62

Tabla 24. Bondad de ajuste en el periodo de calibración de la EH de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).

En las siguientes gráficas podemos comprobar la comparativa entre la serie de aportación aforada y simulada. Al igual que ocurría en la estación de Salamanca, en ellas observamos que de media, los valores picos obtenidos son más altos que los aforados y que en periodos de sequía los valores de los primeros meses se sobreestiman y los meses siguientes se subestiman.

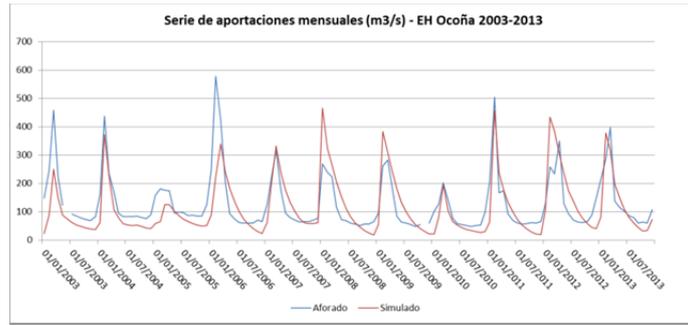


Figura 42. Serie de aportaciones mensuales, en el periodo de calibración de la EH de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).

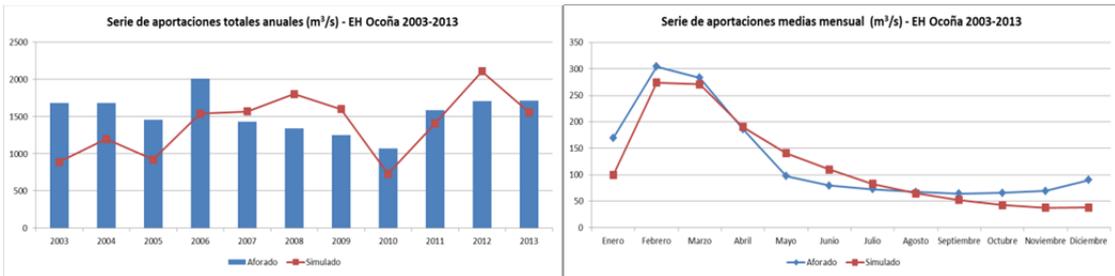


Figura 43. Serie de aportaciones totales anuales (izquierda) y medias mensuales (derecha), en el periodo de calibración de la EH de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).

En cuanto a los resultados del periodo de validación, hemos obtenido un mejor valor del índice PBIAS, pero una eficiencia de Nash inferior:

Validación Ocoña (1986-2002)	
Caudal total simulado	13847.63
Caudal total aforado	14428.05
Diferencia	580.42 (4%)
PBIAS	4.02%
E (Eficiencia de Nash)	0.51

Tabla 25. Bondad de ajuste en el periodo de validación de la EH de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).

Si comprobamos las gráficas de comparación entre serie aforada y simulada, también observamos un comportamiento similar que en el periodo de calibración:

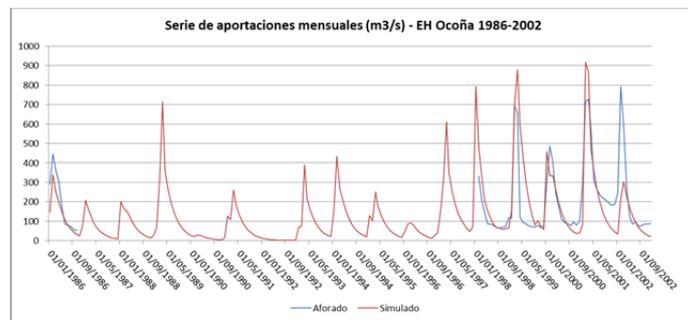


Figura 44. Serie de aportaciones mensuales, en el periodo de validación de la EH de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).

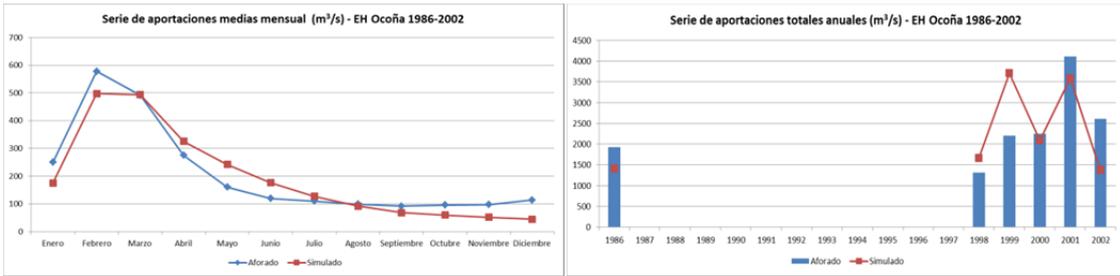


Figura 45. Serie de aportaciones totales anuales (izquierda) y medias mensuales (derecha), en el periodo de validación de la EH de Salamanca. (Fuente: Elaboración propia).

En general se puede considerar que se ha obtenido un ajuste bueno, obteniendo valores aceptables de los estadísticos de ajuste de bondad, siendo el peor resultado obtenido la eficiencia de Nash en la EH de Salamanca. Además, observando las gráficas se comprueba que la similitud entre las series aforadas y simuladas es alta.

4.2.3. COMPARACIÓN CON EL MODELO WEAP DE LA ANA

Como se ha comentado anteriormente, uno de los objetivos del presente documento es comparar los resultados del modelo realizado con el software “Aquatool +”, con el realizado por la ANA mediante el software “WEAP”. Dicho modelo emplea el modelo teórico “Rainfall Runoff Method”, en el que se consideran además de la escorrentía superficial y la escorrentía subterránea, un flujo intermedio (“interflujo”) o escorrentía subsuperficial.

Los resultados de dicho modelo son los siguientes:

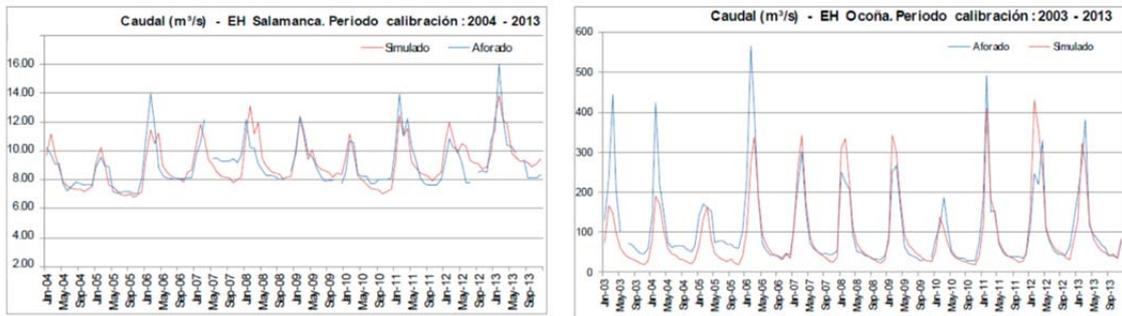


Figura 46. Series de aportaciones mensuales en el periodo de calibración. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).

	Periodo calibración			Periodo validación		
	NASH	BIAS	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN	NASH	BIAS	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN R ²
EH Salamanca	0,659	0,6%	0,683	0,316	-18,8%	0,607
EH Ocoña	0,664	-14,6%	0,694	0,510	-6,4%	0,558

Tabla 26. Bondad del ajuste del modelo de la ANA. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).

Comprobando los resultados anteriores, se puede comprobar que el modelo de la ANA ha obtenido mejores resultados en el coeficiente de eficiencia de Nash en la EH de Salamanca, aunque peores resultados en cuanto al PBIAS. También se observa que se obtienen un mejor funcionamiento en el flujo base de la cuenca, consiguiendo una adaptación mejor de las simulaciones al comportamiento de la cuenca en periodos secos.

Esto puede deberse a que el modelo teórico empleado se adapta mejor a la hidrogeología de la región. Además, es importante saber que en el modelo de la ANA no se consideró la existencia de acuíferos, basando su flujo principalmente en la escorrentía superficial y subsuperficial, sin considerar el flujo subterráneo.

5. MODELO DE GESTIÓN

En este apartado se comentarán los aspectos fundamentales del modelo de gestión realizado; como se ha comentado en el capítulo de metodología, dicho modelo simula el sistema de explotación de la cuenca partiendo de los datos de aportaciones del modelo hidrológico, y teniendo en cuenta la infraestructura existente y las normas de explotación; esto hace posible poder realizar un diagnóstico de la situación actual del sistema de explotación desde el punto de vista de la gestión, permitiendo comprobar si es posible alcanzar los objetivos que se planteen en el mismo.

En primer lugar se realizará una descripción de los elementos que componen el sistema de explotación describiendo los datos necesarios para la realización del modelo, posteriormente se mostrará el esquema resultante del modelo. Finalmente, se comprobarán los resultados obtenidos: grado de cumplimiento de garantías de las demandas, balance hídrico de la cuenca y comparación de resultados obtenidos con el modelo “WEAP” realizado por la ANA.

5.1. INFORMACIÓN PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE GESTIÓN

Para la elaboración del modelo de gestión se debe conocer todos los elementos que realizan aportaciones al sistema: aportaciones de las subcuencas, manantiales, pozos; los elementos que requieren de un cierto suministro: demandas consuntivas y no consuntivos de los distintos usos, elementos de regulación del sistema de explotación, y el régimen de explotación existente.

Toda esta información puede ser comprobada con mayor extensión en el “Anexo 1. Información necesaria para la construcción de los modelos hidrológico y de gestión”.

5.1.1. APORTACIONES

Uno de los datos primordiales del modelo de gestión son las aportaciones de las que dispone el sistema, como se ha comentado anteriormente, éstas se han obtenido del modelo hidrológico de forma que éste genera las aportaciones de cada una de las subcuencas, en base a los parámetros del modelo y los datos de entrada de las subcuencas (precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial).

Como se comentó en el apartado de metodología, una vez el modelo de gestión estuviera montado, gracias a las nuevas características de las últimas versiones de AQUATOOL +, es posible la calibración del modelo hidrológico directamente desde la interfaz del AQUATOOL. En este caso, esto nos permitirá comprobar que la calibración y la naturalización de la serie de caudales se realizaron adecuadamente.

En las siguientes figuras podemos comprobar que los resultados son muy similares, siendo la única diferencia que las series sin naturalizar están desplazadas hacia abajo una distancia equivalente a las demandas abastecidas en la cuenca.

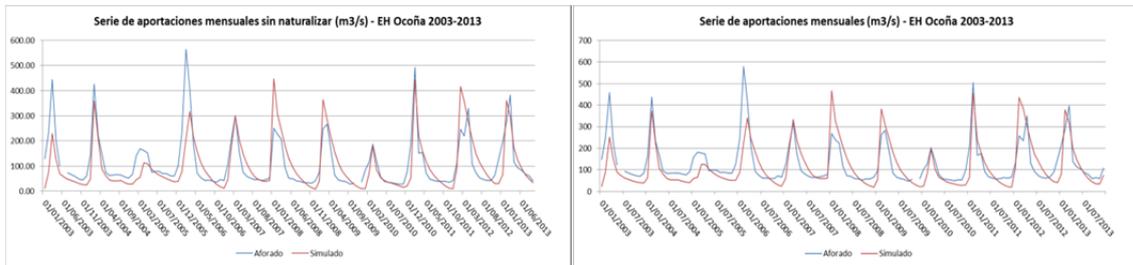


Figura 47. Comparación series de aportaciones mensuales de la serie sin naturalizar (modelo interfaz AQUATOOL +) y naturalizadas (modelo interfaz EvalHid). (Fuente: Elaboración propia).

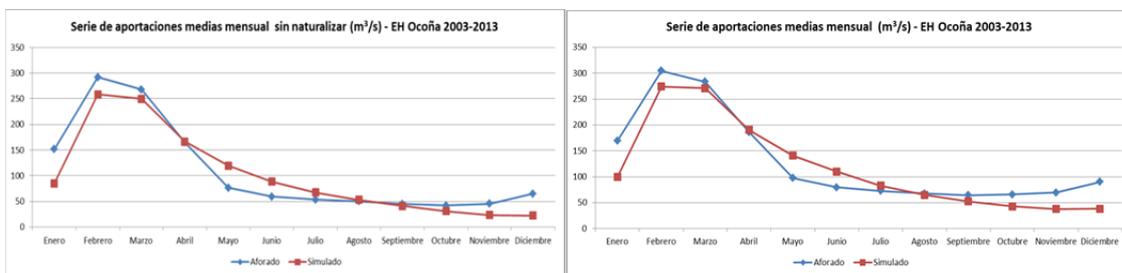


Figura 48. Comparación series de aportaciones medias mensuales de la serie sin naturalizar (modelo interfaz AQUATOOL +) y naturalizadas (modelo interfaz EvalHid). (Fuente: Elaboración propia).

5.1.2. MANANTIALES

En las regiones medias y altas de la cuenca de Ocoña, existen una gran cantidad de demandas que se abastecen de agua procedente de manantiales. Estos manantiales no han sido estudiados lo suficiente, con lo que se desconoce las series históricas de caudales de esos manantiales ni la relación de estos flujos con hidrología de las distintas subcuencas.

Es por ello, que para la realización del modelo se han introducido como una aportación externa de caudal constante, hecho que introduce al modelo una gran incertidumbre.

En la siguiente tabla podemos comprobar los caudales de dichos manantiales.

MANANTIAL	Q (m ³ /s)	MANANTIAL	Q (m ³ /s)
Parinacochas	0.01	Pampamarca	0.28
Pallancata	0.03	Cruzpata	0.13
Pacapausa_MD	1.72	Toro	0.11
Pacapausa_MI	0.31	Andamarca	0.05
Mirmaca	0.06	Charcana	0.14
Oyolo	0.69	Velinga	0.09
Masma	0.53	Puccnanta	0.29
Puica	0.32	Huachuy	0.03
Huaynacota	0.11	Salamanca	0.00
Cotahuasi	0.01	Chichas	0.00
Huacajara	0.41	Chorunga	0.01

Tabla 27. Caudales de aportación de los manantiales en el modelo de gestión de la Cuenca de Ocoña. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).

5.1.3. POZOS

Como ya se comentó en el capítulo 2, la cuenca de Ocoña sólo dispone de dos pozos, que extraen pequeño caudales para satisfacer una demanda minera en el río Oyolo (SC-08), y parte de las demandas de regadío de la Chorunga Baja (SC-25).

Debido al gran desconocimiento sobre el funcionamiento de los acuíferos sobre los que se extrae agua en esos pozos, se introducirán dos acuíferos potenciales, que servirán simplemente para poder abastecer a los pozos. De esta forma se podrán introducir en el modelo estas demandas sin problemas, pero no podrá estudiarse el funcionamiento real de los acuíferos, o su interconexión con el resto de la cuenca.

5.1.4. DEMANDAS

Otro aspecto fundamental del modelo de gestión son las demandas existentes en la cuenca su ubicación geográfica y sobre todo en qué punto de la red hidrográfica se sitúan sus tomas. La Autoridad Nacional del Agua realizó un estudio para poder caracterizar todas las demandas de la cuenca, así como realizar una agrupación de las mismas que permita analizar adecuadamente el sistema de gestión de la cuenca.

En la siguiente tabla se muestran todas las demandas que se han introducido en el modelo de gestión de la cuenca de Ocoña:

Demanda	Q(Hm ³ /año)	Demanda	Q(Hm ³ /año)	Demanda	Q(Hm ³ /año)
Pb01_SC_1	0.27	Pb24_SC_7_mnt	0.12	Rg47_Huachuy	4.14
Pb02_SC_2	0.02	IM25_SC_8	0.04	Pb48_SC_18	0.04
Pb03_SC_3	0.10	Rg26_Oyolo	9.34	Rg49_Quechualla	5.63
Pb04_SC_4	0.06	Pb27_SC_8	0.18	IM50_SC_20,2	0.02
IM05_SC_4_sup	0.68	Rg28_Masma	4.09	Rg51_Salamanca	29.29
IM06_SC_4_mnt	0.03	Pb29_SC_9	0.05	Pb52_SC_21	0.09
Rg07_Ccollota	0.17	Pb30_SC_12	0.04	Rg53_Chichas	18.88
Rg08_Pacapausa_ppal	1.48	Rg31_Puica	10.41	Pb54_SC_22	0.08
Pb09_SC_5,2	0.46	Rg32_Alca	16.26	Rg55_Pampa_Barrera	31.84
Rg10_Pacapausa_MD_sup	15.24	Pb33_SC_15_mnt	0.56	Rg56_SC_24	1.50
Rg11_Pacapausa_MD_mnt	14.93	Rg34_Cotahuasi_1	15.80	IM57_SC_24	0.13
Pb12_SC_5,3	0.05	Rg35_Huaynacotas	5.60	Rg58_SC_25	58.85
Rg13_Pacapausa_MI_sup	12.45	Rg36_Cotahuasi_2	12.03	Pb59_SC_25	0.05
IM14_SC_5,3	0.21	Rg37_Cotahuasi_mnt	7.25	IM60_SC_25	0.19
Rg15_Pacapausa_MI_mnt	5.69	Rg38_Huacajara	28.06	Rg61_Callalli	3.77
IM16_SC_6	0.37	Pb39_SC_17	0.03	Rg62_Chorunga_Baja	3.62
Rg17_Vado	35.54	Rg40_Pampamarca	18.93	IM63_SC_27	0.55
Rg18_Incuyo	18.15	Rg41_Cruzpata	9.54	Pb64_SC_28	0.19
Rg19_Mirmaca	43.17	Rg42_Toro	16.20	Rg65_SC_28	66.79
IM20_SC_07_sup	0.31	Rg43_Andamarca	7.60	Rg66_SC_29	79.53
Rg21_Quilcata	3.21	Rg44_Charcana	16.00	Pb67_SC_29	0.09
Pb22_SC_7_sup	0.41	Rg45_Velinga	7.10		
IM23_SC_7_mnt	0.72	Rg46_Pucnanta	16.28		

Tabla 28. Demandas anuales introducidas en el modelo de gestión de la cuenca de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).

Observando la tabla anterior se puede comprobar que, en la cuenca las demandas agrarias es el tipo de uso que demanda mayor recurso hídrico, muy por encima que las demandas poblacionales y las demandas industriales y mineras.

El 99.08% (654.53 Hm³/año) del caudal de las demandas tienen como destino el uso agrícola, mientras que la demanda poblacional supone un 0.43% (2.92 Hm³/año), y la demanda industrial y minera un 0.49% (3.22 Hm³/año).

Además, las demandas se concentran sobretodo en la zona media del Alto Ocoña (la demanda de las subcuencas SC-05, SC-06 y SC-07 supone el 23% del total), en el tramo medio y bajo del río Cotahuasí (la demanda de las subcuencas SC-15, SC-17 y SC-18 supone el 28% del total), y la zona baja de la cuenca del río Ocoña (la demanda de las subcuencas SC-25, SC-28 y SC-29 supone el 32% del total).

Por último, dado que los regadíos supone una gran importancia en las demandas, es fundamental tener en cuenta los retornos de los regadíos que vuelven al cauce natural del río. Estos retornos dependen de la eficiencia de los riegos existentes, pero no se disponen de datos de los mismos, es por ello que la ANA realizó una estimación de los retornos para los regadíos de la cuenca:

Regadíos	Retornos	Regadíos	Retornos
Rg07_Collota	0%	Rg38_Huacajara	40%
Rg08_Pacapausa_ppal	40%	Rg40_Pampamarca	27%
Rg10_Pacapausa_MD_sup	40%	Rg41_Cruzpata	0%
Rg11_Pacapausa_MD_mnt	33%	Rg42_Toro	0%
Rg13_Pacapausa_MI_sup	40%	Rg43_Andamarca	0%
Rg15_Pacapausa_MI_mnt	20%	Rg44_Charcana	0%
Rg17_Vado	40%	Rg45_Velinga	25%
Rg18_Incuyo	40%	Rg46_Pucnanta	30%
Rg19_Mirmaca	40%	Rg47_Huachuy	0%
Rg21_Quilcata	40%	Rg49_Quechualla	40%
Rg26_Oyolo	40%	Rg51_Salamanca	40%
Rg28_Masma	40%	Rg53_Chichas	50%
Rg31_Puica	40%	Rg55_Pampa_Barrera	50%
Rg32_Alca	40%	Rg58_SC_25	0%
Rg34_Cotahuasi_1	47%	Rg61_Callalli	0%
Rg35_Huaynacotas	0%	Rg62_Chorunga Baja	0%
Rg36_Cotahuasi_2	50%	Rg65_SC_28	60%
Rg37_Cotahuasi_mnt	40%	Rg66_SC_29	60%

Tabla 29. Valores de retornos de riego estimados en las demandas agrarias del río Ocoña. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).

Además, estimó que las demandas poblacionales mineras e industriales tienen un coeficiente de retorno del 80%.

5.1.5. CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHOCOCO

La central hidroeléctrica de Chococo, tiene un caudal a turbinar de 1.24 m³/s, por lo que la demanda que tendrá (no consuntiva) se resume en la tabla siguiente:

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
CH Chococo	3.321216	2.999808	3.321216	3.21408	3.321216	3.21408	3.321216	3.321216	3.21408	3.321216	3.21408	3.321216

Tabla 30. Demanda hidroenergética mensual de la CH de Chococo en Hm³. (Fuente: Elaboración propia).

5.1.6. EMBALSES Y LAGUNAS

De los 3 embalses operativos mencionados en el apartado 2.5.1., tan sólo se ha modelado uno de ellos, el embalse de Llawanchocha, además se han incluido las dos lagunas más relevantes de la cuenca, la laguna de Parinacochas y la laguna de Huanzo.

Ambas lagunas no tienen capacidad de regulación, y el embalse no abastece a ninguna demanda, con lo que su introducción en el modelo se ha realizado únicamente para conocer las posibilidades que nos ofrecen dichos embalses para paliar posibles desabastecimientos en la cuenca y por similitud al modelo realizado por la ANA.

Las características de los embalses han sido estimadas por la ANA (ANA, 2015):

Laguna	Capacidad máxima (Hm ³)	Superficie (Ha)	Profundidad estimada (m)
Laguna de Parinacochas	101.040	6736.00	1.50
Laguna Huanzo	4.963	124.10	4.00
Embalse Llawancocha	0.017	1.70	1.00

Tabla 31. Características de las lagunas y embalses modelados en la cuenca de Ocoña. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).

Además, también realizó estimaciones de la tasa de evaporación en los distintos embalses/lagunas:

Laguna	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Laguna de Parinacochas	132.8	118.1	120.9	100.1	86.2	72.0	77.8	89.8	108.1	126.5	132.1	139.6
Laguna Huanzo	125.3	111.5	114.5	95.1	82.5	69.9	75.8	87.8	101.3	122.2	125.3	129.6
Embalse Llawancocha	122.7	107.4	116.5	92.9	81.5	71.2	71.7	84.6	97.6	120.1	124.7	121.4

Tabla 32. Tasa de evaporación media mensual en los embalses y lagunas modelados. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).

5.1.7. RÉGIMEN DE EXPLOTACIÓN

El régimen de explotación de la cuenca es bastante sencillo debido a que no existen elementos de regulación:

- Los embalses existentes no sirven como elementos de regulación en la actualidad, y por tanto no es necesario fijar volúmenes objetivos ni órdenes de prioridad.
- Sólo existe un tramo en el que se haya considerado la necesidad de fijar un caudal ecológico (tal y como designó la ANA en su modelo). Éste tramo corresponde con el tramo aguas abajo de la toma de la central hidroeléctrica de Chococo, en el punto de salida de la subcuenca SC-13. El tramo acaba en el punto de retorno de la central, sin llegar a afectar a otras demandas.

Para determinar el caudal ecológico de este tramo se ha seguido el criterio definido en el apartado de metodología.

Caudal ecológico en el tramo de la central hidroeléctrica Chococo

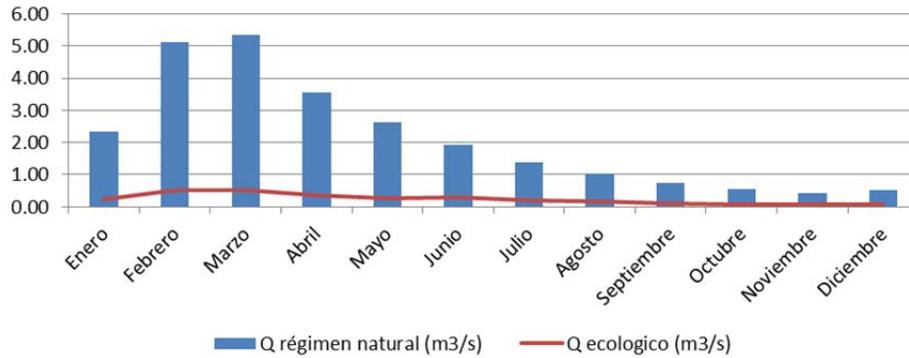


Figura 49. Caudales en régimen natural y ecológicos mínimos en el tramo aguas abajo de la CH Chococo. (Fuente elaboración propia).

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Q régimen natural (m³/s)	2.34	5.13	5.34	3.55	2.63	1.91	1.39	1.02	0.76	0.56	0.42	0.51
Q ecológico (% Q _{RN})	10%	10%	10%	10%	10%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%
Q ecológico (m³/s)	0.23	0.51	0.53	0.36	0.26	0.29	0.21	0.15	0.11	0.08	0.06	0.08

Tabla 33. Caudales en régimen natural y ecológicos mínimos en el tramo aguas abajo de la CH Chococo. (Fuente elaboración propia).

- En el modelo se fijan las prioridades sobre las tomas de las distintas demandas, y en este caso, sobre el tramo que dispone de un caudal mínimo ecológico. Dichas prioridades se han considerado de acuerdo a la Ley de Recursos Hídricos del Perú de 2009, y del modelo de gestión realizado por la ANA en la cuenca:

Uso	Prioridad en el modelo
Poblacional	1
Ecológico	2
Agrícola	De 3 a 6
Energético	7
Industrial	8
Minero	9

Tabla 34. Orden de prioridad en el modelo. (Fuente: Autoridad Nacional del Agua de Perú).

En el caso de las demandas agrícolas se les ha dado mayor prioridad a las que están más cerca de los puntos de aportaciones, pues normalmente toman el recurso antes que el resto de demandas.

5.2. MODELO DE GESTIÓN

Para realizar el análisis de la gestión del río se ha dividido el sistema de la cuenca de Ocoña en una serie de subsistemas, que nos permitirá realizar un adecuado análisis de las distintas zonas de la cuenca. Esta subdivisión de la cuenca coincide con la realizada por la ANA en su modelo de gestión:



Figura 50. Plano de subsistemas del análisis del modelo de gestión de la cuenca de Ocoña. (Fuente Elaboración propia).

En ella se puede comprobar que se han agrupado las subcuencas para reducir el número de elementos del sistema:

SUBSISTEMA	Subcuencas agrupadas
Parinacochas	SC-01
Pacapausa-Pallancata	SC-02 a SC-05.03
Mirmaca	SC-06 y SC-07
Oyolo-Marán	SC-08 y SC-09
Alto-medio Cotahuasí	SC-10 a SC-15
Pampamarca-Bajo Cotahuasí	SC-16 a SC-18
Arma-Chichas	SC-20.01 a SC-22
Ocoña Valle	SC-19 y SC-23 a SC-29

Figura 51. Agrupación de subcuencas en los distintos subsistemas. (Fuente: Elaboración propia).

En el esquema del modelo se ha empleado simbología propia del software "AQUATOOL +" (representación de los elementos mediante símbolos), y nomenclatura para facilitar la comprensión del modelo:

- Las aportaciones se representan con flechas de contorno rojo. Encontramos dos tipos de aportaciones: manantiales cuyo nombre comienza por “Mnt” y las que provienen de la escorrentía cuyo nombre comienza por “Apo” y además, vienen precedidas de un símbolo que representa a las subcuencas modeladas.
- Las demandas consuntivas se representan con un cuadrado de contorno verde, y se diferencian tres tipos: regadío (comienzan por “Rg”), poblacional (comienzan por “Pb”) e industrial y minera (comienzan por “IM”).
- La única demanda no consuntiva es la central hidroeléctrica y es simbolizada con el símbolo de la corriente alterna en color rojo.
- Los embalses se simbolizan con un triángulo de color rojo.
- Los nudos son círculos de color negro, y comienzan por la letra “N”.
- Los distintos tramos de río, se simbolizan con líneas negras que comienzan por “C”.
- Las tomas son líneas discontinuas de color negro, y comienzan por “T”.
- Los retornos son líneas discontinuas de color negro con un símbolo de flecha circular marrón, y cuyo nombre comienza por “Ret”
- Los acuíferos se representan con octógonos de contorno marrón.

A continuación, se muestra el esquema del modelo en toda la cuenca, y posteriormente se ira realizando una explicación del mismo en cada una de los subsistemas.

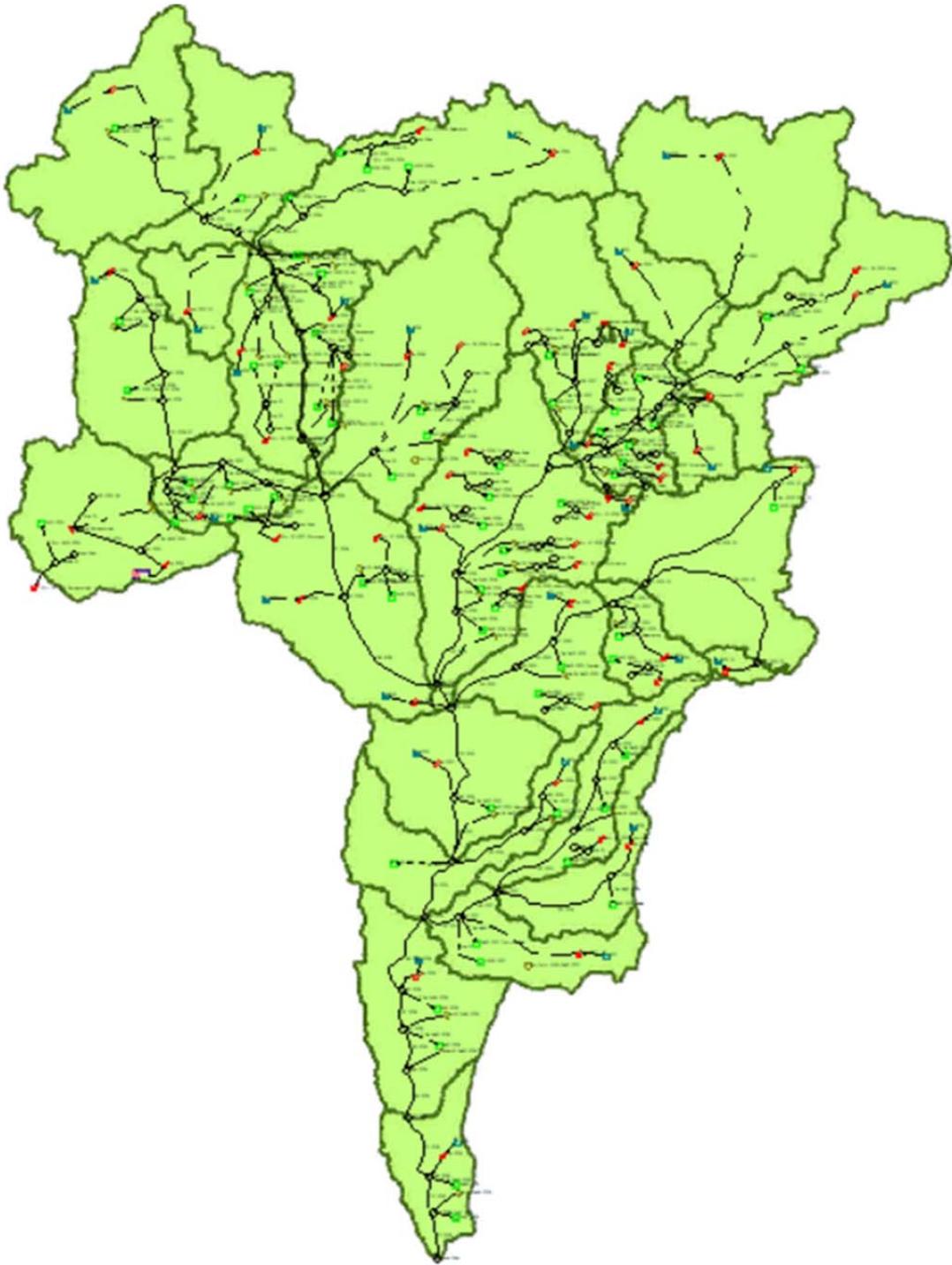


Figura 52. Esquema del modelo de gestión de la cuenca del río Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).

5.2.1. SUBSISTEMA DE PARINACOCHAS

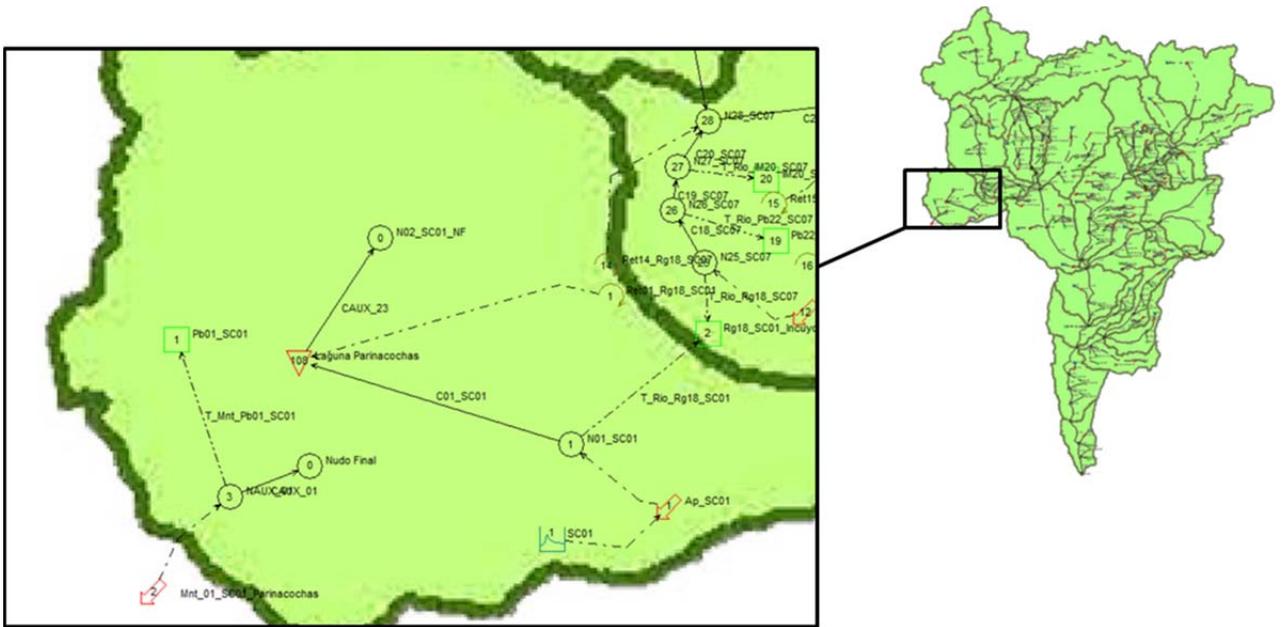


Figura 53. Detalle del subsistema de Parinacochas. (Fuente: elaboración propia).

Coincide con la subcuenca SC-1. Tan sólo contiene una demanda poblacional que se abastece de manantial, aunque también hay una toma y un retorno de los regadíos de Incuyo situados en parte en la SC-01 y en la SC-06. Además, también nos encontramos con la laguna de Parinacochas, que recibe las aguas de la cuenca.

5.2.2. SUBSISTEMA PACAPUSA-PALLANCATA

Comprende desde la SC-02 hasta la SC-05.03. En la parte más alta (SC-02 y SC-03) sólo existen dos demandas poblacionales, que se abastecen del río; en el río Pallancata (SC-04) existe un manantial que abastece a una demanda minera y una demanda poblacional, además hay una demanda de riego y otra demanda minera que se abastecen del río; el río Pacapusa (SC-05.01, SC-05.02 y SC-05.03) contiene 8 demandas: un manantial abastece a una población, un regadío y una minería, y otro manantial abastece a una población y a un regadío, las otras 3 demandas son regadíos que se abastecen de quebradas que vierten en el río.

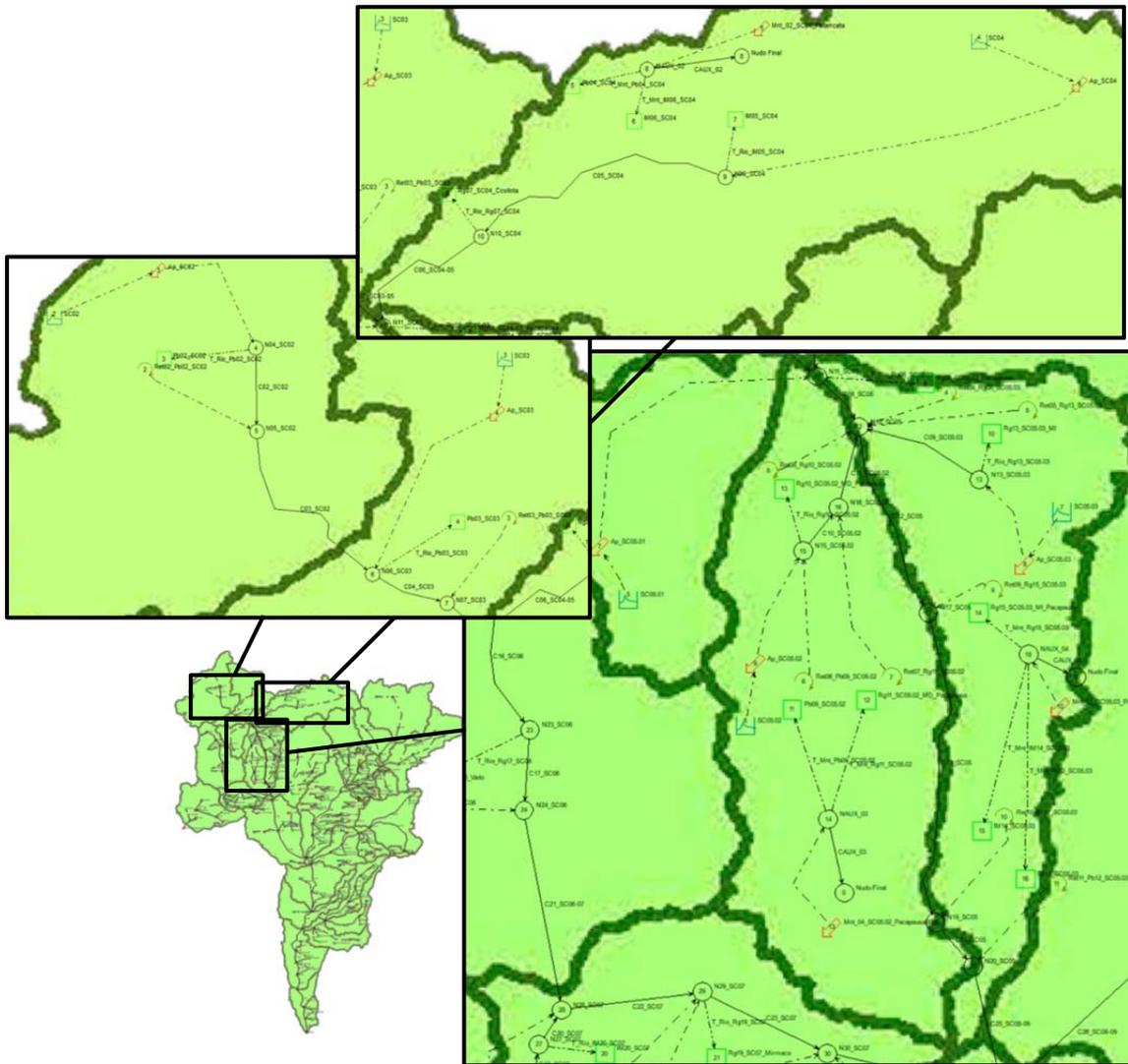


Figura 54. Detalle del subsistema de Pacapausa-Pallancata. (Fuente: elaboración propia).

5.2.3. SUBSISTEMA MIRMACA

Comprende las subcuencas SC-06 y SC-07. La subcuenca SC-06 tiene una demanda de minería y otra de regadío que se abastecen del cauce fluvial; por su parte la subcuenca SC-07 tiene 7 demandas, 3 de ellas (una población, una minera y una de regadío) se abastece de un manantial, las otras 4 (2 regadíos, una poblacional y una de minería) se abastecen del río o de las quebradas que vierten al mismo, además el regadío de Incuyo, como se comentó anteriormente, también se abastece de las quebradas de la laguna de Parinacochas (SC-01), situándose físicamente en ambas subcuencas.

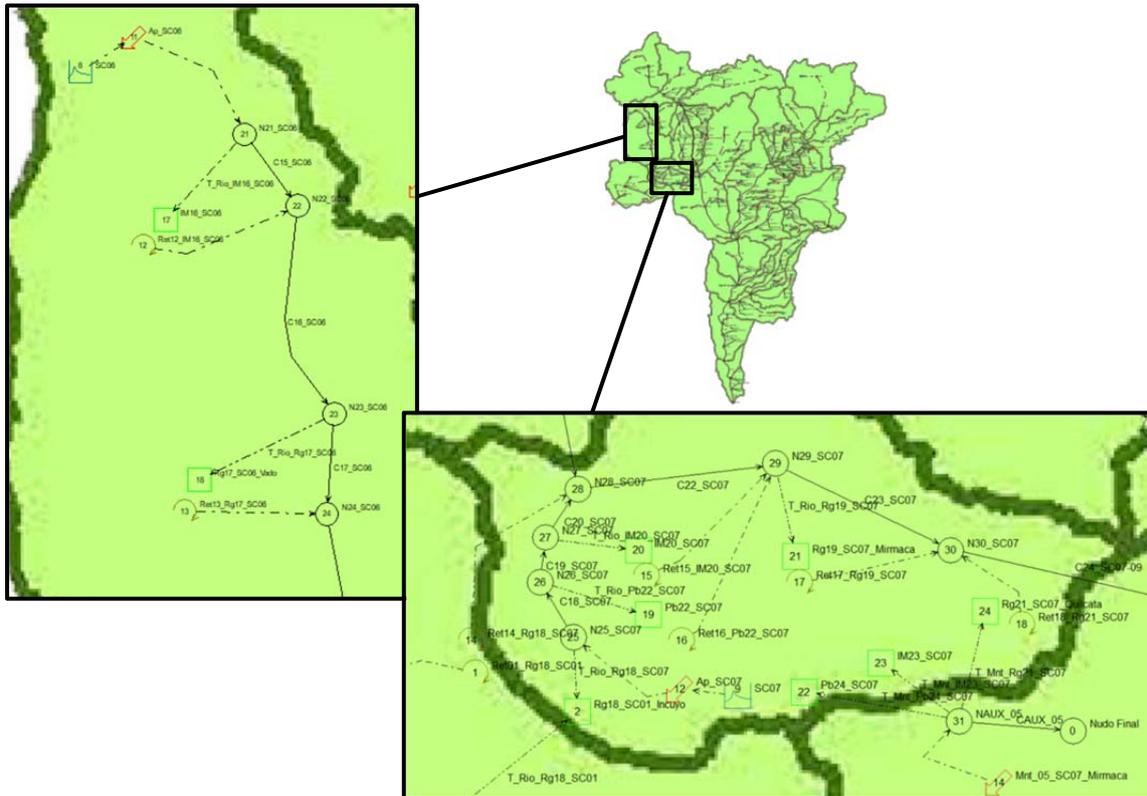


Figura 55. Detalle del subsistema de Mirmaca. (Fuente: elaboración propia).

5.2.4. SUBSISTEMA OYOLO-MARÁN

Comprende las subcuencas SC-08 y SC-09. En la subcuenca SC-08, hay un manantial que abastece un regadío y a una población, y también existe una demanda minera que se abastece del río Oyolo (afluente del Marán) y de un pozo. En la subcuenca SC-09 (tramo final del Marán o Alto Ocoña), las dos demandas existentes (una de regadío y otra poblacional) se abastecen de un manantial.

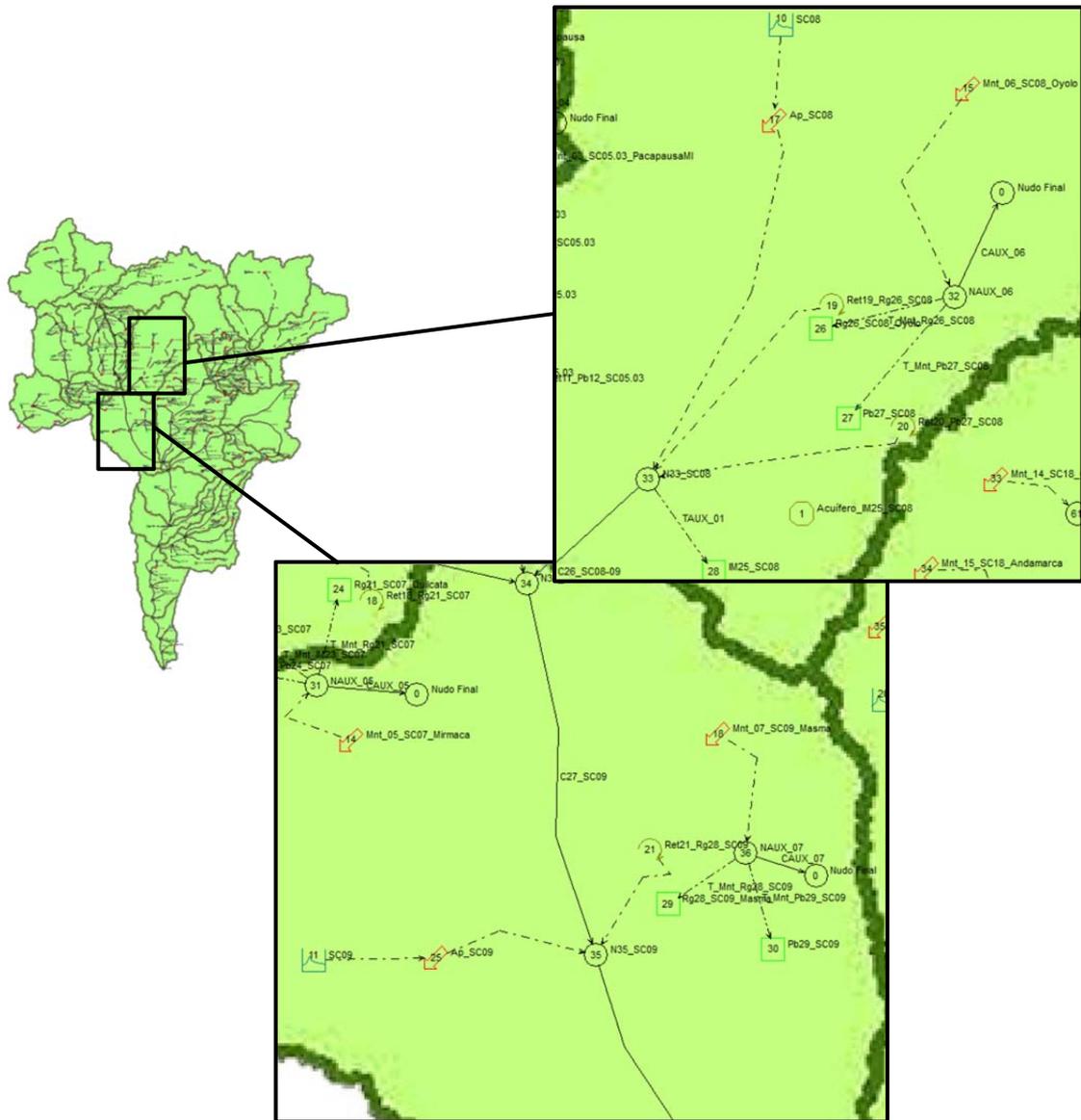


Figura 56. Detalle del subsistema de Oyolo-Marán. (Fuente: elaboración propia).

5.2.5. SUBSISTEMA ALTO-MEDIO COTAHUASI

Comprende desde la subcuenca SC-10 hasta la SC-15, constituyendo la parte alta y media del río Cotahuasí, afluente del río Ocoña. En el alto Cotahuasí (SC-10 y SC-11) no hay demandas; el afluente Sumana (SC-12) abastece a una población, y en esa misma subcuenca existe un regadío que se abastece de un manantial; en el río Chococo (SC-13), sólo se abastece a la central hidroeléctrica de mismo nombre; la subcuenca (SC-14) corresponde con el embalse de Llawancocha; por último la subcuenca (SC-15) corresponde con el medio Cotahuasí, y en ella existen 7 demandas, 3 regadíos y un abastecimiento de población son abastecidos por 3 manantiales, mientras que las otras 3 demandas corresponden con 3 regadíos que recogen agua del cauce fluvial.

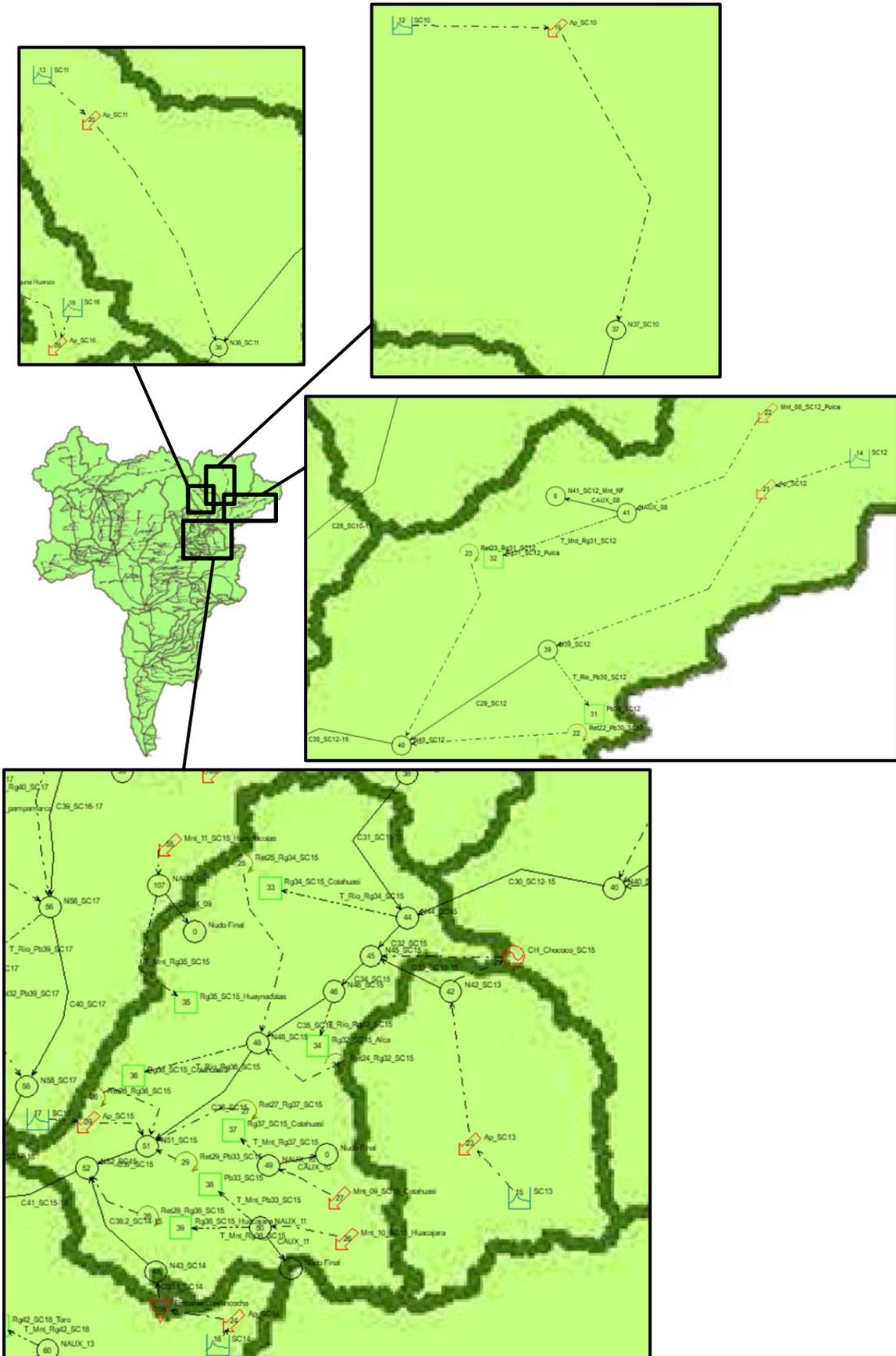


Figura 57. Detalle del subsistema de Alto-Medio Cotahuasi. (Fuente: elaboración propia).

5.2.6. SISTEMA DE PAMPAMARCA Y BAJO COTAHUASÍ

Comprende las subcuencas SC-16, SC-17 y SC-18. La subcuenca SC-16 corresponde con la laguna de Huanzo, ésta se encuentra dentro de la cuenca del río Pampamarca (SC-17), en la cual existe un regadío que se abastece de manantial y una población con una toma en el río; en la cuenca del Bajo Cotahuasí (SC-18) nos encontramos con 7 regadíos abastecidos por 7 manantiales, y una demanda poblacional y otra de regadío que se abastecen del río.

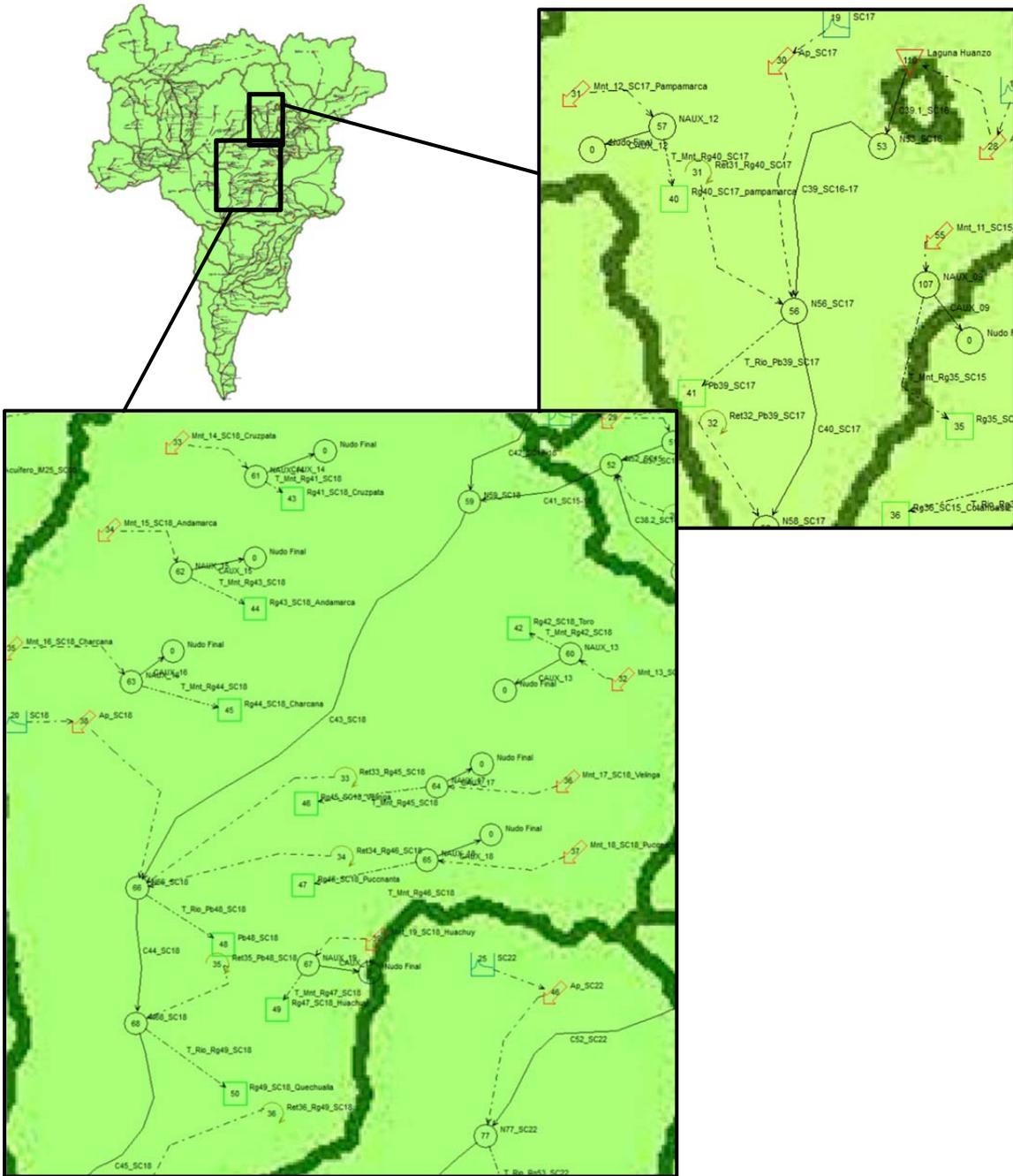


Figura 58. Detalle del subsistema de Pampamarca-Bajo Cotahuasí. (Fuente: elaboración propia).

5.2.7. SUBSISTEMA ARMA-CHICHAS

Comprende las subcuencas SC-20.01, SC-20.02, SC-21 y SC-22. La parte más alta del río Arma-Chichas corresponde con el nevado Coropuna (SC-20.01), además, en la parte alta de su cuenca abastece a una industria minera (SC-20.02); en la subcuenca SC-21 nos encontramos con una población abastecida mediante manantial y a un regadío que se abastece de una quebrada que vierte al río; en la parte baja del río (SC-22) también nos encontramos con una población abastecida mediante manantial y un regadío que se abastece del río.

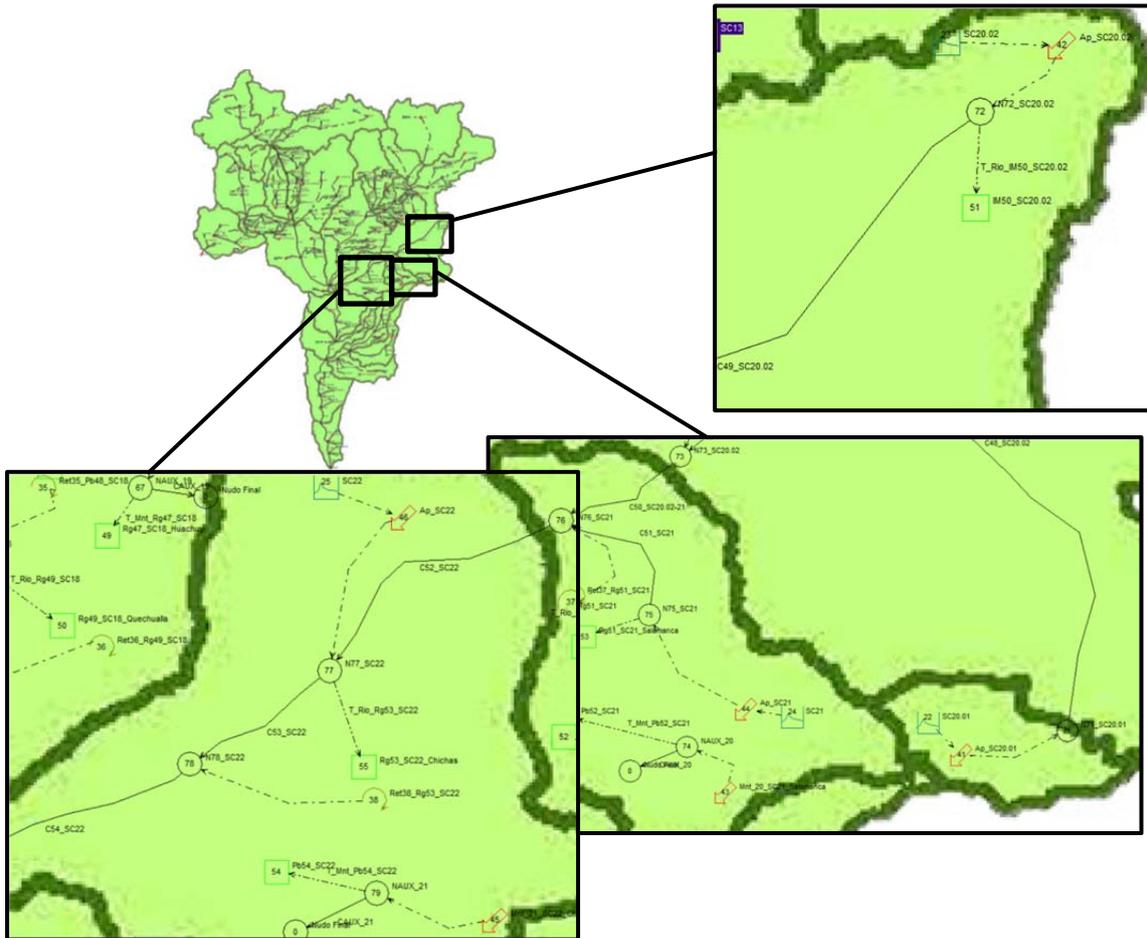


Figura 59. Detalle del subsistema de Arma-Chichas. (Fuente: elaboración propia).

5.2.8. SUBSISTEMA OCOÑA VALLE

Este subsistema abarca la intercuenca del medio Ocoña (SC-19), el río Chorunga (SC-25, SC-26 y SC-27), y el valle del río Ocoña (SC-23, SC-24, SC-28 y SC-29). La intercuenca (SC-19) no tiene ninguna demanda; la subcuenca SC-25 tiene una demanda de regadío y otra poblacional que se abastecen del río, y una demanda minera que se abastece de manantial; en la subcuenca SC-26 hay un regadío que se abastece del río; en la subcuenca SC-27 encontramos un acuífero que abastece a una demanda minera y otra agrícola en las épocas secas. En cada subcuenca de la zona del

valle de Ocoña encontramos un regadío que se abastece del cauce, además en la subcuenca SC-24 hay una demanda minera que se abastece de una quebrada que vierte al río, y tanto en la subcuenca SC-28 como en la SC-29 hay una demanda poblacional con toma en el cauce del río.

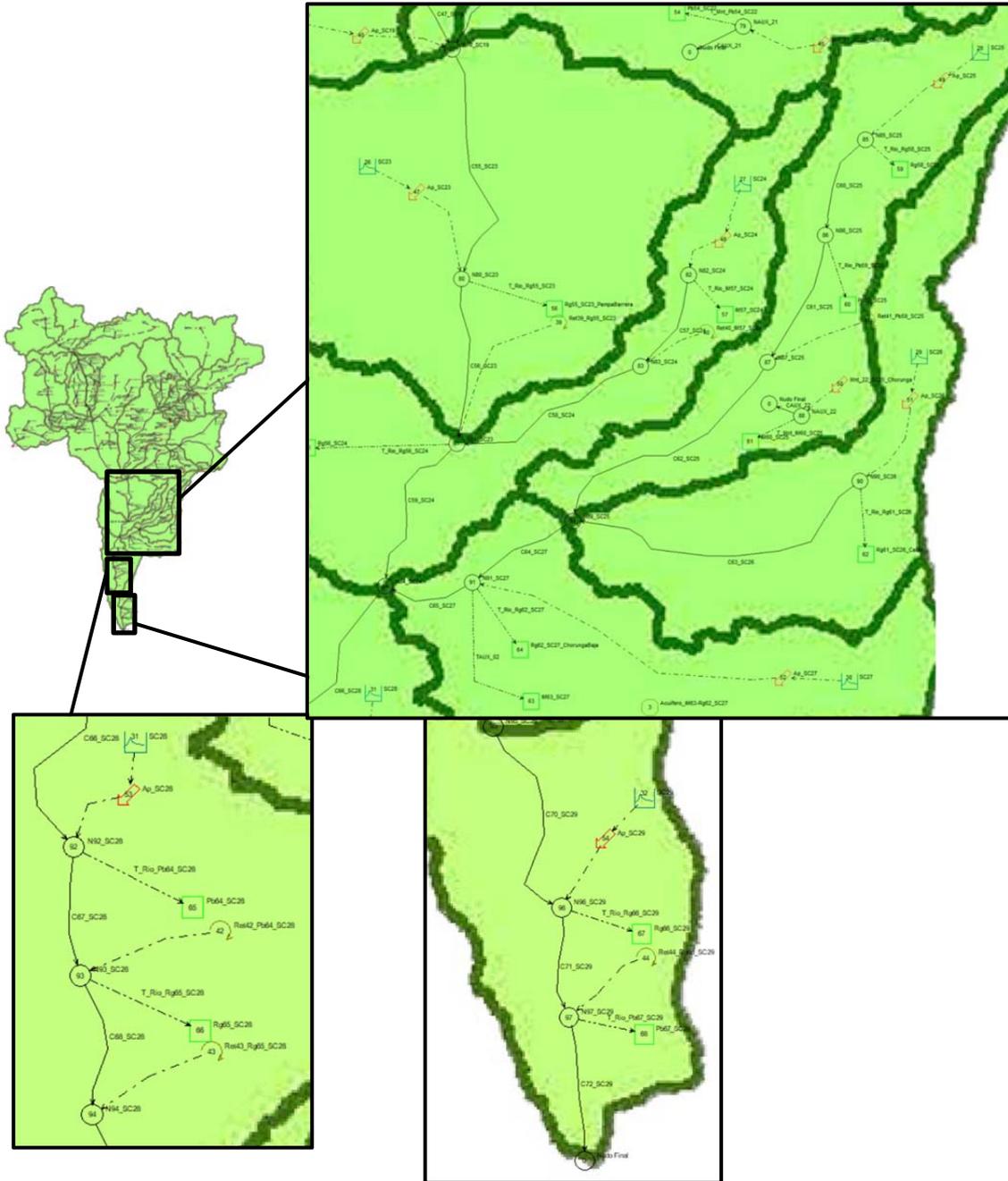


Figura 60. Detalle del subsistema de Ocoña Valle. (Fuente: elaboración propia).

5.3. RESULTADOS DEL MODELO DE GESTIÓN

En la siguiente tabla podemos comprobar un resumen de las garantías obtenidas en cada uno de los subsistemas en los que se ha dividido el modelo:

Subsistema	Demanda poblacional		Demanda agrícola			Demanda industrial y minera	
	Mensual	Volumétrica	Anual	Mensual	Volumétrica	Mensual	Volumétrica
Parinacochas	100%	100%	-	-	-	-	-
Pacapausa-Pallancata	100%	100%	51%	62%	78%	75%	88%
Mirmaca	100%	100%	15%	45%	73%	19%	32%
Oyolo-Marán	100%	100%	100%	100%	92%	100%	100%
Alto-medio Cotahuasi	100%	100%	0%	25%	69%	-	-
Pampamarca-Bajo Cotahuasi	100%	100%	0%	17%	37%	-	-
Arma-Chichas	100%	100%	28%	39%	70%	100%	100%
Ocoña Valle	100%	100%	60%	47%	81%	100%	100%

Figura 61. Garantías de servicio de las demandas en los distintos subsistemas del modelo de gestión de la cuenca de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).

Observando la tabla, se puede comprobar que todas las demandas de abastecimiento urbano son abastecidas con un 100% de garantías, en cambio en algunos subsistemas se producen grandes déficits tanto en las demandas agrícolas como en las industrias y minerías.

Las demandas de industrias y minerías a lo largo de toda la cuenca son muy bajas, pero al tener un orden de prioridad más bajo que el resto de demandas, sólo se llegan a suplir parcialmente, y cuando hay suficiente recurso. Teniendo en cuenta que sus demandas son del orden de 10-100 veces inferiores a las de demanda agrícola se podría tomar la decisión de darle un orden de prioridad más alto para que no se produzcan estos fallos tan importantes en las garantías.

En algunos casos, los déficits se producen de forma sistemática debido a ser abastecidos por manantiales con capacidad insuficiente, mientras que en otros casos, las demandas tienen tomas en ríos donde las demandas agrarias copan el recurso, impidiendo que las industrias y minerías puedan abastecerse, esto se debe a que disponen de un orden de prioridad mayor.

A continuación, se analizará los resultados obtenidos en las demandas agrícolas en cada uno de los subsistemas, a excepción del subsistema de Parinacochas y del Oyolo-Marán, ya que las garantías se satisfacen sin problemas.

5.3.1. SUBSISTEMA PACAPAUZA-PALLANCATA

En este subsistema en los regadíos que tienen tomas en manantiales no se producen déficits, en cambio, en los dos regadíos con tomas en las quebradas del río Pacapausa (SC-05), se observan importantes déficits en la serie histórica debido a la falta de recursos existente en la zona donde se sitúan las tomas, provocando el fallo en las garantías del subsistema.

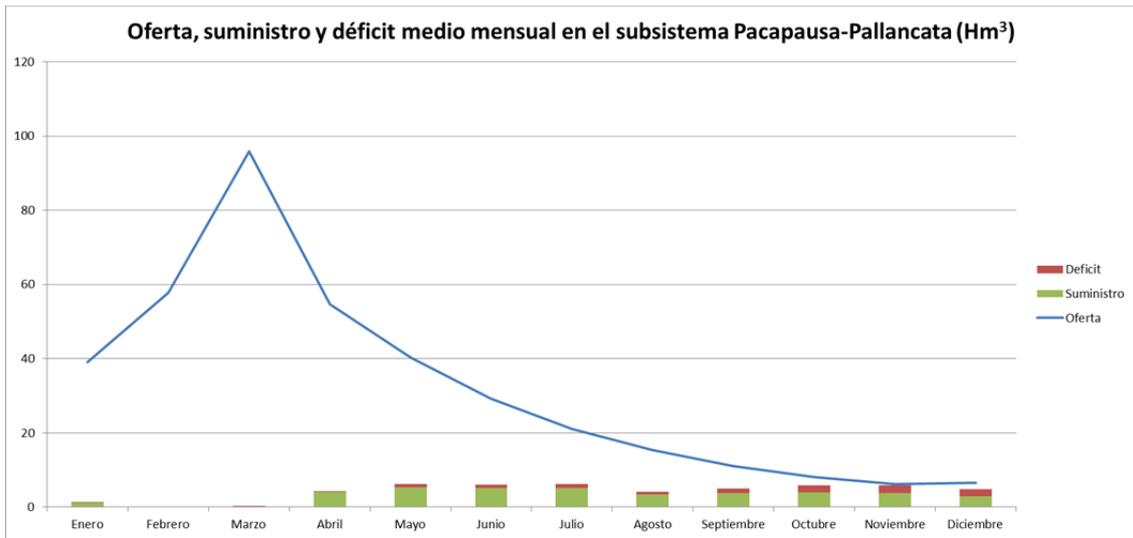


Figura 62. Oferta, suministro y déficit medio mensual en el subsistema Pacapausa-Pallancata. (Fuente: Elaboración propia).

Observando la gráfica anterior, podemos comprobar que en realidad, el subsistema tiene suficiente capacidad de recursos como para abastecer las demandas (al menos en valores medios), por lo tanto, podríamos deducir que gran parte de los fallos que se producen en el abastecimiento se podrían resolver si las tomas se ubicaran en el mismo cauce del río, en lugar de las quebradas.

En el caso de las demandas de industrias y minerías, los fallos se deben fundamentalmente a la demanda IM14, que toma agua de un manantial con capacidad insuficiente de suministro.

5.3.2. SUBSISTEMA MIRMACA

En este subsistema se observan grandes déficits tanto en la demanda agraria como en la demanda industrial y minera, llegando a alcanzar déficits por debajo del 20%.

En primer lugar, es necesario comentar el caso de la demanda de regadío de Incuyo (Rg_18), esta demanda sufre de forma sistemática déficits debido a la falta de capacidad de sus tomas; si se supliera esta falta de capacidad (0.57 m³/s), se podría suministrar suficiente agua, pudiendo en muchos casos elegir la fuente de estos recursos: SC-01 ó SC-07.

En el regadío Rg21_Quilcata, a pesar de tener una demanda muy pequeña, aparecen déficits debido a que toma el recurso de manantial.

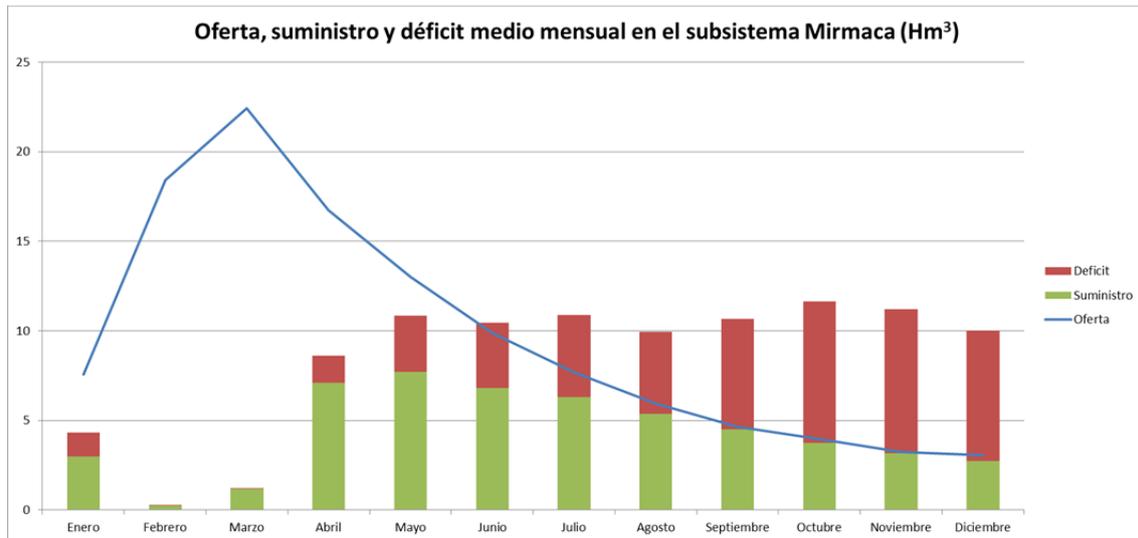


Figura 63. Oferta, suministro y déficit medio mensual en el subsistema Mirmaca. (Fuente: Elaboración propia).

Observando la figura 63, se puede comprobar que por un lado, en algunos meses donde hay una oferta media suficiente para abastecer las demandas se producen déficits, esto se debe a que son valores medios y por tanto, hay años en los que en esos meses la oferta no es suficiente, y también puede deberse a lo que sucede en los regadíos de Inca y Quilcata.

Por otro lado, también se observa una clara insuficiencia de recursos en los periodos de sequía, lo cual supone importantes déficits en la demanda. Estos déficits, probablemente podrían ser resueltos si se introdujesen elementos de regulación como presas, o mediante el uso de recursos subterráneos.

En el caso de las demandas de industrias y minerías, los fallos se producen de forma similar en las 3 demandas; estos déficits se debe a que en las cercanías de sus tomas existen otras demandas agrarias con mayor prioridad que a su vez tienen déficits. Al ser demandas de escaso caudal (0,03-0,06 Hm³/mes), si se priorizara las demandas industriales y mineras para que al menos alcanzasen los criterios mínimos de garantías, se podrían obtener buenos resultados sin afectar demasiado a las demandas agrarias, que requieren caudales mucho mayores (0.3-5 Hm³/mes).

5.3.3. SUBSISTEMA ALTO-MEDIO COTAHUASÍ

Observando la figura 64, podemos comprobar que en todo caso, la oferta es suficiente para abastecer las demandas, a pesar de ello se produce importantes déficits.

Estos se deben a que existen importantes regadíos que se abastecen de manantial, pero el caudal aportado por dichos manantiales no es suficiente, provocando déficits de forma sistemática.

Por otro lado, los regadíos con tomas en los ríos sufren déficits puntuales a lo largo de toda la serie, afectando minoritariamente a las garantías del subsistema.

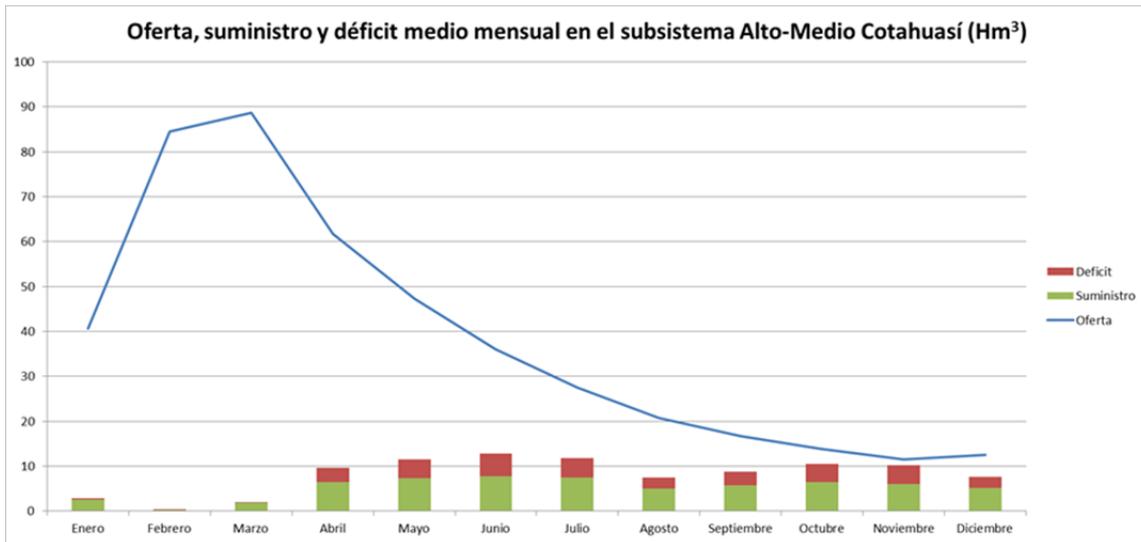


Figura 64. Oferta, suministro y déficit medio mensual en el subsistema Alto-Medio Cotahuasí. (Fuente: Elaboración propia).

5.3.4. SUBSISTEMA PAMPAMARCA-BAJO COTAHUASÍ

Este caso es similar al anterior, donde existen importantes regadíos cuyos déficits se producen de forma sistemática por abastecerse de manantiales que no aportan un caudal suficiente.

Del mismo modo, se producen algunos déficits puntuales en los otros regadíos, pero sin afectar de forma importante a las garantías.

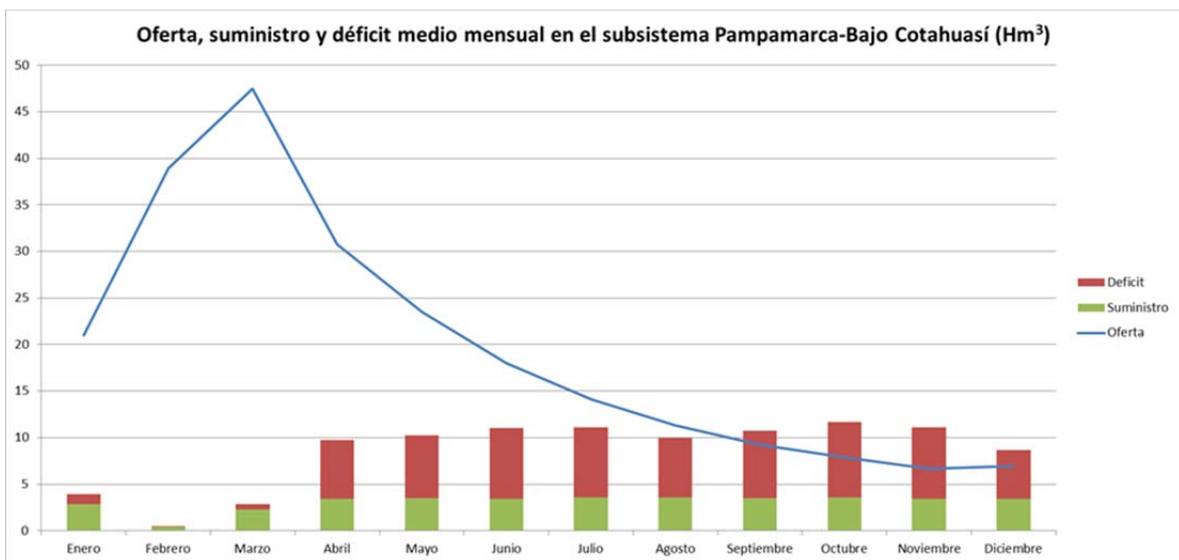


Figura 65. Oferta, suministro y déficit medio mensual en el subsistema Pampamarca-Bajo Cotahuasí. (Fuente: Elaboración propia).

Al contrario que sucedía anteriormente, si comprobamos la gráfica de oferta, suministro y déficit medio mensual, podemos comprobar que si los regadíos tuvieran tomas en el río, seguirían habiendo meses en los que se producirían desabastecimientos, es por ello, que en tal caso, además de las tomas sería necesario una infraestructura de regulación, o el empleo de recursos subterráneos si los hubiese.

5.3.5. SUBSISTEMA ARMA-CHICHAS

Los déficits observados en este subsistema se deben al regadío Rg51, este regadío tiene su toma en las quebradas de la subcuenca SC-21 que vierten al Arma-Chichas. La escasez de recursos hídricos generados en esta subcuenca provoca continuos fallos en las garantías del subsistema.

Observando la gráfica de recursos, suministros y déficit medios mensuales del subsistema Arma-Chichas, podemos comprobar que el recurso hídrico disponible en el subsistema es suficiente para abastecer las demandas, para ello sería necesario disponer la toma del regadío en el cauce del río Arma-Chichas:

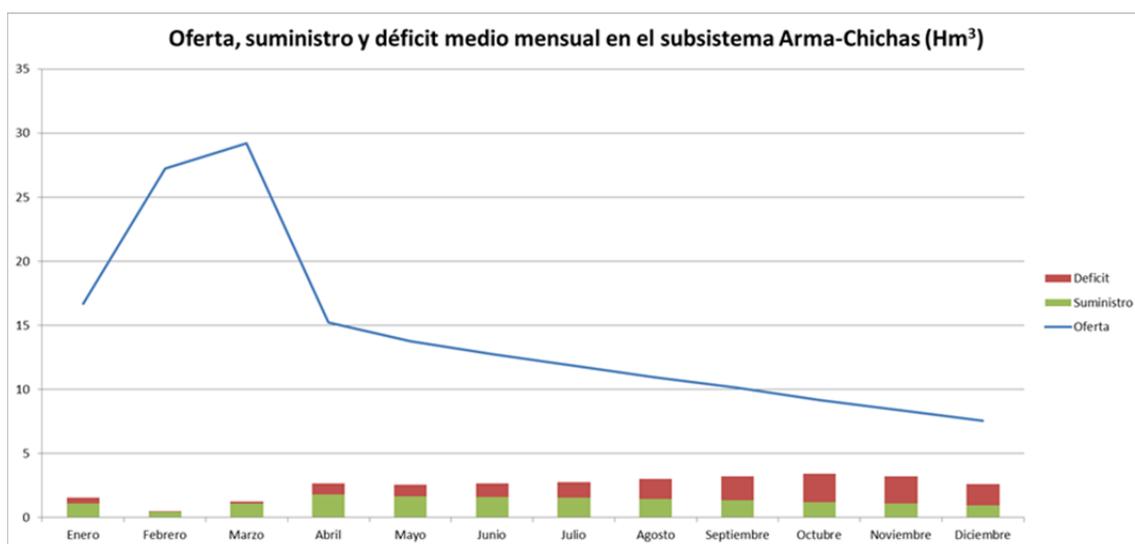


Figura 66. Oferta, suministro y déficit medio mensual en el subsistema Arma-Chichas. (Fuente: Elaboración propia).

5.3.6. SUBSISTEMA OCOÑA VALLE

En este subsistema las demandas que fallan principalmente son los regadíos Rg58 en la SC-25, y el Rg61_Callalli en la subcuenca SC-26.

Ambos regadíos se encuentran en la parte alta de sus subcuencas, de forma que los recursos hídricos disponibles son más limitados que en la parte baja del subsistema.

El Rg58 es un regadío importante con demandas que superan los 6 Hm³ en los meses de octubre y noviembre, esto sumado a que su toma se sitúa en la quebrada

Chorunga lleva a que se produzcan fallos en las garantías de forma sistemática en la mayor parte del año.

Por su parte, el Rg61 sufre desabastecimientos puntuales en los meses secos de los años con mayores sequías, esto provoca un número de fallos significativos a lo largo de la serie, aunque en valor medio la subcuenca dispone de recurso suficiente.

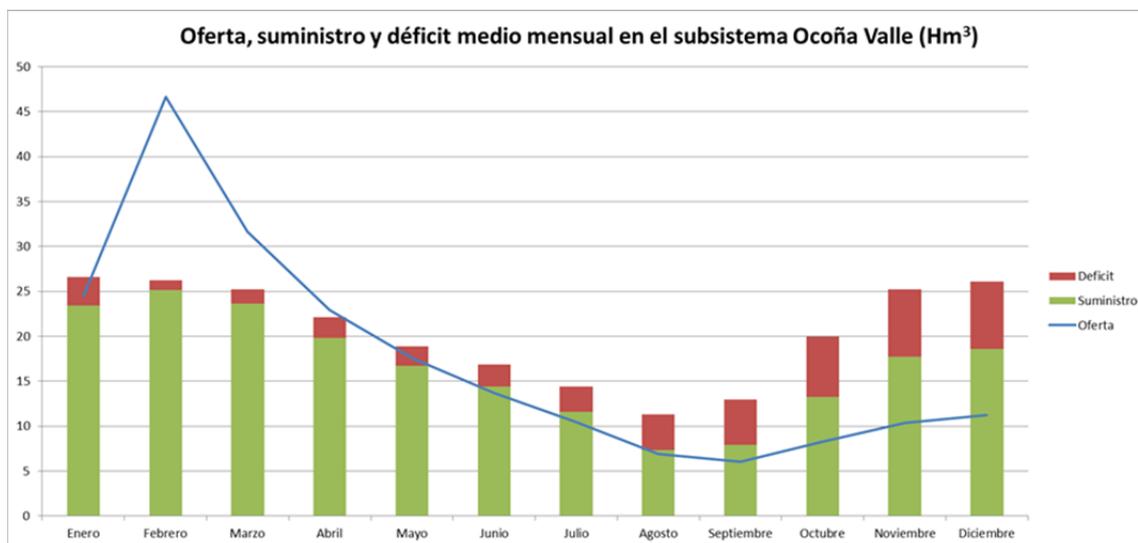


Figura 67. Oferta, suministro y déficit medio mensual en el subsistema Ocoña Valle. (Fuente: Elaboración propia).

Observando la gráfica de oferta, suministro y déficit medio mensual del subsistema, podemos comprobar como las demandas son superiores a la oferta del subsistema en la mayor parte del año, incluso comprobamos que los suministros llegan a superar a la oferta; esto se debe a que las demandas se satisfacen gracias al agua que recibe el subsistema de las subcuencas situadas aguas arriba y que no es consumida previamente.

De hecho la cantidad de agua que llega al valle de Ocoña es suficiente como para abastecer todas sus demandas sin producirse déficits. Aunque para evitar esos déficits en los regadíos citados anteriormente deberían disponer de tomas en el cauce principal del río Ocoña.

5.3.7. RESULTADOS EN LOS EMBALES Y LAGUNAS

En la siguiente figura podemos comprobar los resultados obtenidos en el embalse de Llawancocha y las lagunas de Parinacochas y Huanzo:

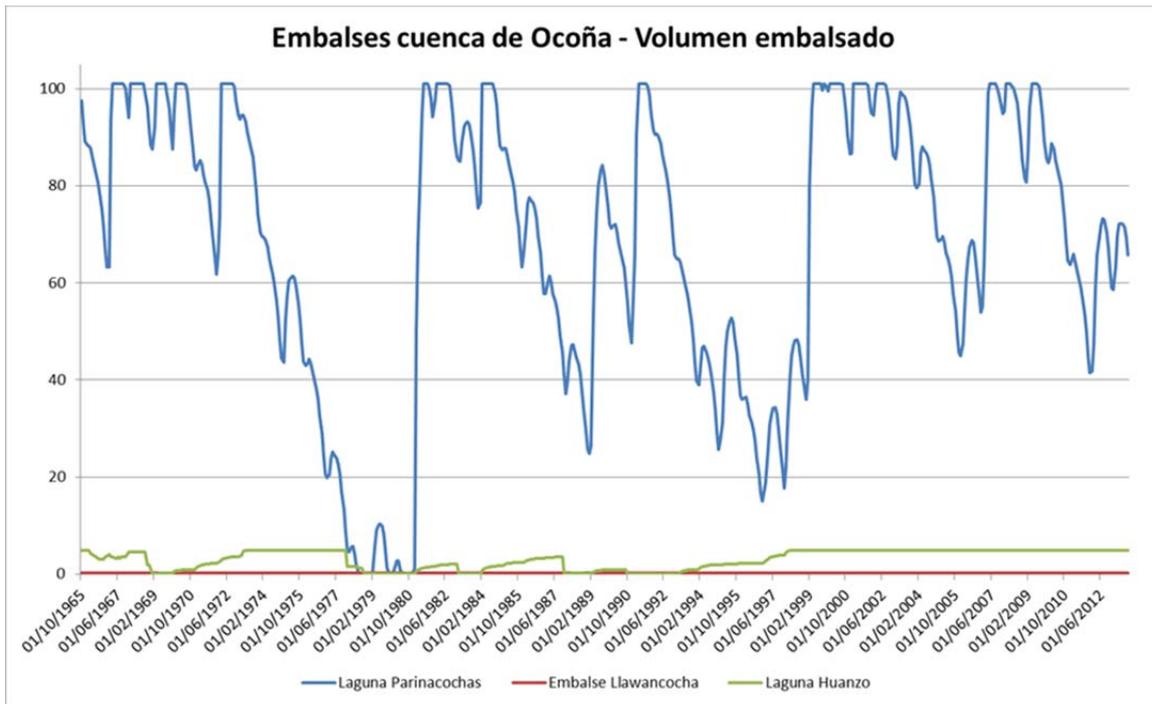


Figura 68. Volumen almacenado de los embalses de la cuenca de Ocoña: Parinacochas, Llawancocha y Huanzo. (Fuente: Elaboración propia).

En ella se puede apreciar los periodos secos más importantes de la cuenca a lo largo de la serie histórica 1975-1980, 1985-1989 y 1994-1999, reflejado tanto en la laguna de Parinacochas como en la laguna de Huanzo con fuertes descensos en los volúmenes almacenados de ambas lagunas.

En el embalse de Parinacochas, la posibilidad de regulación es mínima debido a la poca capacidad que tiene respecto al aporte superficial que le llega. Por otro lado, las lagunas de Parinacochas y la laguna de Huanzo si sufren importantes variaciones en los volúmenes lo cual indica una cierta capacidad para regular caudales.

5.3.8. RESULTADOS EN LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE CHOCOCO

Observando la figura 69, podemos comprobar que en los meses desde julio a diciembre, en general se consigue respetar los caudales ecológicos, destinándose el resto de la aportación a la central hidroeléctrica, sin conseguir ésta alcanzar el caudal objetivo.

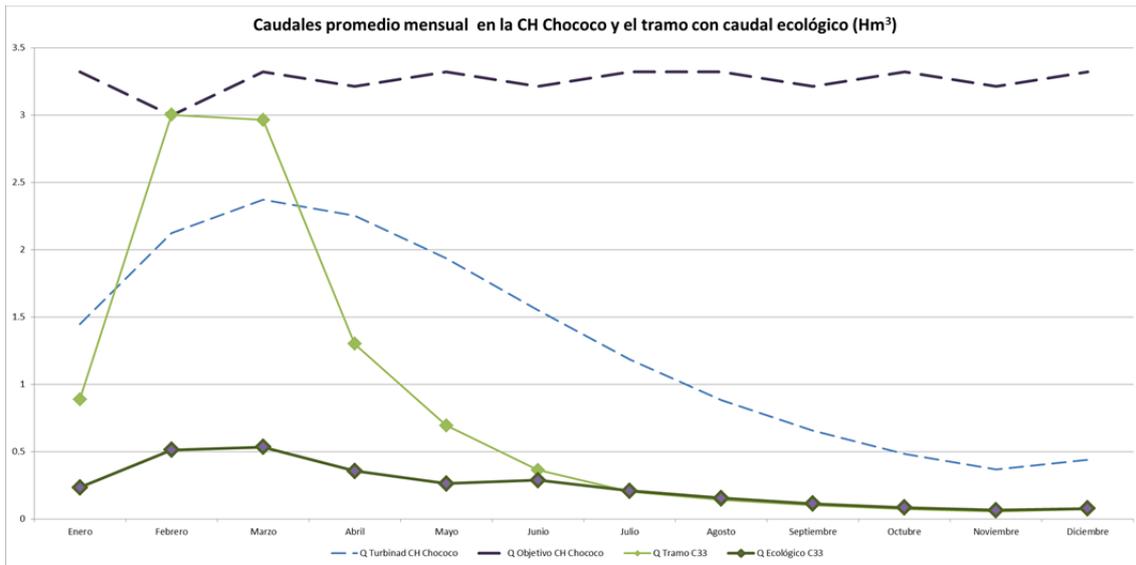


Figura 69. Caudales promedio mensuales en la CH Chococo y el tramo con caudal ecológico, y sus caudales objetivos respectivamente. (Fuente: Elaboración propia).

Por otro lado, los meses desde enero a Junio, se observa que en valores medios los caudales que circulan por el tramo C33 son muy superiores a los mínimos exigidos, sin embargo, los caudales turbinados siguen estando hasta 1 Hm³/mes por debajo de los caudales objetivos de la CH Chococo. Esto se debe a que en los años muy lluviosos, las aportaciones son lo suficientemente altas como para cumplir con los caudales objetivos de la CH Chococo, y siendo vertida el resto de la aportación por el tramo C33, en cambio en los años más secos, a pesar de cumplir con el caudal ecológico, no se consigue abastecer a la central hidroeléctrica.

En la tabla siguiente también podemos comprobar, que los caudales ecológicos se consiguen alcanzar en gran medida, habiendo déficits en los meses donde las aportaciones son muy bajas.

	Volumen (Hm ³ /año)				Nº de meses con fallo
	Total	Ecológico	Servido	Déficit	
Tramo C33	9.86	2.88	2.63	0.25	53 (9%)

Tabla 35. Cumplimiento de caudales ecológicos. (Fuente: Elaboración propia).

Por último, podemos comprobar que en la CH Chococo, existen importantes déficits respecto al caudal objetivo de la misma, debido a la insuficiente aportación de la subcuenca SC-13.

	Volumen (Hm ³ /año)			Nº de meses con fallo
	Demanda	Servido	Déficit	
CH Chococo	39.10	15.48	23.62	456 (79%)

Tabla 36. Cumplimiento de caudales objetivos de la CH Chococo. (Fuente: Elaboración propia).

5.3.9. BALANCE DEL MODELO

Por último, en la siguiente tabla podemos comprobar el balance del modelo; este balance se ha obtenido mediante la hoja Excel “resumenSimulacionSIMGES.xls” elaborada por la Universidad Politécnica de Valencia para la ayuda de salida de resultados del AQUATOOL +.

En este balance podemos comprobar la pequeña importancia de los recursos subterráneos frente a los recursos superficiales (0.2%), como ya se ha comentado estos recursos se emplean para satisfacer dos demandas: un regadío en la Chorunga Baja y una minería en el río Oyolo. También se puede observar la gran importancia de las demandas agrícolas frente a las demandas urbanas e industrial-minera.

Uno de los resultados más importantes a tener en cuenta es el gran déficit que se produce en toda la cuenca, aproximadamente un 43% del suministro no es abastecido, este dato resume el análisis realizado anteriormente por subsistemas. Este dato contrasta con la gran aportación de la que dispone el sistema, casi 3 veces más que las demandas existentes, este hecho nos indica la falta de regulación existente en la cuenca.

BALANCE DEL MODELO			
RECURSOS	Aportaciones a embalse e intermedias	1854.86	
	Recargas acuífero	4.20	
	RECURSOS TOTALES		1859.06
DEMANDAS	Agrícolas	654.53	
	Urbanas	2.92	
	Industrial	3.22	
	Térmica biomasa	0.00	
	DEMANDA BRUTA		660.68
SUMINISTROS	Superficiales	436.48	
	Subterráneos	4.20	
	SUMINISTROS BRUTOS TOTALES		461.68
	DÉFICITS TOTALES		198.99
SALIDAS	Evaporación en embalses	66.28	
	Consumos y pérdidas	249.53	
	Salidas al mar	1547.05	
	SALIDAS TOTALES		1862.87
	Variación volumen embalses	-3.81	
	Variación volumen acuíferos	0.00	
	VARIACIÓN TOTAL DE VOLUMEN		1859.06
	Error	0.00	

Tabla 37. Balance del modelo de gestión de la cuenca de Ocoña. (Fuente: Elaboración propia).

5.3.10.COMPARACIÓN CON EL MODELO DE LA ANA

A continuación compararemos los resultados obtenidos con los de la Autoridad Nacional del Agua en su Modelo de Gestión de la cuenca de Ocoña. Para ello podemos observar, los resultados de garantías que obtuvo la ANA:

SUBSISTEMA	DEMANDA POBLACIONAL						DEMANDA AGRÍCOLA						DEMANDA INDUSTRIAL Y MINERA					
	DEMANDA (hm ³ /año)			GARANTÍAS (%)			DEMANDA (hm ³ /año)			GARANTÍAS			DEMANDA (hm ³ /año)			GARANTÍAS		
	Total	Servida	Déficit	Anual	Mensual	Volu m	Total	Servida	Déficit	Anual	Mensual	Volu m	Total	Servida	Déficit	Anual	Mensual	Volu m
Parinacochas	0,27	0,27	0,00	100	100	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pacapausa-Pailancata	0,69	0,69	0,00	100	100	100	49,95	48,49	1,46	98,0	96,8	97,1	0,92	0,92	0,00	100	100	100
Mirmaca)	0,52	0,52	0,00	100	100	100	100,0	76,21	23,85	49,0	71,1	76,2	1,40	1,40	0,00	100	100	100
Oyolo-Marán	0,22	0,22	0,00	100	100	100	13,43	12,39	1,05	100	100	92,2	0,04	0,04	0,00	100	100	100
Alto-medio Cotahuasi	0,60	0,60	0,00	100	100	100	95,41	65,82	29,58	0,0	25,0	69,0	-	-	-	-	-	-
Pampamarca-Bajo	0,06	0,06	0,00	100	100	100	101,4	37,27	64,14	0,0	16,7	36,8	-	-	-	-	-	-
Arma-Chichas	0,17	0,17	0,00	100	100	100	48,37	46,35	2,02	95,9	94,9	95,8	0,02	0,02	0,00	100	100	100
Ocoña Valle	0,32	0,32	0,00	100	100	100	245,9	217,93	27,97	95,9	68,7	88,6	0,86	0,86	0,00	100	100	100

Tabla 38. Confiabilidad de servicio de las demandas por zonas y usos. Modelo de gestión de Ocoña. (Fuente: Elaborado por la Autoridad Nacional del Agua de Perú)

En primer lugar podemos comprobar, que en ambos modelos se han obtenido garantías del 100% en las demandas poblacionales de todos los subsistemas. Esto es debido a que en ambos modelos estas demandas tenían máxima prioridad y además, son demandas muy bajas que se satisfacen fácilmente.

Por su parte en las demandas agrícolas observamos que los resultados de los subsistemas de Oyolo-Marán, Alto-Medio Cotahuasi y Pampamarca-Bajo Cotahuasi son idénticos en ambos modelos; esto se debe a que son subsistemas en los que las demandas son demandas bajas fácilmente garantizables o están situadas en la parte baja del subsistema donde hay recurso suficiente para ser abastecidas, y principalmente los déficits se producen en demandas que se abastecen de manantiales (aportaciones de caudal fijo), con lo que los fallos se producen de manera sistemática.

En los otros subsistemas encontramos grandes diferencias, siempre obteniendo peores resultados en el modelo desarrollado en el presente trabajo. Esto se debe a las diferencias en las aportaciones de ambos modelos, estas aportaciones proceden del modelo hidrológico, y como vimos en los resultados de dicho modelo la calibración mostraba periodos secos más acusados que los que sucedidos realmente. Esto en el modelo de gestión se traduce en una mayor escasez de recursos hídricos en los periodos secos, provocando déficits de mayor magnitud de los que presumiblemente ocurriría en la realidad, con la consecuente disminución de las garantías del sistema.

En todo caso, los resultados que se han obtenido en ambos modelos evidencian carencias en el abastecimiento de ciertos subsistemas de la cuenca, apuntando en ambos casos a la necesidad de infraestructuras con las que se pueda regular los caudales de las aportaciones o a la necesidad de aprovechar los recursos subterráneos en los casos en los que sea posible.

Por último, en cuanto a las demandas de industria o minería, se observa que en el modelo de la ANA no se producen en ningún caso déficits. Esto puede deberse a que hayan modificado el criterio de prioridades de estas demandas para que así puedan ser garantizadas; esta decisión puede estar justificada debido a que estas demandas requieren valores de caudales muy bajos y garantizarlas por encima de las demandas agraria no provocan grandes alteraciones al sistema.

6. CONCLUSIONES

A continuación, se realiza un breve resumen de los trabajos más relevantes realizados para conseguir cumplir los objetivos marcados inicialmente en el proyecto.

El análisis de la situación actual de los recursos hídricos en la cuenca de Ocoña, se realizó a través de dos modelos: un modelo hidrológico de transformación precipitación-escorrentía y un modelo de gestión que permita analizar los recursos disponibles en la cuenca así como la satisfacción de las demandas mediante la realización de balances.

Estos modelos se realizaron mediante la herramienta informática AQUATOOL+, un entorno de trabajo que permite el desarrollo y análisis de sistemas de ayuda a la decisión en planificación y gestión de recursos hídricos.

Para la realización del modelo hidrológico de la cuenca se decidió emplear el modelo de Témez: un modelo sencillo que requiere pocos parámetros y que reproduce el ciclo hidrológico de una forma simplificada, este modelo es ideal en cuencas donde la información de la que se dispone es limitada, además un menor número de parámetros evita introducir mayor incertidumbre al modelo.

Complementando al modelo de Témez fue necesario introducir un modelo de nieve (modelo de nieve N-2), en la subcuenca SC-20.01, en la que habitualmente se producen precipitaciones en forma de nieve a lo largo del año. De forma que este modelo regula la transformación de esa nieve en escorrentía.

Para la calibración del modelo hidrológico se disponían de dos estaciones hidrométricas con series de caudales: uno al final de la cuenca (EH Ocoña), y otro en el río Arma-Chichas (EH Salamanca); dado que la calidad de los aforos era mejor en los últimos años, se decidió que los periodos 2003-2013 (EH Ocoña) y 2004-2013 (EH Salamanca) fueran los de calibración, y los periodos 1979-1996 (EH Salamanca) y 1986-2002 (EH Ocoña) fueran los de validación del modelo. Además, dado que los datos de las series están alterados por las demandas existentes, fue necesario restituir dichas series para que fueran comparables a las aportaciones del modelo hidrológico.

La calibración del modelo se realizó partiendo de unos valores de los parámetros estimados inicialmente mediante el mapa de geología y el de cobertura vegetal de la cuenca. Una vez calibrado el modelo se pudo comprobar que los valores de las intensidades máximas de las subcuencas eran sensiblemente superiores, mientras que los de humedad máxima eran inferiores.

Los resultados del calibrado del modelo hidrológico mostraron que los resultados del punto de calibración de EH Ocoña eran mejores que los obtenidos en EH Salamanca debido a que la eficiencia de Nash era de 0.6, mientras que en EH

Salamanca fue de 0.2, los otros criterios daban resultados similares. Finalmente, tras validar el modelo se dio como correcta ambas calibraciones.

Mediante las gráficas de las series de aportaciones se pudo comprobar que en general en los periodos secos de la serie las simulaciones del modelo mostraban valores de aportación inferiores a los observados en los aforos, y en los periodos húmedos valores más altos. Estos fallos del modelo hidrológico pueden crear mayor incertidumbre en resultados posteriores.

Tras comparar los resultados del modelo hidrológico con los obtenidos por la ANA mediante el software WEAP, se comprobó que sus resultados tenían mayor similitud a los medidos en las estaciones hidrométricas. Esto puede deberse, a que se empleó un modelo teórico más complejo, que permitía simular los procesos de escorrentía subsuperficial, probablemente este tipo de modelos se asemejan más al comportamiento real de la cuenca, lo que permite obtener mejores resultados. Además, el modelo empleado tenía un mayor número de parámetros que pudieron caracterizar adecuadamente en el ámbito de la cuenca.

Para la realización del modelo de gestión, se partía de los datos de aportación obtenidos en el modelo hidrológico, además de otros muchos datos relevantes en la gestión de la cuenca, como los datos de las demandas, sus retornos, existencias de embalses y lagunas y sus características, etc. Toda esta información había sido recabada por la ANA para la realización de su modelo.

El modelo trató de asemejarse lo máximo posible al realizado por la ANA, para poder posteriormente comparar los resultados, así mismo, los resultados obtenidos se resumieron por subsistemas de forma que se permitiera una mayor facilidad de comprensión y análisis de los mismos.

De los resultados obtenidos podemos resaltar los grandes déficits encontrados en la mayor parte de la cuenca, sólo hay dos subsistemas donde se cumplen los criterios de garantías: Parinacochas y Oyolo-Marán.

En general, y tras analizar el balance resumen de la cuenca de Ocoña, se llegaba a la conclusión de que en la cuenca se generan suficientes recursos como para abastecer todas sus demandas, pero para ello es necesario mejorar la gestión de la cuenca de Ocoña, así como la introducción de elementos que permita una gestión adecuada de la misma, como por ejemplo, elementos de regulación, pozos que permitan aprovechar el recurso hídrico o tomas que permitan aprovechar recursos que no está siendo empleado.

Tras hacer recordatorio de todo lo realizado, y teniendo en cuenta los resultados obtenidos del modelo hidrológico y del modelo de gestión realizados, podemos obtener una serie de conclusiones que se resumen a continuación:

- Respecto al modelo hidrológico.

Es evidente que los resultados obtenidos de la calibración del modelo hidrológico no son tan buenos como los que se podría haber esperado en un comienzo, esto se hace más notorio al comparar los resultados con los del modelo elaborado por la ANA. A pesar de ello, se dio como bueno el modelo dado que se superaron los criterios de bondad que se habían propuesto previamente.

La calidad de la calibración obtenida en el modelo hidrológico tiene repercusiones en todos los resultados obtenidos del mismo, de modo que estos resultados serán de peor calidad conforme la calibración esté peor ajustada.

En consecuencia, se crea una cierta incertidumbre en el modelo de gestión posterior, pues uno de los datos fundamentales de este modelo son las aportaciones de las distintas subcuencas, resultado obtenido del modelo hidrológico.

Como propuesta para mejorar la calidad del modelo hidrológico, y tras haber pasado reiteradamente por varios intentos de calibración del mismo con resultados similares en todos los casos, se propone la realización de un modelo hidrológico basado en otro modelo conceptual distinto al modelo de Témez. Este modelo que a priori fue elegido por su sencillez y por los pocos parámetros necesarios, parece no adaptarse adecuadamente a las condiciones hidrogeológicas de la cuenca de Ocoña. Es por ello, que un modelo más complejo similar al empleado por la ANA en su modelo (que incluye, por ejemplo el flujo subsuperficial), probablemente aporte mejores resultados.

Por último, también hay que destacar que para obtener mejores resultados en el modelo hidrológico es fundamental un mayor conocimiento de la cuenca de estudio. Por ello, un objetivo de la gestión de la propia cuenca debe ser la recopilación de información meteorológica e hidrogeológica de forma precisa y en un número de puntos suficiente para la correcta caracterización de la cuenca; por ejemplo en nuestro caso, sólo se disponían de 2 puntos de medición de caudales, siendo uno de ellos poco significativo respecto al conjunto de la cuenca, por ello lo ideal sería disponer de estaciones hidrométricas en lugar clave como el tramo final del río Cotahuasí o del río Marán.

- Respecto al modelo de gestión, y al análisis realizado de la cuenca a través de sus resultados.

Modelo de gestión ha permitido conocer con profundidad el funcionamiento del sistema de la cuenca de Ocoña, de este modo se han podido observar los numerosos déficits que se producen en toda la cuenca, así como realizar un balance de toda la cuenca.

Estos fallos han provocado en algunos subsistemas unos porcentajes de garantía de la demanda muy bajos (llegando incluso a 0). Los fallos de suministro que se han detectado se deben a diversos factores:

- 1) Escasez de recursos en demandas abastecidas por manantiales. Es importante recordar que los valores de estas aportaciones no han sido estudiadas con profundidad, y que por tanto, todos los resultados de esas demandas están sujetos a una gran incertidumbre. Además, en muchos de estos casos, estos posibles déficits se podían resolver si se dispusieran de tomas directas en el cauce principal del río.
- 2) Escasez de recursos hídricos de las aportaciones, principalmente en las partes altas de las subcuencas. En estas zonas las aportaciones son en general, bastante bajas con lo que la aportación suele ser insuficiente en las épocas más secas del año; este hecho sumado que en los resultados del modelo hidrológico se observó que en los meses de estiaje los caudales obtenidos por el modelo eran inferiores a los reales, provocan un mayor número de fallos a lo largo de la serie histórica.
- 3) Falta de regulación de los recursos hídricos en toda la cuenca. Es evidente la falta de regulación de los recursos existente en la cuenca, en la mayoría de los subsistemas se pudo comprobar que en dicho subsistema se generaban recursos suficientes para satisfacer las demandas existentes, pero la falta de regulación no permitía aprovechar los abundantes recursos hídricos de los meses más lluviosos.
- 4) En las demandas mineras, la mayoría de los fallos se debían a que tenían un orden de prioridad muy bajo, por lo que en aquellos subsistemas donde se producían fallos de garantía, estas demandas resultaban muy perjudicadas aunque requerían una cantidad insignificante de recurso. Por tanto, puede justificarse la modificación de estos criterios para que estas demandas no sufran déficits, dado que ello no provoca grandes alteraciones del sistema.

Por otro lado, también es importante resaltar el bajo aprovechamiento de los recursos subterráneos en la cuenca, esto supone una mayor dificultad de suministro de las demandas en épocas secas, que habitualmente en cuencas donde hay grandes variaciones de aportaciones a lo largo del año supone una importante fuente de recursos. Además, existe un gran desconocimiento sobre la cuantía de este tipo de

recurso en la cuenca y su interacción con el flujo superficial, por lo que es difícil crear un modelo con el que se pueda evaluar dichos recursos.

Por último, comentar a modo de crítica del modelo de gestión, que quizás es un modelo demasiado detallado, se podrían haber agrupado demandas con características similares (por ej. demandas con tomas en manantiales en una misma subcuenca), todo ello provoca que el modelo sea más complejo y difícil de interpretar, siendo necesario la agrupación de los elementos del mismo en subsistemas, tal y como se ha hecho en este caso.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA. 2015. *Evaluación de Recursos Hídricos en la Cuenca de Ocoña. Informe Final n°2.* Lima : Autoridad Nacional del Agua, 2015.

ANA, Autoridad Nacional del Agua, Ministerio de agricultura. Ley de Recursos Hídricos y su relación con los caudales ecológicos/ambientales. Perú : s.n.

Andreu, J., Solera, A., Capilla, J., Ferrer, J. *Modelo SIMGES de Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos, incluyendo Utilización Conjunta. Manual de usuario v 3.03.01.* Valencia : Universidad Politécnica de Valencia.

Andreu, J., Solera, A., Paredes, J. 2015. *Aquatool +Manual de usuario. Versión 1.0.* Valencia : Universidad Politécnica de Valencia, 2015.

Andreu, J., Solera, A., Paredes, J., Lerma, N. 2017. *Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos. Manual Técnico v1.1.* Valencia : Universidad Politécnica de Valencia, 2017.

ESTRELA, T. 1992. *Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos.* . Madrid : Centro de Estudios Hidrográficos y Experimentación de Obras Públicas. CEDEX. , 1992.

Estrela, T. 1999. *La evaluación de los recursos hídricos en el libro blanco del agua en España.* 2, Madrid : Ingeniería del agua, 1999, Vol. 6.

MINAM. 2015. *Mapa nacional de cobertura vegetal.* Lima : Ministerio del Ambiente. Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural., 2015.

Moriasi, D. N., Arnold J. G., Van Liew M. W., Bingner R. L., Harmel R. D., Veith T. L. 2007. *Model Evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.* 3, s.l.: Transactions of the ASABE. American Society of Agricultural and Biological Engineers., 2007, Vol. 50.

Molnar, P. 2011. *Calibration.* Zurich : Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, 2011.

Murillo, J. M. y Navarro, J. A. 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.* Madrid : Revista trimestral de Ciencias de la Tierra, 2011, Vol. 122 (3).

Pinto Ortiz, Y. 2015. Marco Legal del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos. 2015.

SERNANP. [En línea] Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado. <http://www.sernanp.gob.pe>.

Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado, 2014. Áreas de Conservación Privada (Documento de Trabajo 10). Lima.

Témez, J. R. 1977. *Modelo Matemático de transformación “precipitación-escorrentía”.* Madrid : Asociación de Investigación Industrial Eléctrica. ASINEL., 1977.

UPV. 2015. Apuntes de Planificación y Gestión de Recursos Hídricos de 1º MICCP de la Universidad Politécnica de Valencia. Curso 2015-2016. 2015.