

Modelación e Información Geoespacial: Análisis de eventos climáticos y antrópicos en la dinámica del acuífero en el distrito de riego de Villa Regina



Lic. en Saneamiento y Protección Ambiental Ayelen Montenegro

Director:

Dr. Ing Agr. Darío Fernández

Co Director:

Dr. Ing en Rec. Nat. Mauro Holzman

**“A mi papá donde este, quien me brindo las posibilidades
para poder crecer como profesional”**

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas aquellas personas e instituciones y organismos que de alguna u otra forma colaboraron para el desarrollo del manuscrito. Y especialmente;

Agradezco a Darío Fernández y a Mauro Holzman la dirección y co dirección de la tesis por sus aportes, fueron fundamentales en el proceso de elaboración del documento.

Agradezco infinitamente a Luis Vives por sus aportes académicos, que me acompañó y capacitó en todo momento de manera totalmente desinteresada, para poder desarrollar el trabajo planteado.

Agradezco a Osvaldo y a Horacio, técnicos del consorcio de riego que aportaron de forma desinteresada datos fundamentales para la elaboración de la tesis.

Agradezco a Andrea Rodríguez por el apoyo incondicional brindándome sus conocimientos y alentándome diariamente en lo profesional y personal.

Agradezco a Lucia Mañueco, por estar ahí todo el tiempo, ayudándome y apoyándome en todo, muchos logros en el ámbito profesional te los debo.

Agradezco a Juan Galeazzi, que desde que lo conozco me guía y apoya, brindándome sus conocimientos y confiando en mí.

Agradezco al INTA Alto Valle por promover y sostener esta etapa de estudio, que junto con los proyectos y programas nacionales que la institución tiene contribuyeron a la realización de este trabajo.

Agradezco a mi mamá Ana, mis hermanas Candelaria, Rosaura y Virginia, mi sobrino Santi y sobrinas Josefina y Uma, que siempre está a mi lado y en todo momento.

Agradezco a Samir, mi compañero de vida, siempre estando en todo lo que necesito, y apoyándome diariamente.

Agradezco a Josefina y Dolores, siempre preocupándose y alentándome en todo momento, confiando en mí.

Agradezco a Paola, Soledad, Angie, Florencia, Daniela y Sofía; que siempre estuvieron, están y estarán formando parte de mi vida, más allá de la distancia que nos suele separar.

Agradezco a Yani, una gran amiga que conocí en la maestría. Pasamos momentos de cursadas y pos cursadas muy lindos.

Agradezco a todas las compañeras y todos los compañeros de INTA, tanto de las Agencias como de la Experimental que colaboraron ya sea con un aporte o un dato a poder terminar este trabajo.

RESUMEN

El consorcio de Riego y Drenaje de Villa Regina forma parte de un extenso valle irrigado para la producción de frutales de pepita. A lo largo de los años se han detectado problemas asociados al riego y el drenaje, consecuencia de un ascenso paulatino del nivel del acuífero freático. Es primordial estudiar la zona de forma integral para comprender la interacción de los recursos hídricos superficiales y subterráneos. Los objetivos de la tesis incluyeron: a) proponer un modelo conceptual hidrogeológico en el distrito y la calibración del modelo numérico, b) analizar una crecida del Río Negro y su impacto en el acuífero freático. En relación a la metodología, se hicieron dos campañas de medición de datos hidrológicos. Se utilizó el software QGIS 2.18 para procesar y elaborar las capas de información de los datos relevados a campo y los suministrados por los entes afines (caudales del río, lecturas freatimétricas). Se descargaron imágenes Sentinel 2 en fechas relevantes a la crecida y se calcularon índices espectrales de detección de cuerpos de agua (NDWI y MNDWI) con el fin de evaluar el área con agua en superficie en agosto del 2017 y 2018. Se seleccionaron los freatímetros más cercanos al río y se elaboraron los freatigramas, calculando un promedio de ascenso de la capa freática en el área. Se elaboró el modelo conceptual, luego se reprodujo el flujo subterráneo mediante su simulación numérica en régimen estacionario en época de no riego. Se utilizó el código Modflow; el método de solución utilizado fue el numérico y la calibración se realizó con el tradicional método de prueba y error. Para las observaciones se usaron las mediciones de la red freatimétrica de agosto del 2018, dicho momento del año se considera la época en la cual la capa freática no tiene influencia antrópica debido al receso invernal. La calibración del modelo numérico validó el modelo conceptual planteado, con un error cuadrático medio (RMS) de 0,22 m y el RMS Normalizado de 1,57%, siendo valores muy aceptables. El R arrojó un valor de 0,99, confirmando un buen ajuste y demostrando un grado elevado de correlación entre los datos observados y los datos calibrados del Nivel Freático. Los parámetros que se calibraron para lograr dichos resultados fueron la conductividad hidráulica, la conductancia del río y de los desagües y la recarga del sistema. El NDWI y el MNDWI fueron consistentes con la crecida del año 2018, cuantificando un aumento del área cubierta por agua de 420000 m², respecto a un año típico como el 2017. El análisis de los freatigramas en dicho período arrojó un aumento del nivel freático promedio de 0,7 m, confirmando el impacto de la crecida en el acuífero freático. Se concluye que el uso de herramientas de modelación, integrada al uso de información geográfica, permite analizar y comprender la interacción de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, en el marco del funcionamiento de un sistema productivo tan importante como lo es el Alto Valle del Río Negro y Neuquén. Se pretende brindar conocimiento y herramientas que aporten a la implementación de una GIRH en el área de estudio.

Palabras clave: agua superficial, agua subterránea, acuífero freático, modelación matemática, información geográfica, índices espectrales de detección de cuerpos de agua.

ABSTRACT

The Irrigation and Drainage Consortium of Villa Regina, Rio Negro is part of a vast, irrigated valley. Its main production is pears and apples. Throughout the years, water and drainage problems have been detected due to a water table raise. Thus, studying the zone extensively becomes crucial in order to understand the groundwater and surface water sources interaction. The aims of this thesis are: i) to develop a hydrogeological conceptual model in the district and the calibration of the numerical model; ii) to analyze a flood river in the rio Negro, and to quantify the impact on the water table. As regards methodology, measurements of hydrological data were carried out in two different moments. Software QGIS 2.18 was used to process and elaborate the information layers of collected data. In order to analyze the surface water area, in August 2017 and 2018, Sentinel 2 images were downloaded when significant river flood occurred, and spectral indices (NDWI and MNDWI) were obtained to detect water bodies. To calculate the average of groundwater elevation in the area, unconfined aquifer piezometers near to the river were selected to elaborate piezometric graphs. Conceptual model was made, then groundwater flow was numerically simulated based on non-irrigation period. The Modflow code was used and the solution method used was the numerical method. Model calibration was achieved through the classic trial-and-error procedure. Piezometer measurements in August 2018 were considered due to the fact that August is the moment of the year in which the water table is not influenced by irrigation. The conceptual model was validated by the calibration of the numerical model, with an error (RMS) of 0.22 and a Normalized RMS of 1.57%, which are acceptable values. The R value for the fitted model was 0.99, showing a high correlation level between the collected and estimated data of water table. Calibrated parameters used were: hydraulic conductivity, river and drainage conductance, and recharge. The NDWI and the MNDWI were consistent to the river flood in 2018, showing an increase of the area covered by water by 420000 m² in comparison to 2017. The analysis of piezometric graphs during the specific period showed an average level of water table elevation of 0.7 m. These results confirm the river flood impacts on the water table. It is possible to conclude that the use of both modelling tools and geographical information, were accurate to analyze and understand the interaction between the groundwater and surface water sources in the productive system performance in the upper valley of Rio Negro and Neuquén. The aim of this work is to shed light on the use of Integrates Water Resources Management in the studied area.

Key words: groundwater sources, surface water sources, water table aquifer, mathematical models, geographic information, spectral indices to detect water bodies.

INDICE DE CONTENIDOS

INDICE DE FIGURAS.....	4
INDICE DE TABLAS.....	7
GLOSARIO	8
CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN	9
1.1. PROBLEMÁTICA DEL AGUA	9
1.2. AGUAS SUPERFICIALES EN LA ARGENTINA	12
1.3. AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA ARGENTINA	13
1.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.5. HERRAMIENTAS PARA EL ABORDAJE: MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA E INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	15
1.6 ANTECEDENTES CONSULTADOS	16
1.6.1 A nivel mundial.....	16
1.6.2 A nivel nacional y regional	17
1.7 OBJETIVOS	19
1.7.1 Objetivos generales	19
1.7.2 Objetivos específicos	19
CAPÍTULO 2 – ÁREA DE ESTUDIO	20
2.1 ALTO VALLE DE RIO NEGRO Y NEUQUÉN	20
2.1.1 Clima	21
2.1.2 Geomorfología y suelos	22
2.1.3 Hidrogeología y monitoreo de las aguas subterráneas.....	23
2.1.4 Actividad Productiva.....	24
2.2 CONSORCIO DE RIEGO Y DRENAJE DE VILLA REGINA (CRyDVR).....	25
2.2.1 Red de riego	27
CAPÍTULO 3 – METODOLOGÍA.....	30
3.1 CONSOLIDACIÓN DE BASE DE DATOS GEOGRÁFICA.....	30
3.2 GENERACIÓN DE DATOS HIDROGEOLÓGICOS.....	32
3.3 CÁLCULO DE ÍNDICES DE AGUA SUPERFICIAL.....	35
3.4 IMPACTO DE LA CRECIDA DEL RÍO EN EL ACUIFERO FREÁTICO.....	37
3.5 DEFINICIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL	37
3.6 ESTRATEGIAS DE MODELACIÓN.....	37
3.6.1 Construcción del Modelo Numérico en Estado Estacionario	37
CAPÍTULO 4 – MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL.....	40
4.1 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA.....	40

4.2. HIDROGEOLOGÍA E HIDRODINÁMICA	41
4.2.1 Base impermeable.....	42
4.2.2 Niveles freáticos.....	42
4.2.2.1 Comportamiento del nivel freático estacional debido al riego	44
4.3 CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES	45
4.4 RECARGA.....	46
CAPÍTULO 5 – MODELO NUMÉRICO EN ESTADO ESTACIONARIO E INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y SATELITAL ASOCIADA.....	48
5.1. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO	48
5.1.1 Límites del modelo	48
5.1.2 Discretización del modelo - Zona de estudio.....	49
5.1.3 Zonificación de permeabilidad y transmisividad.....	49
5.1.4 Recarga y evapotranspiración.....	50
5.1.5 Ríos y desagües	52
5.1.6 Condición de altura constante	54
5.1.7 Datos Observados.....	55
5.2 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN	55
5.2.1 ESTADÍSTICOS Y MAPA DE RESIDUOS DE LA CALIBRACIÓN.....	57
5.2.2 PARAMETROS CALIBRADOS	59
5.2.3 BALANCE DE AGUA TOTAL	61
5.2.4 BALANCE DE AGUA POR ZONAS	62
5.3 MANEJO DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (IG) Y SATELITAL PARA LA GIRH	64
5.3.1 BASE DE DATOS GEOGRÁFICA DEL DISTRITO.....	64
5.3.2 DETECCIÓN DE CRECIDA DEL AÑO 2018, COMPARACIÓN CON EL 2017 (AÑO TÍPICO) – APLICACIÓN DE ÍNDICES ESPECTRALES	66
5.3.2.1 Análisis del Impacto de la crecida del río en el nivel freático	68
CAPÍTULO 6 – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	71
BIBLIOGRAFIA	76
ANEXOS A	85
A.I DEFINICIONES HIDROGEOLÓGICAS BASICAS.....	85
A.I.I AGUA SUBTERRÁNEA	85
A.I.II AGUA EN EL SUELO.....	85
A.I.II.b.1 Isopiezas. Mapas Piezométricos y Freáticos. Gradiente Hidráulico.....	86
A.I.II.b.2 Acuífero.....	87
A.I.III LEY DE DARCY.....	88
A.I.III.a Análisis del Movimiento del agua en el suelo	90

A.I.IV PARAMETROS HIDRAULICOS	90
A.I.IV.a Conductividad Hidráulica. Transmisividad	90
A.I.IV.b Coeficiente de Almacenamiento y Porosidad.	92
A.II MODELACIÓN MATEMATICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA	96
A.II.I Visual Modflow	96
ANEXO B	98
B DEFINICIONES BASICAS DE TELEDETECCIÓN Y SIG	98
B.I SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)	98
B.I.a QuantumGIS (QGIS)	98
B.II TELEDETECCIÓN	99
B.II.a. Espectro Electromagnético	99
B.II.b. Índices Espectrales de cuerpos de agua	100

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ciclo hidrológico sin intervención del hombre. Fuente: Ordoñez Gálvez et al, 2011.....	9
Figura 1.2. Efectos antrópicos y su modificación en el ciclo hidrológico. Fuente: Ordoñez Gálvez <i>et al.</i> , 2011.....	10
Figura 1.3. Regiones Hidrogeológicas de la República Argentina. Fuente: Auge <i>et al.</i> , 2004.....	13
Figura 2.1. Consorcios del sistema de riego del AVRNYN. Fuente: Elaboración propia, 2020.....	20
Figura 2.2. Red de canales de riego del AVRNYN. Fuente: Elaboración propia, 2020....	21
Figura 2.3. Unidades Hidrogeológicas de la provincia de Río Negro, recuadro en rojo: área de estudio. Fuente: Godagnone <i>et al.</i> , 2009.	23
Figura 2.4. Localización del distrito de Villa Regina en el SIRAV. Fuente: Elaboración propia, 2020.....	26
Figura 2.5. Base de Datos Geográfica del Distrito. Fuente: Elaboración propia, 2020..	27
Figura 2.6. Compuertas en el kilómetro 89 que dan inicio al distrito de riego. Fuente: CRyDVR, 2021.	27
Figura 2.7. Configuración de la red de riego del CRyDVR. Fuente: Elaboración propia, 2020.....	28
Figura 2.8. Primer Salado, Izq: descarga al río en Chichinales, Der: Primer Salado en sus inicios en Villa Regina en agosto. Fuente: Elaboración propia, 2020.	28
Figura 2.9. Lagunas permanentes en época de máximo riego (octubre). Fuente: Elaboración propia, 2019.	29
Figura 3.1. Ubicación de las Estaciones de Medición. Fuente: Elaboración propia, 2021.....	31
Figura 3.2. Capa de datos relevados a campo, campaña de octubre 2020. Los puntos azules indican la localización de los datos relevados. Fuente: Elaboración propia, 2021.	31
Figura 3.3. Desagües activos en invierno, monitoreados en la primera campaña de agosto de 2020. Fuente: Elaboración propia, 2021.....	32
Figura 3.4. Medición de sección transversal del primer salado en agosto de 2020. Fuente: Elaboración propia, 2020.	33
Figura 3.5. Determinación de la velocidad de flujo para el cálculo de caudal. Fuente: Basán Nickisch, 2008.....	33
Figura 3.6. Estación central de nivelación en el Segundo Salado (nivelación en el CRyDVR). Fuente: Elaboración propia, 2020.	34
Figura 3.8. Condiciones de borde para la calibración en Estado Estacionario. Fuente: Elaboración propia, 2020.	38
Figura 3.9. Zonas de Balance hídrico delimitadas. Fuente: Elaboración propia, 2020...	39

Figura 4.1. Carta Geológica de Villa Regina. Fuente: Leanza H. A. <i>et al.</i> , 2001.....	40
Figura 4.2. Mapas de Isopiezas del distrito de Villa Regina. Fuente: Rossi (2013).....	42
Figura 4.3. Red de Freatímetros del área del distrito de Villa Regina, utilizada para la calibración del modelo. Fuente: CRyDVR, 2020.	43
Figura 4.4. Isopiezas en el período agosto del 2018. Fuente: Elaboración propia, 2020.	43
Figura 4.5. Freatigrama típico de la capa freática en el valle. Fuente: Elaboración propia, 2020.....	45
Figura 4.6. Cuerpos de agua superficiales activos todo el año. Fuente: Elaboración propia, 2020.....	46
Figura 4.7. Promedios mensuales de evapotranspiración potencial y precipitaciones para el período 2011-2019 Fuente: Estación Meteorológica Villa Regina, 2020.	46
Figura 4.8. Caudal mensual (L/s) entrante para riego al área de estudio. Fuente: Consorcio de Riego y Drenaje de Villa Regina, 2020.	47
Figura 5.1. Arriba: topografía del área de estudio, Abajo: hidroapoyo. Fuente: Elaboración propia, 2020.	49
Figura 5.2. Grilla del modelo numérico, en verde celdas desactivadas. Fuente: Elaboración propia, 2020.	49
Figura 5.3. Propiedades hidrogeológicas e iniciales. Fuente: Elaboración propia, 2021.	50
Figura 5.4. Paquete RCH utilizado para el cálculo de la recarga. Fuente: Elaboración propia, 2021.....	51
Figura 5.5. Paquete EVT para simular las salidas por evaporación desde cuerpos de agua. Fuente: Elaboración propia, 2021.	52
Figura 5.6. Subrutina del paquete RIV. Fuente: Elaboración propia, 2021.....	52
Figura 5.8. Paquete DRN, datos necesarios por celda. Fuente: Elaboración propia, 2021.	54
Figura 5.9. Condición de Borde CHD en el modelo Estacionario. Fuente: Elaboración propia, 2021.....	54
Figura 5.10. Input de pozos de observación en el modelo con la cota freaticométrica. Fuente: Elaboración propia, 2021.	55
Figura 5.11. Calibración en Estado Estacionario en agosto 2018. Fuente: Elaboración propia, 2020.....	55
Figura 5.12. Arriba: dirección del flujo obtenida. Abajo: Magnitud del flujo. Fuente: Elaboración propia, 2020.	56
Figura 5.12. Niveles freáticos calculados vs observados. Fuente: Elaboración propia, 2020.....	57
Figura 5.13. Mapa de residuos obtenidos del área de estudio. Fuente: Elaboración propia, 2020.....	58
Figura 5.14. Zonificación de la K en la calibración. Fuente: Elaboración propia, 2020. .	59

Figura 5.15. Zonificación de la recarga en la calibración. Fuente: Elaboración propia, 2020.....	60
Figura 5.16. Balance de masa anual. Fuente: Elaboración propia, 2020.....	61
Figura 5.17. Zonas de Balance de flujo. Fuente: Elaboración propia, 2020.....	62
Figura 5.18. Porcentaje de Caudales salientes de los Desagües. Fuente: Elaboración propia, 2020.....	62
Figura 5.19. Caudales que entran al segundo, tercer salado y desagüe G. Fuente: Elaboración propia, 2020.	63
Figura 5.20. Balance de agua de la sectorización del rio Negro. Fuente: Elaboración propia, 2020.....	64
Figura 5.21. Capas <i>shape</i> de IG del distrito de Villa Regina, elaboradas en el marco del presente trabajo. Fuente: Elaboración propia, 2021.....	65
Figura 5.22. MNDWI y NDWI calculados en ambos períodos de análisis, valores mayores a 0 representan cuerpo de agua libre. Fuente: Elaboración propia, 2020.	66
Figura 5.23. Mezcla de coberturas distintas a agua libre en el cálculo de los Índices, efecto mayor en MNDWI. Fuente: Elaboración propia, 2020.....	67
Figura 5.24. Superposición de ríos vectorizados, en violeta el 2017 y en verde el 2018. Fuente: Elaboración propia, 2020.	68
Figura 5.25. Distribución espacial de los freáticos y diferencia de cota entre el 2017 y 2018. Fuente: Elaboración propia, 2021.	69
Figura 5.26. NF de los pozos observados en ambos años de análisis. Fuente: Elaboración propia, 2021.....	70
Figura A.1. Perfiles y movimiento de agua en el suelo y en el acuífero. Fuente: González de Vallejo <i>et al.</i> ; 2002.	85
Figura A.2. Isopiezas y líneas de flujo. Fuente: González de Vallejo <i>et al.</i> , 2002.	87
Figura A.3. Tipos de acuíferos y niveles hidrostáticos. Fuente: López Geta <i>et al.</i> ; 2009.	88
Figura A.5. Aparato experimental para determinar la K de un material poroso con la Ley De Darcy. Fuente: Hiscock <i>et al.</i> ; 2014.	89
Figura A.6. Conceptualización del coeficiente de almacenamiento en los distintos acuíferos. Fuente: Sánchez San Román, 2014.....	93
Figura A.7. Diferentes tipos de porosidad con relación a la textura de la roca: (a) depósito sedimentario bien ordenado (alta porosidad); (b) depósito sedimentario pobremente ordenado (baja porosidad); (c) depósito sedimentario bien ordenado cuyas partículas son porosas (muy alta porosidad); (d) depósito sedimentario bien ordenado con materia depositada en los intersticios (cementación) que disminuye la porosidad; (e) roca fracturada.; (f) roca con porosidad por disolución. (Adaptado de Meinzer 1923.)	94
Figura A.8. Porosidad y Rendimiento Específico en función a la textura del suelo. Fuente: Cassiraga; 2013.	95
Figura B.1. Componentes de un SIG. Fuente: Olaya V.; 2014.	98

Figura B.2. Espectro Electromagnético. Fuente: Paruelo, 2014.....	99
Figura B.3. Firmas Espectrales teóricas de distintas coberturas. Fuente: Paruelo, 2014.	100
Figura B.4. Patrones de reflectancia espectral en la zona de Fuzhou City. Fuente: (Xu, 2006).	101

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Principales ríos de la República Argentina. Fuente: Adaptación de Calcagno <i>et al.</i> , 2000.....	12
Tabla 3.1. Caudales del río Negro en las fechas de las imágenes obtenidas. Fuente: Elaboración propia, 2020.	35
Tabla 5.1. Estadísticos obtenidos en la calibración del modelo numérico. Fuente: Elaboración propia, 2020.	57
Tabla 5.2. Conductancia obtenida de los cuerpos de agua a partir del modelo numérico. Fuente: Elaboración propia, 2020.	60
Tabla 5.4. Máximos y Mínimos en los índices espectrales calculados. Fuente: Elaboración propia, 2021.....	66
Tabla 5.3. Superficie cubierta por el río en relación al caudal medido. Fuente: Elaboración propia, 2020.	68
Tabla A.1. Valores de permeabilidad o conductividad hidráulica. Fuente: Custodio <i>et al.</i> , 1983.....	91
Tabla A.2. Acuíferos confinados y Transmisividad. Fuente: Villarroja, 2009.	92
Tabla A.3. Porosidad y Rendimiento Específico de diversas formaciones geológicas. Fuente: Cassiraga; 2013.	95

GLOSARIO

Agua y Energía Eléctrica S.A.	AyEE S.A.
Agencia Espacial Europea	ESA
Almacenamiento Específico	Sy
Alto Valle del Río Negro y Neuquén	AVRNyN
Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas	AIC
Base de Datos Geográfica	BDG
Coefficiente de Cultivo	Kc
Conductividad Hidráulica	K
Consortio de Riego y Drenaje de Villa Regina	CRyDVR
Cota Ministerio de Obras Públicas de Nación	Cota MOP
Departamento Provincial de Aguas	DPA
Evapotranspiración de Cultivo	ETc
Evapotranspiración Potencial	ETo
Food and Agricultural Organization	FAO
Gestión Integrada de los Recursos Hídricos	GIRH
Índice de Agua de Diferencia Normalizada	NDWI
Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado	MNDWI
Información Geográfica	IG
Nivel Freático	NF
Porosidad Total	ϕ
Porosidad Eficaz	ϕ_e
Rendimiento Específico	Sr
Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria	SENASA
Sistemas de Información Geográfica	SIG
Sistema Integral de Riego del Alto Valle	SIRAV
Transmisividad	T

CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN

1.1. PROBLEMÁTICA DEL AGUA

El ciclo hidrológico es el constante movimiento del agua, tanto en la superficie de la tierra, como por encima y debajo de la misma. Representa el cambio continuo de grandes masas de agua a diferentes estados y su transporte de un lugar a otro. Su correcto conocimiento es fundamental para una adecuada utilización y gestión del recurso hídrico (López Geta *et al.*, 2009). Las diferentes fases que se ven involucradas en el ciclo hidrológico se representan en la Figura 1.1 y son: evaporación del agua de mar, transporte como nubes, precipitación (niebla, lluvia o nieve), escorrentía por ríos y arroyos, recarga de acuíferos, evapotranspiración, salidas al mar y de nuevo inicio del ciclo. Al volumen de agua que se desplaza de un depósito a otro a lo largo de un año, se lo llama balance hídrico global (Ordoñez Gálvez, 2011).



Figura 1.1 Ciclo hidrológico sin intervención del hombre. Fuente: Ordoñez Gálvez et al, 2011.

Shiklomanov (1997) estima que el agua en la hidrósfera se distribuye en un 97,5% en mares y océanos, es decir, que es agua salada. Sólo el 2,5% es agua dulce utilizable para usos consuntivos y no consuntivos por el hombre, de los cuales el 68,7% del total se encuentra congelada en los polos y glaciares, el 30,1% corresponde a las aguas subterráneas y el resto a fuentes de agua superficiales como ríos, lagos y arroyos.

Desde hace muchos años que el hombre ha ejercido una presión importante sobre los recursos hídricos, siendo imperiosa la necesidad de incorporar el tema en las agendas internacionales. El antecedente de mayor impacto global se sitúa en el año 2015, donde los estados miembros de las Naciones Unidas aprobaron “La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Una oportunidad para América Latina y el Caribe”, que hace mención a diecisiete objetivos a cumplir para dicho año.

El objetivo seis, “Agua Limpia y Saneamiento”, debe ser cumplido a través de ocho metas, destacando el acceso universal y equitativo al agua potable, el acceso a servicios de saneamiento e higiene, la calidad del agua, y el reciclado y reutilización de aguas residuales. El uso eficiente de los recursos hídricos y la implementación de la gestión integrada de los mismos en todos sus niveles, se proponen como los medios para alcanzar el objetivo seis (ONU, s.f).

La presión antrópica en el ambiente y en sus recursos genera la necesidad de plantear un nuevo esquema del ciclo hidrológico que contemple la contaminación atmosférica,

la contaminación y disminución de los caudales circundantes por los ríos, el descenso de los niveles piezométricos y el avance de agua de mar en los acuíferos como lo muestra la Figura 1.2.



Figura 1.2. Efectos antrópicos y su modificación en el ciclo hidrológico. Fuente: Ordoñez Gálvez *et al.*, 2011.

En este escenario, se torna fundamental la necesidad de concentrar esfuerzos para optimizar el uso del agua en todos sus niveles. La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) promueve la administración coordinada de los diversos usos del agua y los recursos ambientales conexos, con el fin de maximizar el bienestar económico de manera equitativa y sustentable. En ese sentido, para garantizar una adecuada gestión del agua, resulta imperioso analizar sus problemáticas sectoriales, manteniendo siempre una visión sistémica (Guiñazu Micames, 2017).

En relación a las actividades antrópicas, la agricultura fue y sigue siendo una de las principales actividades humanas y como tal, ejerce presión sobre el ambiente comprometiendo los recursos y la futura producción de alimentos en cantidad y calidad (Andrade, 2016).

A lo largo de la historia de la humanidad la expansión de la superficie cultivada incrementó la producción, así como la intensidad en el uso de insumos externos. Esto resultó en procesos de degradación de suelos y pérdida y contaminación de hábitats. Muchas de las prácticas comunes hasta hoy buscan aumentar la producción y la rentabilidad, desconociendo los procesos inherentes a cada sistema de producción e ignorando los posibles efectos negativos sobre el ambiente y sus servicios ecosistémicos (Andrade, 2016).

El agua es esencial para la producción agrícola y la seguridad alimentaria, es el elemento vital de los ecosistemas, incluyendo bosques, lagos y pantanos. La seguridad alimentaria y nutricional de las generaciones presentes y futuras depende de dicho recurso, sin embargo, los recursos de agua dulce están disminuyendo a un ritmo alarmante (Hoogeveen, 2021)

FAO (2016) asegura que la agricultura es la principal causa de la escasez de agua y representa casi el 70 % de todas las extracciones de este recurso y hasta el 95 % en algunos países en vías de desarrollo. Por eso, esta investigación pone énfasis fundamentalmente en los recursos hídricos y su rol en el desarrollo agropecuario.

La creciente escasez de agua es ahora uno de los principales desafíos para el desarrollo sustentable, siendo un reto cada vez más relevante con la creciente población mundial, con estándares de calidad de vida más altos, cambios en las dietas y la agudización del cambio climático (ONU, s.f.).

El agua que se consume a través de la producción de alimentos es mucha más de la que se bebe. Según la dieta, se necesitan de 2000 a 5000 litros de agua para producir los alimentos consumidos diariamente por una persona. Como se estima que la población mundial alcanzará los diez mil millones para el año 2050, se espera que la demanda de alimentos aumente un 50 %. Este dato sugiere que dos tercios de la población mundial podrían vivir en países con escasez de agua en el 2025, si los patrones de consumo actuales continúan (FAO, s.f.).

Para aumentar el potencial agrícola en las zonas áridas y semiáridas del mundo, es que desde finales del siglo XIX ha sido fundamental el desarrollo del riego a gran escala. No obstante, dicha práctica ha contribuido también a la recarga de los acuíferos, ya sea por pérdidas por percolación profunda o filtraciones de las redes de riego (Tanji *et al.*, 2002).

El riego es un medio importante para incrementar la productividad, la intensidad de cultivo y fomentar la diversidad de los mismos (Morabito *et al.*, 2008). Su principal objetivo debe basarse en suministrar el agua necesaria por el sistema suelo-planta-atmósfera. Si el agua es insuficiente o está aplicada en exceso puede afectar negativamente la producción del cultivo o causar degradación del suelo (Losada Villasante, 2005).

Asociado al riego, el drenaje es fundamental. La capacidad de drenaje que tiene el suelo determinará que un balance de agua y sales sea favorable para un determinado cultivo. La rizosfera es el ambiente en el cual el cultivo desarrolla su sistema radicular; el drenaje condicionará dicho medio. Por ello, el análisis de las relaciones agua-suelo-planta-atmósfera comprende temas importantes para determinar la severidad de los problemas de drenaje agrícola (Grassi, 1998).

En muchas zonas irrigadas del mundo se han registrado aumentos en los niveles freáticos debido a que la recarga es mayor que la descarga natural. Dichos aumentos conducen a anegamientos y/o problemas de salinidad en los suelos, que en un futuro pueden transformarse en tierras improductivas (Tanji *et al.*, 2002).

En este contexto, resaltando la importancia del recurso hídrico en las esferas social, ambiental y económica y teniendo en cuenta que, en un futuro, expertos mundiales aseguran su escasez, es que tener una visión integral en el uso del agua frente a las distintas actividades productivas y sociales que conviven en zonas áridas y semiáridas, será vital para toda la sociedad. Una visión sistémica del ciclo, que contemple a la agricultura como una de las variables más relevante, aportará herramientas para coordinar acciones conjuntas entre las instituciones que intervienen en la gestión del agua a distintos niveles.

1.2. AGUAS SUPERFICIALES EN LA ARGENTINA

Globalmente, la Argentina dispone de una oferta hídrica media anual por habitante sumamente importante, superior a los 22500 m³/hab. No obstante, la distribución de la oferta es muy irregular. En varias provincias de la región árida, la disponibilidad de agua está por debajo del umbral del estrés hídrico que es de 1000 m³/hab., y cabe aclarar que dos tercios de la superficie del país se encuentran en regiones áridas y semiáridas.

Los recursos hídricos superficiales se concentran principalmente en el litoral húmedo, siendo esa red fluvial la más importante e intensa. La Tabla 1.1 presenta los caudales característicos de los principales ríos de la Argentina según las vertientes y sistemas hidrográficos identificados. Estos parámetros permiten apreciar la potencialidad de los distintos sistemas fluviales considerados (Calcagno *et al.*, 2000).

Tabla 1.1. Principales ríos de la República Argentina. Fuente: Adaptación de Calcagno *et al.*, 2000.

SISTEMA	RIO	SUPERFICIE DE LA CUENCA (km ²)	CAUDAL MEDIO (m ³ /s)
Uruguay	Uruguay	115700	2659
Paraná/Paraguay	Paraná	975375	12228
	Paraguay	1100000	3770
	Bermejo	25000	344
Río Desaguadero	San Juan	18348	53.4
	Mendoza	3050	34.6
	Diamante	4150	34.8
	Colorado	15300	148
Río Negro	Neuquén	30843	313
	Limay	26400	736
	Negro	95000	858
Chubut	Chubut	16400	47.4
Santa Cruz	Santa Cruz	1550	2030
Pacífico	Futaleufú	4608	862

Queda en evidencia la desigual distribución de los recursos hídricos superficiales. El tercio del país que no corresponde a regiones áridas y semiáridas posee el 84 % de la disponibilidad hídrica. El crecimiento del consumo industrial y productivo con efluentes volcados sin tratamiento y un desarrollo desorganizado de grandes asentamientos poblacionales marginales contribuyen al deterioro del recurso hídrico. Como

consecuencia se observa una inadecuada explotación del recurso y el volcado e infiltración de todo tipo de sustancias contaminantes (Bauer *et al.*, 2011).

1.3. AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA ARGENTINA

Los recursos hídricos subterráneos poseen también una gran valoración en el país. El 30 % del agua extraída en el ámbito nacional para diversos usos proviene de fuentes subterráneas (Bauer *et al.*, 2011). En el caso del riego en las regiones áridas y semiáridas, las reservas de agua subterránea son esenciales para asegurar una regulación plurianual de los recursos y permiten superar períodos de eventos climáticos extremos, tales como heladas y sequías.

Auge *et al.* (2006) divide al territorio nacional en “regiones hidrogeológicas” (Figura 1.3). Este concepto incluye a toda región que presente características o comportamientos distintivos en relación a sus aguas subterráneas. El término distintivo implica la manifestación reiterada y fácilmente detectable de alguna característica peculiar y, por lo tanto, no siempre involucra un comportamiento homogéneo. Los factores que ejercen mayor influencia primaria en el comportamiento hidrológico subterráneo son: el geológico, el geomorfológico, el climático y el biológico, por ello, el carácter distintivo es consecuencia de los factores mencionados. El componente geológico incide notablemente en el aspecto hidroquímico y en el hidrodinámico.

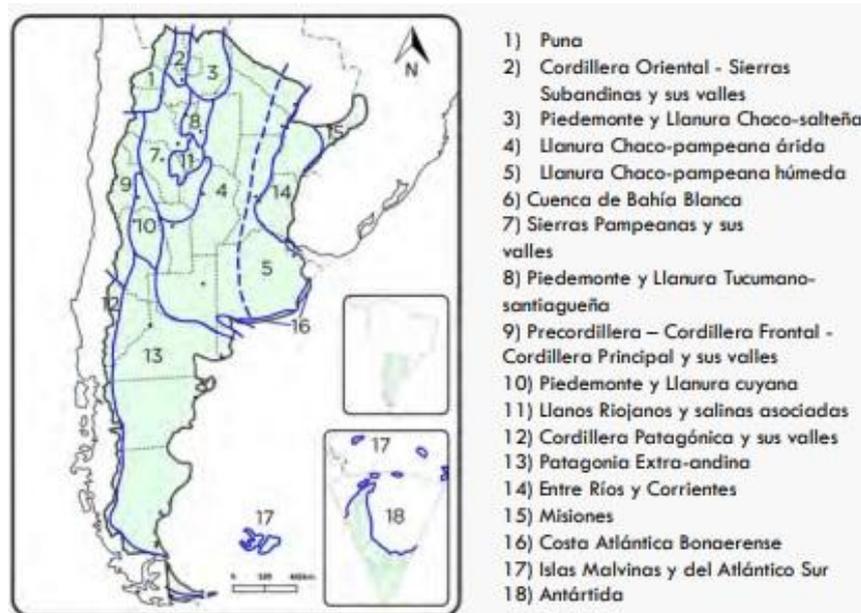


Figura 1.3. Regiones Hidrogeológicas de la República Argentina. Fuente: Auge *et al.*, 2004.

En la región de la Patagonia extra andina, coexisten una variada cantidad de formaciones que condicionan el comportamiento geológico, destacándose las mesetas, los basaltos, los rodados, las elevaciones serranas y los valles. Estos últimos hacen alusión, entre otros, al Alto Valle de Río Negro y Neuquén. Estas dilatadas terrazas fluviales, que alcanzan hasta 30 km de ancho, son producto de la capacidad erosiva de los ríos actualmente. Los ríos se comportan como influentes y, como transportan aguas de baja salinidad originadas en lluvias y deshielos cordilleranos, la calidad del agua subterránea desmejora desde las márgenes hacia los bordes de los valles. En las cercanías de las

márgenes de los fluvios actuales, se obtienen elevados caudales de agua de baja salinidad proveniente de acuíferos libres (Auge *et al.*, 2006).

A pesar del papel estratégico de las aguas subterráneas en el manejo de los recursos hídricos del país, no se dispone, salvo en algunas áreas específicas, de una verdadera gestión integrada del agua superficial y subterránea y, sobre todo, se ha descuidado la protección de los acuíferos (Calcagno *et al.*, 2000).

En resumen, la Argentina es un país marcadamente heterogéneo en cuanto a la disponibilidad y a la demanda de sus recursos hídricos, en el que se identifican grandes desafíos desde el punto de vista de la gestión de los mismos y de la disponibilidad espacial, temporal y en calidad para diversos usos (Bauer *et al.*, 2011).

1.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Tradicionalmente los sistemas de aguas superficiales y subterráneos han sido tratados en forma independiente. Por ejemplo, en numerosos estudios de crecidas se considera que la infiltración es una pérdida de agua y en modelos de escurrimiento superficial que los sistemas de agua subterráneas son embalses lineales, mientras que, desde el punto de vista de las aguas subterráneas, la recarga se consideraba como una constante que debía ser calibrada para cumplir con el balance hídrico (Arumi *et al.*, 2012).

A partir de la segunda mitad de la década de los noventa surgió con fuerza el concepto de que los sistemas de agua superficial y subterránea están interconectados, y que el manejo que se haga sobre uno de ellos afecta al otro (Arumi *et al.*, 2012).

Según Sophocleous (2002), el estudio de la interacción entre las aguas superficiales y subterráneas se ha orientado principalmente hacia dos grandes áreas: 1) procesos de recarga y descarga de aguas subterráneas y 2) estudios de los procesos bioquímicos y geo-ecológicos que ocurren en la capa de sedimentos que se encuentra bajo los cuerpos de agua superficiales (zona hiporreica) y su efecto en la calidad del agua. El presente trabajo se centra en la primer área de conocimiento.

En relación a los procesos de recarga y descarga de aguas subterráneas, estos pueden cambiar tanto temporal como espacialmente dependiendo de la zona donde entra o sale agua del acuífero. Este enfoque sistémico será uno de los aspectos a analizar en el presente trabajo de tesis.

También es motivo de análisis la relación entre los factores antrópicos y el acuífero freático en los valles irrigados. En el caso particular del Alto Valle de Río Negro, área de estudio de esta tesis, se han registrado aumentos en los niveles freáticos desde que empezó a operarse el sistema de riego, debido a que la recarga por el uso del agua para riego es mayor que la descarga natural. Numerosos estudios en la zona han analizado dichas fluctuaciones freáticas en el tiempo y en el espacio (Horne *et al.*, 1992; Álvarez *et al.*, 1995; Galeazzi *et al.*, 2003; Galeazzi *et al.*, 2004; Galeazzi *et al.*, 2005; Galeazzi *et al.*, 2007; Montenegro, 2014).

Algunas de las consecuencias han sido definidas por sucesivos informes elaborados por Mendía (1994) y Rossi (2001, 2002, 2005) en los distintos distritos de riego del Alto Valle.

Por ejemplo, en el Consorcio de Riego y Drenaje de Villa Regina (CRyDVR) los autores detectaron varios factores que inciden en la variación del nivel freático. Algunos de ellos

son la falta de mantenimiento y profundización de algunos de desagües, zonas de aporte en época de riego, áreas con influencia del río sobre el manto freático, problemáticas asociadas al drenaje en la zona del cauce del río y meandros abandonados, todo, consecuencia de un ascenso paulatino del nivel freático.

Las recomendaciones fueron, entre otras, profundizar los estudios para comprender el comportamiento del acuífero y poder realizar un abordaje integral preventivo frente a un evento puntual (Rossi, 2001; Rossi, 2002; Rossi, 2005).

En relación al riego existe una baja eficiencia tanto en la conducción del agua como en la aplicación en la parcela (Requena, 2013; Galeazzi *et al.*, 2019). Como consecuencia, el exceso de agua percola a niveles más profundos llegando al acuífero y generando un ascenso paulatino del nivel freático. Los resultados pueden derivar en salinización de las tierras agrícolas y exceso de agua en la zona radicular.

Actualmente, no hay un modelo conceptual del funcionamiento del sistema hidrogeológico a la escala del CRyDVR, pero existe información dispersa en diversos entes, que será fundamental para conformarlo y analizar en mayor grado de detalle dicho distrito.

En este contexto, los gestores del agua deben optimizar tanto los recursos hídricos como los económicos. Para ello deben contar con herramientas técnicas que les permitan tomar decisiones en el uso del agua y su distribución. Conocer cómo es el comportamiento del agrosistema, qué factores y cómo éstos intervienen en la recarga y descarga del acuífero brindará datos para ser transformados en decisiones.

Una visión sistémica que analice la interacción de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos brindará herramientas para tomar decisiones que apunten a la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos y a la sustentabilidad del agrosistema.

1.5. HERRAMIENTAS PARA EL ABORDAJE: MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA E INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Con el devenir de los años, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han ocupado un rol fundamental en el manejo de datos. Aproximadamente el 70 % de la información que se maneja en cualquier tipo de disciplina está georreferenciada, es decir, que está ubicada en el espacio. La potencialidad de estas herramientas para unificar y analizar cualquier tipo de información referida a un espacio geográfico presenta una gran cantidad de ventajas. Entre ellas se destacan especialmente las relacionadas a una mejor gestión del conjunto de los distintos datos que se manejan (Olaya, 2014).

Sobrino (2000) indica que la teledetección o percepción remota en un sentido amplio es “la adquisición de información sobre un objeto a distancia, es decir, sin que exista contacto material entre el objeto o sistema observado y el observador”. La tecnología de la teledetección integra los desarrollos más recientes de la investigación espacial, de la física y de la informática, para poner a disposición bases de datos a una resolución temporal, espacial y espectral útil para la gestión de los recursos, la planificación y el desarrollo económico.

Hoy los índices espectrales son ampliamente utilizados en el ámbito de la teledetección como herramientas para detectar variaciones temporales y espaciales de distintas

coberturas (suelo, agua, vegetación) en diversas regiones. Su uso en detección de cuerpos de agua superficiales ha sido ampliamente reconocido (Xu, 2006).

Por otro lado, los modelos matemáticos son representaciones de la realidad, que aplican fórmulas para explicar el comportamiento de distintos parámetros o procesos inherentes a un sistema previamente definido. En hidrogeología, la calibración y validación del modelo de un acuífero, permite integrar una gran cantidad de información georreferenciada y obtener un modelo que sea lo más representativo posible del sistema real. Permite también, simular la respuesta de un acuífero en diferentes escenarios, con el fin de aportar a la toma de decisiones. Esta es la razón principal para ser usado en el manejo integral del recurso hídrico subterráneo (Rodríguez *et al.*, 2006).

La integración y aplicación de modelos matemáticos a la información georreferenciada obtenida en un SIG y de técnicas de percepción remota, complejiza y aporta al análisis de un sistema, brindando un conocimiento integral de un determinado territorio. Por todo lo expuesto hasta aquí, es que en el presente trabajo se implementarán herramientas de SIG, teledetección y el modelo matemático Modflow (McDonald y Harbaugh, 1988), para contribuir al conocimiento de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en la región del Alto Valle de Río Negro y Neuquén (AVRNyN), focalizando en el área del Consorcio de Riego y Drenaje de Villa Regina (CRyDVR).

1.6 ANTECEDENTES CONSULTADOS

Se realizó una intensa búsqueda bibliográfica a nivel mundial, nacional y regional en el uso de modelos matemáticos para el análisis de aguas subterráneas y caracterización de cuencas, integrando los resultados a sistemas de información geográfica e información obtenida a través del procesamiento de imágenes satelitales, así como la aplicación de índices espectrales realizando análisis espacio-temporales.

1.6.1 A nivel mundial

En el sur del Valle de Jordan (Jordania), Alfaro *et al.* (2017) aplicaron el Modflow con el fin de caracterizar el sistema de aguas subterráneas y el balance hídrico dado en dicha área bajo riego, estableciendo estrategias de manejo basadas en el conocimiento hidrogeológico del acuífero. Los resultados permitieron también simular escenarios futuros en dicha cuenca y establecer una gestión óptima del recurso.

En la cuenca de Geba al norte de Etiopía, debido a condiciones recurrentes de extrema sequía, modelaron el acuífero con el Modflow para evaluar el uso de los recursos hídricos subterráneos para riego en las distintas actividades agrícolas de la cuenca. Los resultados mostraron la baja o nula capacidad de explotación de las aguas subterráneas a gran escala. Sin embargo, se identificaron acuitardos que pueden apoyar la extracción de agua subterránea a pequeña escala para las necesidades de riego en dicha región (Gebreyohannes *et al.*, 2017).

Se han realizado otros trabajos con fines netamente ambientales. Por ejemplo, Gómez Beltran *et al.* (2013) en México implementan el Modflow para modelar el flujo subterráneo del acuífero cercano a un vertedero de residuos sólidos urbanos (RSU). Integrando con información georreferenciada de pozos y su localización, líneas de flujo

y demás información pertinente, detectaron el riesgo futuro de contaminación de fuentes de agua superficial por el lixiviado de dicho vertedero.

Chang Martínez (2012) presentó el trabajo “Integración de un modelo de flujo a un sistema de información geográfica (SIG)”, el cual complementa las potencialidades del modelo matemático con el GRASS SIG, de código libre.

En relación al uso de diversas técnicas de teledetección existen numerosos índices espectrales. Éstos permiten la detección de cambios en la cobertura terrestre a partir de cambios en distintas bandas del espectro. Con respecto a la detección de recursos hídricos superficiales, Vivek Singh *et al.* (2014) aplicaron y evaluaron el NDWI y el MNDWI para la determinación de áreas anegadas en el distrito de Sri Muktsar Sahib de Punjab en la India. El MNDWI tuvo una precisión del 96,9 % para la detección de cuerpos de agua siendo mejor que el NDWI para el objetivo planteado. Antón Rodríguez (2019) en su trabajo de finalización de grado evaluó y comparó diversos índices espectrales con el objetivo de establecer y desarrollar una metodología para discriminar cubiertas inundadas, con buenos resultados utilizando el NDWI en comparación a otros.

1.6.2 A nivel nacional y regional

En relación al modelado de cuencas, Varni *et al.* (1999) simularon con el Modflow la cuenca del arroyo del Azul, provincia de Buenos Aires, para evaluar el modelo hidrogeológico conceptual. Los niveles hidráulicos simulados ajustaron satisfactoriamente con los niveles observados y lograron arribar a tres resultados concretos que caracterizan hidrológicamente el área de estudio: recarga no uniforme, evapotranspiración estimada concordante con otros estudios y aportes del acuífero al río.

Palacio (2012) modeló el acuífero libre de General Pico-Dorila (La Pampa). Cuantificó la recarga en torno al 14 % de la precipitación, fundamentalmente en otoño y en primavera. El análisis de las fluctuaciones del nivel freático permitió identificar zonas de recarga preferenciales correlacionadas con un mayor espesor de cobertura de arenas.

García *et al.* (2018) utilizaron el Modflow para el flujo subterráneo de 600 km² del acuífero Toay-Santa Rosa-Anguil en la provincia de La Pampa. En una primera instancia, actualizaron el modelo conceptual de funcionamiento del sistema con información climática, geomorfológica, edáfica, geológica, hidrológica e intervenciones antrópicas. En una segunda instancia desarrollaron un modelo en estado estacionario y transitorio para un período de 54 años, obteniendo un buen ajuste en los puntos de control.

En la provincia de Río Negro, Rodríguez *et al.* (2006) inició un trabajo de investigación con el fin de analizar los mecanismos causantes de las fluctuaciones de los niveles freáticos en la Isla de Choele Choel. Para ello simuló numéricamente el comportamiento del sistema río-acuífero a lo largo de un ciclo completo de riego mediante el uso del código numérico Modflow. El desarrollo del modelo permitió contar con una herramienta eficaz logrando un mejor entendimiento del comportamiento integral de las componentes subterránea y superficial de la isla.

Enmarcado en la misma área de estudio y complementando con un modelo de aguas superficiales (HEC-RAS), Rodríguez *et al.* (2008) aplicaron una metodología diseñada

para mejorar la representación de los perfiles de la superficie del agua a lo largo de los canales de drenaje abiertos en el marco del modelado regional.

Bajo el proyecto CLIMAGUA se escogió la zona de Ingeniero Jacobacci, provincia de Río Negro, como caso de estudio con el propósito de evaluar el comportamiento hidrológico de las reservas de agua subterránea, siendo éste el punto de partida para la gestión sustentable de su utilización en el contexto del cambio climático en etapas futuras. Para ello, se dispuso llevar adelante la modelación matemática del flujo subterráneo mediante el uso de Modflow 2000 (Harbaugh *et al.*, 2000), dada la importancia de este recurso para el desarrollo social y productivo de la región (Cello, 2016).

En el Alto Valle de Río Negro y Neuquén, el Modflow fue aplicado por diversos investigadores. Pavese *et al.* (2013, 2015) y Marizza *et al.* (2009) utilizaron escalas de trabajo regional y de área piloto, respectivamente. Calibraron y validaron el modelo con el objetivo de detectar problemas regionales en el drenaje y evaluar las fluctuaciones freáticas conociendo la incidencia asociada a distintos niveles de producción.

Pavese *et al.* (2013) implementaron dicho modelo en el distrito de riego de Cinco Saltos con el objetivo de evaluar el comportamiento del acuífero valletano como sustento para el control de heladas.

En relación a la detección de cuerpos de agua, Haspert (2018) utilizó el MNDWI para delimitar y calcular la superficie de la zona intermareal de cinco estuarios patagónicos (Río Deseado, Río Santa Cruz, Río Coyle, Río Gallegos y Río Grande). Se analizó el potencial para aprovechamiento de las corrientes de marea como energía mareomotriz. Para ello se seleccionaron imágenes Landsat 8 en situaciones de marea alta y baja en cada estuario y aplicando el índice se seleccionó como zona intermareal aquella en la que la clasificación de una escena a otra cambiaba de agua a tierra y viceversa.

Maestri *et al.* (2019) compararon el NDWI, el MNDWI y algunos algoritmos de clasificación supervisada y no supervisada para evaluar la capacidad de cada uno para calcular el área de lagunas pampeanas con imágenes Landsat 8 y así poder identificar el método que insume menos tiempo computacional y minimiza posibilidades de error en la implementación. Resultó que el MNDWI fue el que menor error arrojó y el más sencillo y rápido desde un punto de vista computacional, siendo confiable para delimitación de cuerpos de agua.

En Orán, provincia de Salta, Cuellar (2014) en su tesis de Maestría aplicó entre otros índices el NDWI como una variable ambiental con un cierto grado de influencia sobre la aparición de casos de malaria en dicha ciudad. El objetivo fue complementar información a un modelo capaz de predecir brotes epidemiológicos. En relación al índice de agua, se muestra cómo la enfermedad está asociada a valores elevados de dicho índice.

Da Silva *et al.* (2014) utilizaron el MNDWI para detección de cuerpos de agua en Resistencia, Chaco con una precisión superior al 70 %. Bianchi *et al.* (2018) aplicaron el MNDWI en la laguna Llananelo como indicador del balance hídrico de dicho cuerpo de agua, estimando su superficie cubierta en el período 1984-2013. A nivel regional no se encontraron trabajos que apliquen los índices descriptos en la zona.

La bibliografía consultada tanto a nivel mundial como nacional, deja en evidencia el amplio espectro de aplicación y metodologías utilizadas en los modelos matemáticos y en el uso de imágenes satelitales en la detección de agua en superficie, siendo un sustento científico muy importante para la elaboración de esta tesis.

1.7 OBJETIVOS

1.7.1 Objetivos generales

- Proponer un modelo conceptual del funcionamiento del sistema hidrogeológico en el distrito de riego de Villa Regina para contribuir al conocimiento del agrosistema y los factores naturales y antrópicos que influyen en la variación del nivel del acuífero libre y su interacción con los cuerpos de agua superficiales.
- Calibrar el modelo numérico del sistema hidrogeológico en el distrito de Villa Regina con el Visual Modflow para evaluar y validar el modelo conceptual elaborado.

1.7.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los parámetros hidrogeológicos del acuífero freático del Consorcio de Riego y Drenaje de Villa Regina y analizar la interacción río acuífero y desagües-acuífero.
- Consolidar la base de datos geográfica en SIG y generar información satelital del área que aporte, junto al modelo, a la toma de decisiones en la GIRH.
- Valorar la crecida del Río Negro en el año 2018 y su incidencia en el área a través del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) y el Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI).
- Analizar la influencia y cuantificar el impacto de la crecida del río en agosto del 2018 en el acuífero freático.

CAPÍTULO 2 – ÁREA DE ESTUDIO

2.1 ALTO VALLE DE RIO NEGRO Y NEUQUÉN

Con la anexión militar de la norpatagonia al estado argentino y luego de la subdivisión de las grandes extensiones de tierra apropiadas en este proceso, la llegada de los primeros colonos a las provincias de Río Negro y Neuquén y su expansión en el territorio fueron conformando el paisaje agrario actual (Galeazzi *et al.*, 2018).

Las condiciones climáticas imperantes en la región, caracterizada por un marcado déficit hídrico, hicieron que el uso del agua para riego fuera fundamental en el proceso de transformación de un espacio natural a un territorio agrícola de regadío que conformó el perfil socio productivo de la zona.

El Sistema Integral de Riego del Alto Valle (SIRAV) constituye la infraestructura de riego más importante de la provincia de Río Negro, permitiendo la sistematización de aproximadamente 60000 hectáreas. Actualmente, cuenta con siete consorcios de primer grado encargados de la operación y mantenimiento de las redes de riego y drenaje (Figura 2.1): Cinco Saltos, Cipolletti, Allen-Fernández Oro, General Roca, Cervantes, Ingeniero Huergo y Villa Regina. Todos forman parte de un consorcio de segundo grado que se ocupa del canal principal y obras menores.

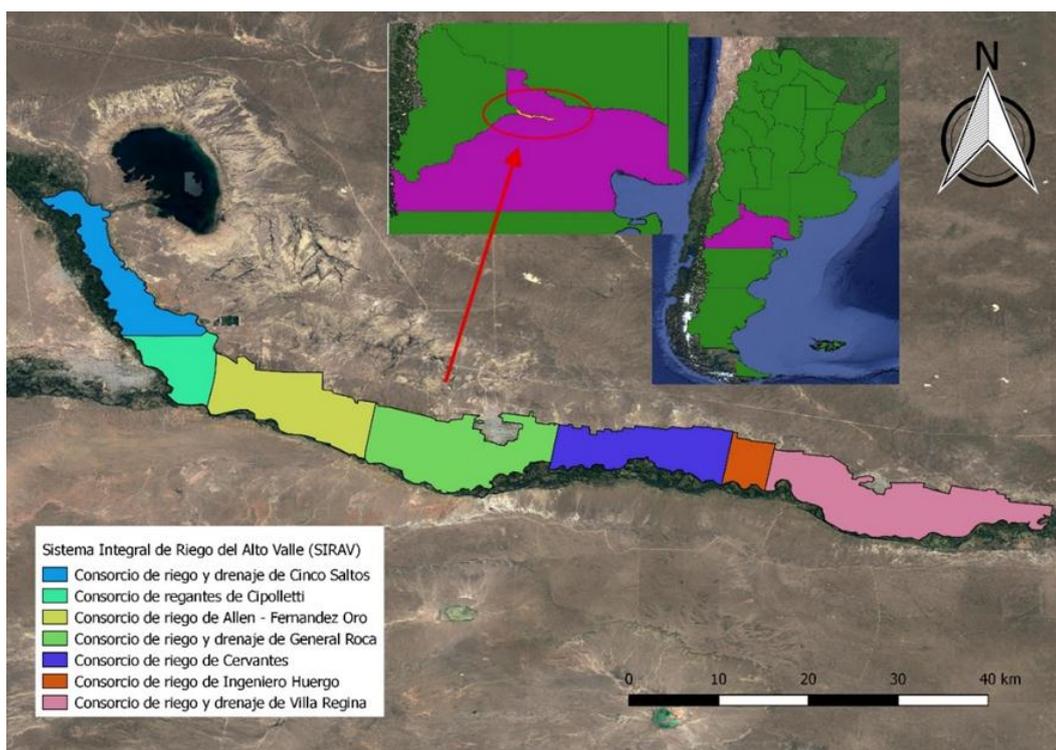


Figura 2.1. Consorcios del sistema de riego del AVRNYN. Fuente: Elaboración propia, 2020.

El SIRAV cuenta con un total de 130 km de canal principal, 239 km de canales secundarios y 333 km de canales terciarios y cuaternarios (Figura 2.2); a esto se debe sumar una longitud de canales comuneros de aproximadamente 1285 km (FAO, 2015b). Este sistema posibilitó el desarrollo y conformación del AVRNYN, un extenso valle irrigado que se sitúa entre los 38º y 39º de Latitud Sur y 67º a 68º grados de Longitud Oeste, dentro del Departamento de General Roca (FAO, 2015b).

El desarrollo de la agricultura bajo riego en la zona ha dado lugar a un complejo urbano-rural que se extiende a lo largo de 120 km y en el que se asientan más de 300000 habitantes. La altitud de la región oscila entre 185 msnm hacia el Este y 270 msnm al Oeste (FAO, 2015b).

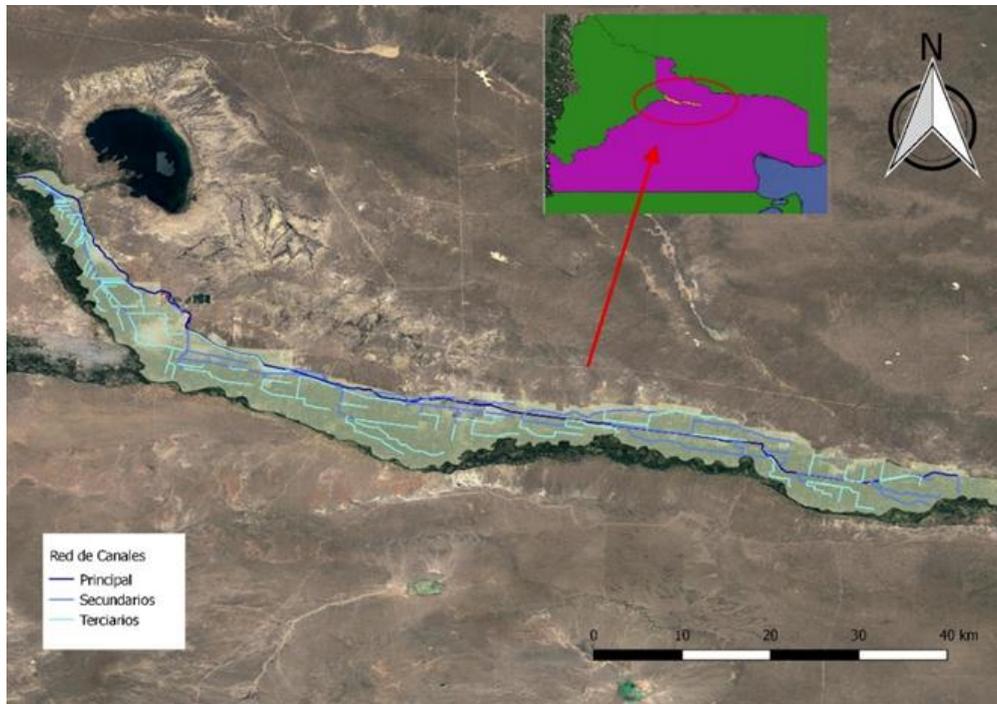


Figura 2.2. Red de canales de riego del AVRNYN. Fuente: Elaboración propia, 2020.

2.1.1 Clima

El 80% del territorio argentino se encuentra en la diagonal árida sudamericana, considerada un fenómeno único en el mundo. El Alto Valle se encuentra en esta extensa área que se caracteriza por tener un clima con distintos grados de deficiencia hídrica. De acuerdo con Thorntwaite, el clima se caracteriza por ser árido a semiárido, mezo termal y con lluvias deficientes durante todo el año. En la clasificación de Köppen la zona está dentro de la región climática Bwk (clima seco, desértico fresco). Según Pauli (1989) el AVRNYN se encuentra dentro del “Árido templado de las planicies del Monte”, las temperaturas medias se hallan alrededor de los 14º - 15º C, las precipitaciones se concentran entre los 150 y 200 mm anuales.

Las clasificaciones evidencian un balance hídrico negativo, es decir, que la región se caracteriza por una baja pluviometría y una elevada evapotranspiración potencial (ETO) que varía en el rango de los 1150-1200 mm anuales, denotando un marcado déficit hídrico. Esta característica indica la importancia del riego en la zona para poder producir un cultivo. Las lluvias son más abundantes en otoño-invierno, fenómeno que evidencia la influencia del Anticiclón del Pacífico. En relación a las heladas son 140 los días libres siendo el 1 de noviembre la fecha media de las últimas heladas (FAO, 2015a).

La zona posee una marcada amplitud térmica, propia de su carácter continental, con valores medios de 17º. El viento se presenta durante todo el año adquiriendo velocidades medias entre 5 y 9,3 km/hora, con un valor medio anual de 6,7 km/hora. Las mayores velocidades se registran en los meses de primavera-verano. Estos van de suaves a fuertes, con ocurrencias de ráfagas de hasta 100 km/hora. La dirección más

frecuente es del Oeste, luego le siguen los del Sudoeste y en menor medida los provenientes del Sur y el Norte (Rodríguez *et al.*, 2005).

La región posee una elevada heliofanía y radiación solar, con un valor medio anual de 6,9 horas con el máximo en verano de 9,8 horas y que, disminuye hacia los meses de invierno a 3,7 horas (Rodríguez *et al.*, 2005).

2.1.2 Geomorfología y suelos

El AVRNYN ocupa la porción inferior de las terrazas labradas por los ríos. Su origen se remonta al cretácico y los sucesivos impulsos de ascenso de la Cordillera de los Andes han modificado sistemáticamente los niveles de base de los ríos, originando un amplio sistema de terrazas, donde la actividad antrópica ha ocupado los niveles inferiores (Mendía *et al.*, 1995).

Se distinguen cuatro unidades geomorfológicas, distribuidas en forma discontinua, y definidas por el origen de los materiales que la conforman, la edad y los procesos que han regido su formación: las Llanuras Aluviales Recientes, las Subrecientes (fajos meandros), la Llanura Aluvial Antigua y la Llanura Aluvio-coluvial.

Las llanuras aluviales Recientes y Subrecientes se sitúan sobre el cauce principal del Río Negro, próximos a éste, o menos frecuentemente acompañando cursos de agua interiores. Existen evidencias claras de una actividad fluvial más reciente y dentro de ella se destacan cauces abandonados, meandros, lagunas semilunares y tierras inundables en épocas de grandes crecidas (Mendía *et al.*, 1995).

La Llanura Aluvial Antigua abarca niveles más elevados e intermedios del valle, conformando comúnmente extensas superficies de relieve prácticamente llano, donde se distingue una densa red de drenajes anastomosada y cauces casi totalmente colmatados.

La Llanura Aluvio-coluvial ocupa la superficie que queda delimitada entre las terrazas antiguas más altas y el área de escarpa correspondiente a taludes de barda que separan el valle de los niveles de meseta adyacentes; configuran las áreas más inclinadas con pendientes de hasta el 4 % (FAO, 2015a).

Los suelos son típicamente aluvionales, originados en sucesivos depósitos de material arrastrado desde las vertientes por los ríos Negro y Neuquén, de texturas no muy pesadas, entre arenosos y franco limoso, escasos en materia orgánica, con velocidad de infiltración media a alta y con un perfil generalmente profundo (Mendía *et al.*, 1995).

Su escaso desarrollo está vinculado a las condiciones climáticas de aridez y semiaridez, y a la dinámica fluvial del Río Negro. Esta movilidad no es sólo horizontal, también el río ha intervenido con sus propios depósitos dando lugar a la formación de distintos niveles de terraza.

Por lo expuesto, se advierte una diversidad horizontal y también vertical de los materiales existentes, que genera variaciones en espacios muy cortos de los depósitos de origen fluvial en las terrazas más modernas utilizadas con fines agrícolas. A la deposición de material de origen aluvial por acción del río, deben sumarse los depositados por el viento que llevaron a la formación de médanos pequeños y de poca altura (Mendía *et al.*, 1994).

Los materiales originarios determinaron dos características fundamentales de los suelos de la región. Una es el alto contenido salino del material parental, responsable en parte de la actual salinidad de los suelos y la otra, los gruesos sedimentos cerca de la superficie que permiten un buen drenaje y permeabilidad, fundamental para la recuperación de suelos salinos (FAO, 2015a).

La diversidad de materiales depositados y de procesos geomórficos originaron múltiples unidades de suelos de distintas edades y características, aunque sobrepuestas todas a un potente manto de rodados fluviales, de 10 a 15 metros de espesor (FAO, 2015a).

En cuanto a la clasificación de suelos, la mayoría son Aridisoles y Entisoles. Los primeros se caracterizan por una escasa definición de horizontes pedogenéticos, es decir, suelos poco evolucionados o de reciente formación, muy poco alterados por factores del medio natural, perdurando en el tiempo las características de sus materiales parentales. Los Entisoles, de mayor significancia espacial, presentan diferenciación de horizontes pedogenéticos, indicadores de un mayor grado de desarrollo edáfico, atribuibles a posibles condiciones de relictos de períodos pluviales anteriores.

Dada la gran variabilidad de suelos presentes, es importante destacar que existen diferentes comportamientos hídricos frente a los aportes de agua para riego. Así mismo, se destaca también en diversos trabajos regionales, dos limitaciones muy importantes: la salinidad y las condiciones redox dentro del perfil radicular. Estas se deben entre otras causas a la altura de la capa freática, tema también ampliamente abordado en la bibliografía regional (Mendía *et al.*, 1995).

2.1.3 Hidrogeología y monitoreo de las aguas subterráneas

Según Godagnone *et al.* (2009) el AVRNYN se encuentra en dos unidades hidrogeológicas: “Sedimentitas Continentales Cretácico-Terciarias” y “Complejo sedimentario Post Plioceno” (Figura 2.3).

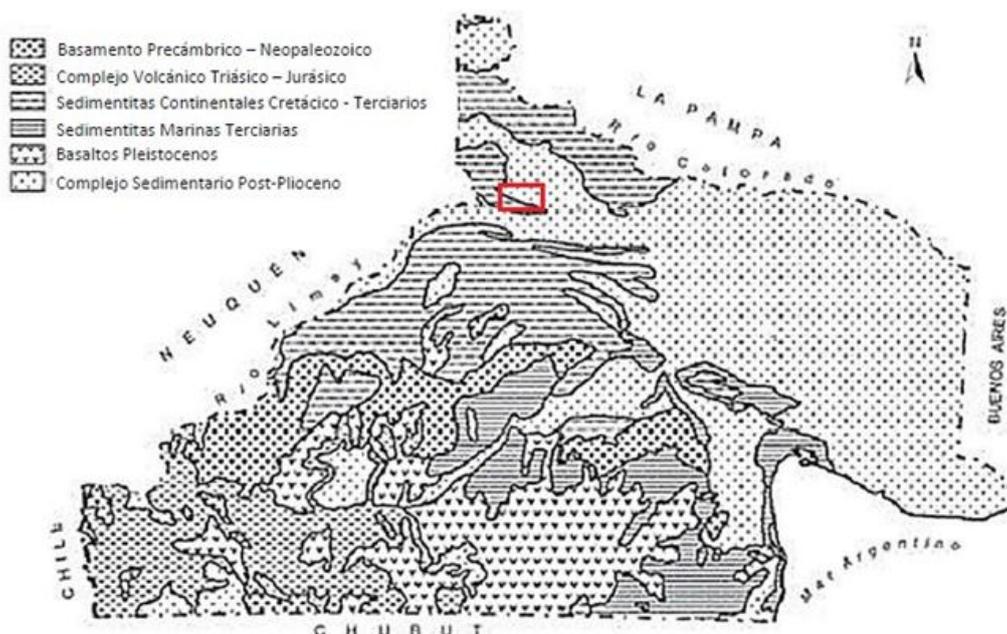


Figura 2.3. Unidades Hidrogeológicas de la provincia de Río Negro, recuadro en rojo: área de estudio. Fuente: Godagnone *et al.*, 2009.

Las primeras son un complejo de sedimentitas continentales, de porosidad intersticial y permeabilidad baja. Los acuíferos explotados en general son arenas limoarcillosas, de poca potencia y raramente superan los 2 m de espesor, intercaladas entre capas de arcilla. Dentro del Alto Valle se han podido definir dos zonas con características propias, al Oeste de la ciudad de General Roca se observan acuíferos generalmente de buena calidad química y con caudales de unos 20 m³/h, localizados a profundidades entre 25 y 80 m en la formación cretácica de la cuenca Neuquina. Hacia el Este la profundidad promedio es de 100 m dentro de la Formación Chichinales y consiste en un área de surgencia con caudales de 10 – 15 m³/h y Conductividad Eléctrica superior a los 6,25 dS/m (Godagnone *et al.*, 2009).

El Complejo Sedimentario Post-Plioceno contiene sedimentos de porosidad intersticial y permeabilidad moderada a alta. Debido a que dicha unidad posee un área muy extensa y una gran cantidad de obras de captación que explotan sus acuíferos, se trata de la unidad hidrogeológica de mayor importancia de la provincia. El complejo ha sido dividido en dos subunidades: la planicie fluvioglacial, donde existe un dominio de la sedimentación rionegrense representada en el sector Norte y Noreste de la provincia y la agrupación de todos los rellenos cuaternarios, fundamentalmente los aluvios-coluvios a lo largo de la Línea Sur y los valles de la región cordillerana. El Alto Valle se encuentra en la primera subunidad, donde los acuíferos están localizados a profundidades entre 40 y 100 m, con caudales y cualidades químicas muy variables. La principal aplicación del agua es para el desarrollo ganadero, captándose a través de pozos bombeados, por lo general, con molinos de viento (Godagnone *et al.*, 2009).

El AVRNYN posee un acuífero freático cuyo espesor ronda los 12 metros. Su límite superior, el nivel freático (NF), se encuentra a una profundidad de alrededor de 1 a 4 metros por debajo del terreno, y su hidroapoyo, entre los 9 y 20 metros de profundidad, dependiendo de la zona. Este es de escasa producción y se utiliza para riego a presión, industrial y doméstico (Rossi, 2013).

El área irrigada del Alto Valle fue monitoreada desde el año 1983 hasta el 2012 por una red de aproximadamente 800 freatómetros construida por Agua y Energía Eléctrica Sociedad del Estado (AyEE). Los registros, con el correr de los años fueron utilizados por distintas instituciones como el Departamento Provincial del Agua (DPA), la Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas (AIC), los Consorcios de Riego y Drenaje y la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional del Comahue. Se elaboraron informes y se analizó la dinámica de la freática con distintas finalidades como el dimensionamiento de nuevas obras para riego y drenaje, el sustento técnico de diversas problemáticas presentadas por particulares sobre drenaje, la definición de prioridades de trabajos de limpieza y mantenimiento y la optimización de los sistemas de riego y drenaje en los sectores detectados con problemáticas mayores (Rossi, 2013).

2.1.4 Actividad Productiva

El AVRNYN es una importante zona bajo riego productora por excelencia de frutales de pepita (peras y manzanas). Para la provincia de Río Negro dicha economía es troncal para el desarrollo regional. Las estadísticas nacionales y provinciales indican que las exportaciones del complejo frutícola representan el 4,2 % del total de las exportaciones argentinas. Las peras y manzanas representan el 17 % del complejo frutícola (0,7% del

total nacional). En el 2018 se exportó un total de 407309 toneladas, 77% corresponde al cultivo de la pera (Villareal, 2018).

La incidencia del complejo de peras y manzanas en la economía de las provincias norpatagónicas es más significativa en términos de exportación en relación a su aporte al PBG provincial. En Río Negro el complejo aporta al 10,7 % del PBG y al 78 % de las exportaciones. La producción involucra a unos 1800 productores, el empleo directo generado por el sector es de aproximadamente 50000 puestos de trabajo (Villareal, 2018).

En relación a las superficies cultivadas, según el censo estadístico 2019 publicado por el Servicio Nacional de Sanidad y calidad Agroalimentaria (SENASA), en todo el Alto Valle hay un total de 24377 ha de peras y manzanas. Del 2018 al 2019 hubo un detrimento en la superficie plantada de un 7,5 % aproximadamente, lo que demuestra la crisis frutícola que se está atravesando (SENASA, 2020).

Otros cultivos presentes en menor proporción son los frutales de carozo (nectarines, durazno, damasco, ciruelas, cerezas) con un total de 1396 ha. Con una presencia mucho menor, le sigue la vitivinicultura con 1161 ha cultivadas en todo el Departamento de General Roca (SENASA, 2020).

Actualmente la matriz productiva exclusivamente frutícola ha quedado como un recuerdo de principios del siglo XX. El paisaje productivo y social ha cambiado notablemente.

Las tensiones surgidas por el uso de la tierra en el AVRNYN adquieren cada vez mayores dimensiones. Existen núcleos urbanos de servicios e importantes áreas rurales capital intensivas, en las cuales se desarrollan y coexisten distintas prácticas, actores e infraestructuras. Conviven allí actividades frutícolas y no frutícolas, empresas de servicio e industrias, áreas de vivienda y esparcimiento, rutas y caminos y una importante red de riego y drenaje que atraviesa distintas ciudades y zonas rurales. Estos diversos usos generan diferentes niveles de conflicto (Urza et al., 2013).

El territorio productivo se repliega y hay amenazas crecientes de una importante pérdida de calidad de suelo y de agua. Se trata de un dilema local que se configura en torno a políticas nacionales y tendencias globales, con impacto directo en el territorio (política energética, productiva, macroeconómica) y a una economía regional básicamente frutícola, que tiende cada día a una mayor concentración, a una profundización de la brecha tecnológica y a la expulsión de actores del sistema (Catoira, 2014).

2.2 CONSORCIO DE RIEGO Y DRENAJE DE VILLA REGINA (CRyDVR)

El CRyDVR (Figura 2.4) se encuentra al final del SIRAV y abarca las localidades y zonas rurales de General E. Godoy, Villa Regina y Chichinales con una superficie bajo riego aproximada de 13400 ha.

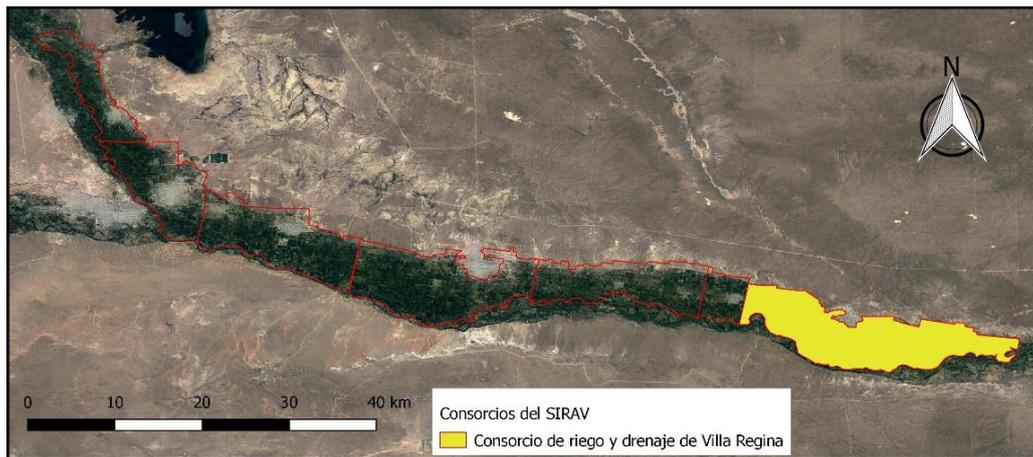


Figura 2.4. Localización del distrito de Villa Regina en el SIRAV. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Cabe destacar que, debido a los progresivos y profundos cambios del uso del suelo en el Valle (ver apartado 2.1.4) existe una tendencia a la disminución de la actividad frutícola. No obstante, el distrito de Villa Regina es el que actualmente mantiene aún más el polo productivo, ya que posee el 38 % de toda la producción de frutales de pepita, el 35 % de la capacidad frigorífica provincial y el 33 % de los productores de la provincia (SENASA, 2020).

En el marco de un Proyecto PROFEDER del INTA Alto Valle con profesionales de la AER Villa Regina y en el proceso de formación de una beca institucional junto a los técnicos del consorcio de Riego y Drenaje de Villa Regina, se elaboró y confeccionó la cartografía de base (Figura 2.5) (Montenegro *et al.*, 2018), con el objetivo de conformar una BDG que sea de utilidad para el distrito, que cabe destacar, actualmente la utiliza.

Entre las principales actividades que se desarrollaron en marco del proyecto, se destaca la recopilación de antecedentes y digitalización de mapas relevantes para el área, relevamientos a campo con toma de puntos en GPS, análisis y elaboración de datos freaticométricos, confección de diversas capas de información para la confección de la base de datos geográfica (BDG) propia del distrito. Entre las capas obtenidas se destacan (Figura 2.5): capa de red oficial de canales y desagües actualizada al 2020, red de comuneros, capa de compuertas, recorte de estudios de suelo regionales, capa de freáticos con mediciones mensuales hasta la fecha, capa catastral unida a la base de datos de usuarios del sistema, entre otras.

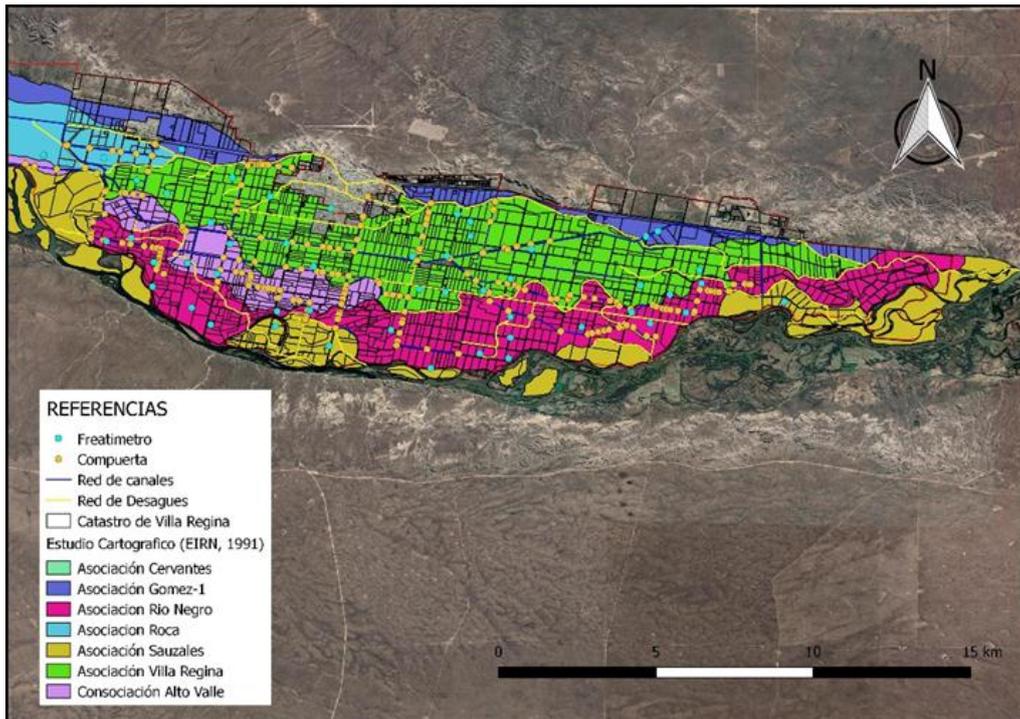


Figura 2.5. Base de Datos Geográfica del Distrito. Fuente: Elaboración propia, 2020.

2.2.1 Red de riego

La red de riego del Distrito de Villa Regina está conformada por una extensa red de canales y desagües que se distribuyen a lo largo del área de estudio. En el kilómetro 89 del canal principal aparece la primera compuerta (Figura 2.6) que da inicio a toda la red con el nacimiento del canal secundario VIII.



Figura 2.6. Compuertas en el kilómetro 89 que dan inicio al distrito de riego. Fuente: CRyDVR, 2021.

La red de canales está conformada por 24,5 km de canal primario, 41,9 km de canales secundarios, 43 km de terciarios y 14,8 km de cuaternarios, a lo que deben sumarse los canales comuneros con un total de 190 km de longitud. Cabe destacar que ningún canal en el área está cementado y según el CIL-AyEE (1991d) existe una pérdida de agua por filtraciones del 10 % del caudal transportado que va directo al acuífero freático.

La red de drenaje encargada de evacuar el agua en exceso hídrico producto de la recarga por riego y por eventos de lluvias, posee una longitud total de 143,5 km considerando tanto los cauces naturales como los artificiales.

La red freaticométrica se mantiene desde la década de 1980, cuando AyEE en el marco del Estudio Integral del Río Negro, instaló alrededor de 800 pozos de observación en todo el valle, como se explica en el apartado 2.1.3.

A partir del 2013 hasta la actualidad, el monitoreo de la red correspondiente al área de estudio quedó a cargo del consorcio, que realiza mediciones mensuales. En el distrito quedan activos 51 freaticómetros, lo que arroja una densidad de 262 ha por cada pozo. Se pretende avanzar en proyectos futuros para disminuir la densidad aumentando el número de pozos en relación a la configuración espacial actual (comunicación personal, Osvaldo Vettori, 2019). En la Figura 2.7 se observa la red de canales y desagües con la distribución de los freaticómetros en el consorcio, capas elaboradas por profesionales y técnicos del INTA y del Distrito.

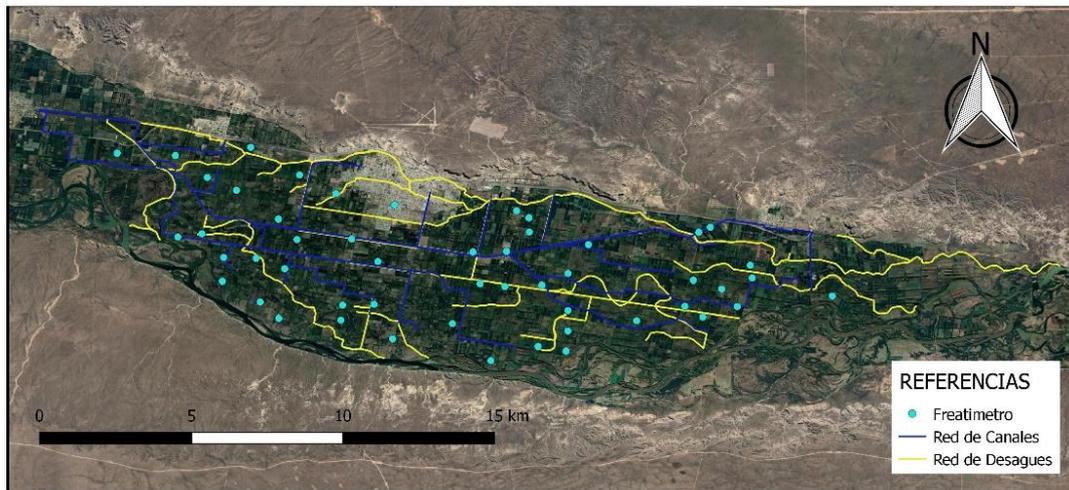


Figura 2.7. Configuración de la red de riego del CRyDVR. Fuente: Elaboración propia, 2020.

El área consorcial de Villa Regina, en comparación al comportamiento de drenaje de todo el valle posee características propias que la diferencian. En la zona Este del área la dinámica del drenaje se ve fuertemente influenciada por los niveles del río y por tres drenes naturales, el Primer Salado (Figura 2.8), el Segundo y Tercer Salado. Estos, junto con el desagüe G al Oeste del área, son los más importantes para drenar el exceso de agua de las 13400 ha.



Figura 2.8. Primer Salado, Izq: descarga al río en Chichinales, Der: Primer Salado en sus inicios en Villa Regina en agosto. Fuente: Elaboración propia, 2020.

En plena época de riego cuando se espera que el nivel freático esté en su punto más alto, dicha recarga se torna difícil de evacuar. Los niveles del río ascienden de forma tal que impiden la normal evacuación del agua y se forman lagunas que abarcan grandes extensiones de tierra (Figura 2.9). En invierno los niveles descienden considerablemente, pero los cuerpos de agua mantienen un mínimo nivel (comunicación personal, Horacio Starkloff, 2019).

Álvarez *et al.* (1995) afirmaron que el drenaje natural, es decir, la velocidad de evacuación del agua, presta una mención especial en dicho distrito. La zona de la ciudad de Villa Regina en comparación al resto del valle, posee un drenaje natural mayor, es decir, que evacua más rápido el agua de drenaje por su propia condición natural. Al Este, esta variable disminuye, nótese que coincide con el comportamiento descrito por técnicos del consorcio, que destacan la dificultad de evacuar el agua en la zona de Chichinales.



Figura 2.9. Lagunas permanentes en época de máximo riego (octubre). Fuente: Elaboración propia, 2019.

CAPÍTULO 3 – METODOLOGÍA

La metodología utilizada se basó en técnicas de trabajo de campo en el distrito y técnicas de gabinete utilizando los programas de modelación matemática y de SIG para el desarrollo, análisis y evaluación de todos los datos recopilados y de procesamiento de imágenes satelitales.

En relación a la compilación de datos, se realizó una búsqueda bibliográfica en las bases de datos existentes de organismos vinculados a la temática hídrica en la región. Esta información fue utilizada como insumo para el modelo matemático y para robustecer la base de datos geográfica (BDG) ya existente.

3.1 CONSOLIDACIÓN DE BASE DE DATOS GEOGRÁFICA

La AIC aportó la base de datos de los caudales del Río Negro medidos en la estación de aforo de Allen que se localiza en Latitud: 39° 1'56.35"S y Longitud: 67°50'28.30"O, a 58 kilómetros aguas arriba del área de estudio. Se obtuvieron los datos diarios y en unidad de m³/s, el período comprendido fue desde el 1 de enero del 2010 hasta el 31 de diciembre del 2019. Así mismo, se obtuvo una capa de información para la BDG, de cotas topográficas de mojones dispersos en el Alto Valle.

El DPA aportó la base de datos de la Estación Limnigráfica de Villa Regina, ubicada en Latitud: 39°10'1.26"S y Longitud: 67° 5'54.12"O. La estación brindó el valor diario de la cota IGN del pelo de agua y la altura en el período 2010-2019, a fin de estimar las alturas del río que fueron utilizadas en la calibración del modelo.

El CRDyVR aportó la base de datos de las mediciones mensuales de la red freaticométrica en el período 2010-2019, los caudales medidos al ingreso del distrito en l/s, las cotas del Ministerio de Obras Públicas de la Nación (MOP) de los puentes distribuidos en el área y los caudales de toda la red de canales en el período de riego.

La base de datos climática de la Estación Meteorológica de Villa Regina fue aportada por el área de agrometeorología de la EEA Alto Valle, ubicada en la Latitud: 39° 7'55.76"S y Longitud: 67° 6'20.06"O. Dicha base contó con datos cada 10 minutos de precipitación y evapotranspiración potencial (ET_o) en el período 2010-2019. La Figura 3.1 muestra la localización de las estaciones de medición.

Cabe aclarar que el período de análisis contempló condiciones tanto húmedas como secas del sistema, teniendo en cuenta eventos extremos que ocurren en el área. Así, el modelado y el testeo de las imágenes analizadas se realizó con cierta variabilidad del sistema.



Figura 3.1. Ubicación de las Estaciones de Medición. Fuente: Elaboración propia, 2021.

En todas las bases de datos se realizó una depuración de la información. Los valores que eran atípicos o fuera del rango fueron eliminados para no arrastrar errores. En el caso particular de la base freaticométrica, se eliminaron todos aquellos freáticos que se hallaban identificados como rotos, secos, con barro o tapados.

Se homogeneizó toda la información de las mediciones a escala temporal mensual. Los caudales se expresaron en L/s, el resto de las variables fueron medidas en metros. Las variables climáticas si bien fueron obtenidas en mm/mes para incorporarlas al modelo se expresaron en mm/año.

Se utilizó el software libre QGIS para la conformación de las distintas capas de la base de datos geográfica del distrito de riego de Villa Regina y para la elaboración de los Índices de Agua.

Utilizando las herramientas de digitalización vectorial y de edición de capas *shape* se conformaron nuevas capas con la información de las bases de datos y de la información relevada. En relación a los datos de campo, se cargaron los archivos de GPS al software y los puntos tomados se convirtieron en capas *shape* a las cuales se les anexó una tabla de atributos (Figura 3.2), utilizando la herramienta de edición de capas.

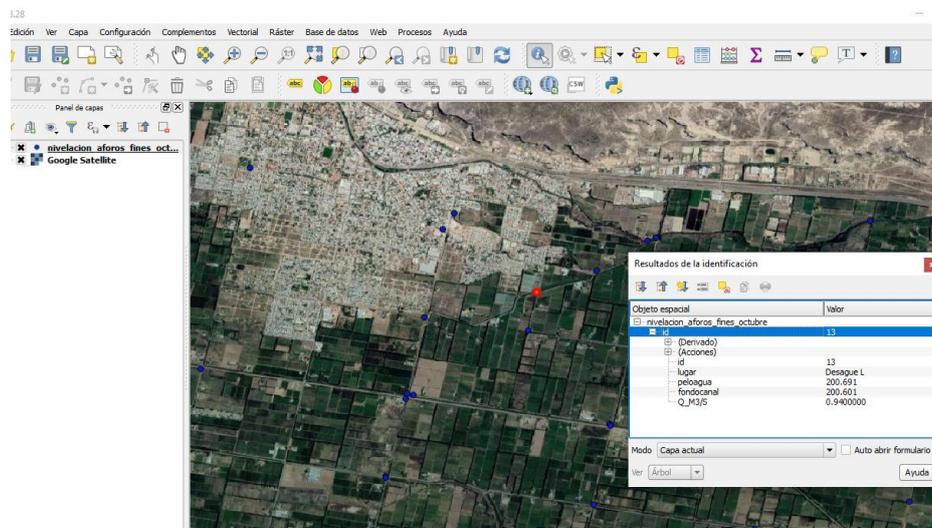


Figura 3.2. Capa de datos relevados a campo, campaña de octubre 2020. Los puntos azules indican la localización de los datos relevados. Fuente: Elaboración propia, 2021.

En relación a la base de los freáticos, se conformó la capa de lectura de datos de agosto del 2018, se confeccionó una tabla Excel con las lecturas de cada freático y con la cota terreno se calculó la cota del nivel freático en ese momento, luego se cargó el archivo al software y se creó la capa *shape*, estos fueron los datos utilizados para calibrar el modelo en estado estacionario.

Los resultados de la calibración en cada freático fueron exportados del modelo al QGIS para ser evaluados y analizados los pasos intermedios como el resultado final. De esta manera se infirieron situaciones espaciales y patrones de comportamiento específicos.

3.2 GENERACIÓN DE DATOS HIDROGEOLÓGICOS

Se realizaron dos campañas de campo: la primera fue a principio de agosto y la segunda a fines de octubre del 2020. Las fechas fueron elegidas estratégicamente en relación a los períodos críticos de las fluctuaciones freáticas como se explica en el apartado 5.2.1.1. Se realizaron aforos en los canales y desagües de toda la red para tener conocimiento del agua que circula en los momentos críticos. Cabe aclarar que en la primera campaña eran sólo cuatro los desagües activos: el Primer, Segundo y Tercer Salado y el desagüe G (Figura 3.3). Se midieron con un GPS navegador e-trex 30 la localización de un punto al inicio y al final de cada uno de los desagües y en ellos se realizaron las mediciones de caudal y cotas de referencia.



Figura 3.3. Desagües activos en invierno, monitoreados en la primera campaña de agosto de 2020. Fuente: Elaboración propia, 2021.

El aforo se hizo utilizando el método de sección por velocidad con flotante (Basán Nickisch, 2008), que consiste en determinar el caudal aplicando la siguiente fórmula:

$$Q \left(\frac{m^3}{s} \right) = S (m^2) * V \left(\frac{m}{s} \right) \quad (1)$$

donde Q es el caudal, S es la sección transversal de la corriente y V es la velocidad de circulación del agua.

Inicialmente se seleccionó un tramo de aproximadamente 10 metros de longitud, lo más recto y uniforme posible, libre de cualquier obstáculo que pueda frenar a los flotadores (ramas de árboles, vegetación acuática). En el tramo seleccionado en la sección media

se demarcaron los límites (Figura 3.4): contorno del cauce y altura del pelo de agua para medir la sección.



Figura 3.4. Medición de sección transversal del primer salado en agosto de 2020. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Para medir la velocidad se utilizó un flotante de superficie, y en el tramo seleccionado se arrojó unos 10 m aguas arriba de la sección inicial. Cuando el flotador pasa por esa sección inicial se pone en marcha el cronómetro ($t_0 = 0$), parándolo cuando pasa por la sección final (t_1). Se repite la operación 3 veces (Figura 3.5).

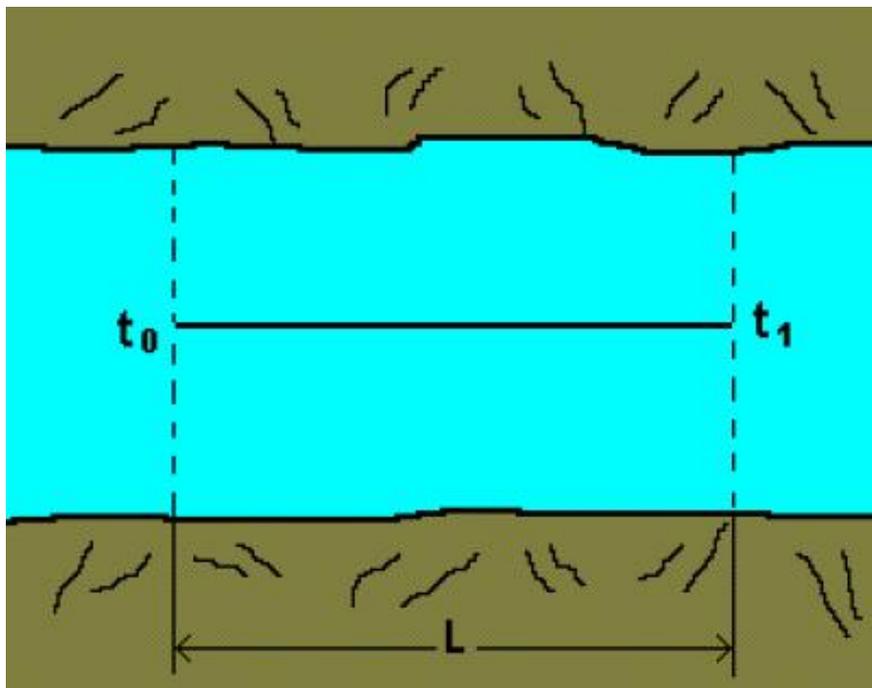


Figura 3.5. Determinación de la velocidad de flujo para el cálculo de caudal. Fuente: Basán Nickisch, 2008.

Se promedió el tiempo obtenido en las tres repeticiones y se determinó la velocidad máxima superficial con la siguiente ecuación:

$$V_{max\ sup} = L / t_1 \quad (2)$$

Donde $V_{max\ sup}$ es la velocidad máxima superficial del cauce, L es la longitud del tramo recorrido por el flotante, y t_1 es el promedio de los tiempos obtenidos.

Luego se transformó la velocidad máxima superficial en velocidad media de la sección a través de un coeficiente, siendo éste de 0,85 (Basán Nickisch, 2008).

$$V_{media} = Cte * V_{max\ sup} \quad (3)$$

Finalmente, para obtener el caudal se sustituyen los valores medidos en campo tanto de la sección como de la velocidad en la Ecuación 1.

Las cotas que se requieren para el modelo matemático son el pelo de agua del desagüe y su fondo. Para ello, se localizaron todas las cotas conocidas que están distribuidas en algunos puentes del distrito tomadas del Ministerio de Obras Públicas de Nación (Cotas MOP) cuando se realizaron en el año 1957 para la construcción de la Ruta Nacional 22.

Conociendo la cota MOP más cercana al punto de interés, se realizó la nivelación. En los casos en los que fue necesario, debido a la distancia, se hicieron estaciones centrales de nivelación para llevar la cota a los puntos requeridos (Figura 3.6) y luego en gabinete se realizaron los cálculos pertinentes en planillas de cálculo (Excel). Se realizó una nivelación diferencial con un nivel ZEISS West Germany Ni 21 y una mira graduada BOSCH GR 500 Professional.

La segunda campaña de medición se realizó la última semana de octubre de 2020, época en la cual todos los desagües están activos y la red de canales distribuye el agua a las chacras.



Figura 3.6. Estación central de nivelación en el Segundo Salado (nivelación en el CRyDVR). Fuente: Elaboración propia, 2020.

En cada canal y desagüe en su tramo inicial y final, se realizaron las mismas determinaciones que en la campaña de agosto. La metodología para determinar el caudal y las cotas requeridas por el modelo fue idéntica a la efectuada en la primera campaña.

3.3 CÁLCULO DE ÍNDICES DE AGUA SUPERFICIAL

Las fechas de las imágenes se seleccionaron en función de los datos de caudales. Se analizó la base de datos de los aforos en el período 2010-2019, se registraron caudales elevados (superiores a 1000 m³/s) en invierno de los años 2012 y 2018. En el año 2017 se registraron los caudales más bajos, en el orden de los 400 m³/s.

Con técnicas de Teledetección y SIG se detectaron patrones de crecidas del río en la zona, seleccionando los meses de agosto del año 2017 y 2018, es decir, un año con caudal bajo (2017) y un año con caudal de crecida (2018).

Para tal fin se buscaron y descargaron imágenes satelitales Sentinel 2 disponibles en la página de la Agencia Espacial Europea (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>). Las fechas seleccionadas y el caudal del río en los instantes a evaluar se observan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Caudales del río Negro en las fechas de las imágenes obtenidas. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Fecha de la escena S2	Caudal del río Negro (m ³ /s)
01/08/2017	318,66
01/08/2018	1157,97

En el año 2018 el caudal del río fue aproximadamente el triple del caudal que se registró en el año 2017. Se infiere que dicho volumen de agua debería traducirse en un aumento de la superficie cubierta de agua por el río. Dicha afirmación se trató de confirmar con el cálculo de índices espectrales de agua en superficie.

Se preprocesaron ambas imágenes en QGIS 2.18 con el *Semi- Automatic Classification Plugin* (SCP), se calibraron radiométrica y geoméricamente las bandas GREEN, NIR Y SWIR (B3, B8 y B11) y la B11 se re muestreó en ambas escenas a una resolución de 10 metros.

Con la calculadora raster se elaboraron: el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) (Mc feeters, 1996) y el Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI) (Xu, 2006),

$$NDWI_{S2} = (B3 - B8) / (B3 + B8)$$

$$MNDWI_{S2} = (B3 - B11) / (B3 + B11)$$

Donde, B3 es la banda GREEN, B8 es la banda NIR y B11 es la banda SWIR en el satélite Sentinel 2. Ambos índices se basan en la diferencia de la respuesta espectral del agua en superficie entre la banda verde del visible e infrarrojo cercano y medio. Esa diferencia es mayor cuando hay presencia de agua como firma espectral típica (Mc feeters, 1996; Xu, 2006). Estos índices asumen valores entre -1 y 1, indicando presencia de agua para valores mayores a cero; los valores menores a cero son las coberturas vegetales y suelo desnudo.

Dada la bibliografía consultada en el apartado de Antecedentes **1.7.1** y teniendo en cuenta que no se han utilizado en la zona de estudio, se decidió aplicar ambos índices, debido a su performance a la hora de detectar cuerpos de agua superficiales.

Luego se analizó el histograma de frecuencias de cada índice y se seleccionó un umbral de "0" para aplicar una máscara y construir un *raster* binario con valor 0: no agua y 1: agua.

En ambos años los índices se sumaron para conformar un solo *raster* y así complementar las áreas que indicaron que contenían agua en superficie, siendo los pixeles con valor 1 y 2: contenido de agua y 0: sin agua.

Finalmente, cada *raster* se vectorizó utilizando la herramienta de rasterización y se calculó el área de los polígonos con valor de número digital 1 y 2, es decir, aquellos pixeles que representaban agua. Dicha suma fue el área total que abarcó el curso de agua en la fecha indicada. En la Figura 3,7 se muestra el diagrama de flujo de la metodología desarrollada en ambos años.

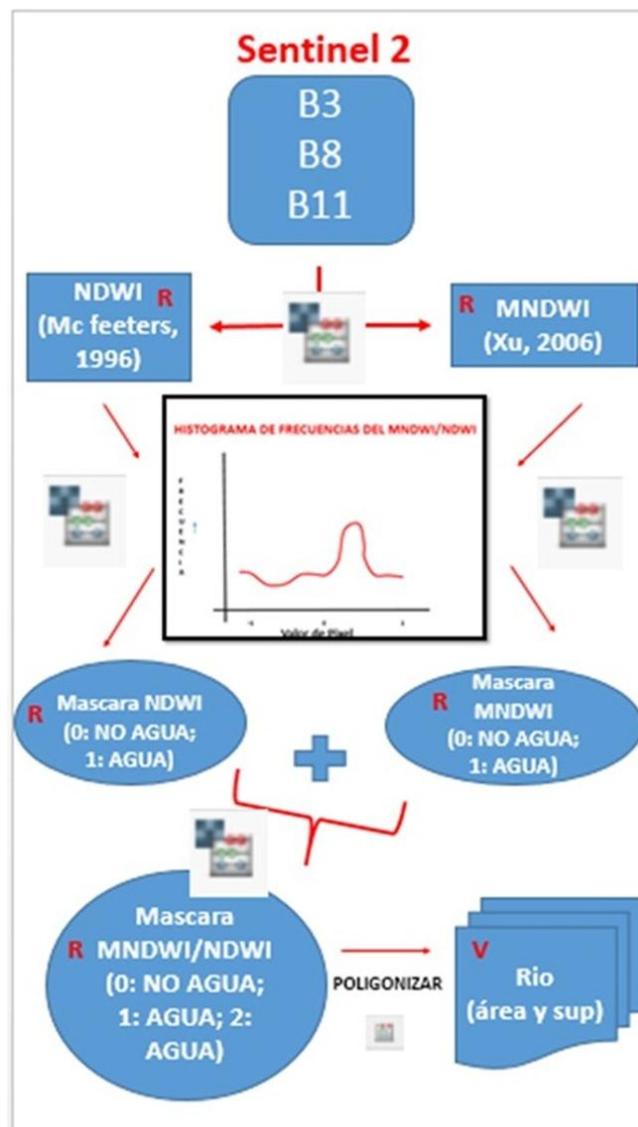


Figura 3.7. Diagrama de flujo, en cada paso se indica con la letra R si la capa es un raster y con la letra V si es un shape. Fuente: Elaboración propia, 2021.

3.4 IMPACTO DE LA CRECIDA DEL RÍO EN EL ACUIFERO FREÁTICO

Se analizó el impacto temporal de la crecida del río en el acuífero freático, para ello se seleccionaron todos aquellos freatímetros que se encontraban a menos de dos kilómetros de distancia del río, dado que Montenegro (2014) en su estudio reveló que a mayor distancia no se evidencia influencia del río en la altura de la capa freática en la región.

En una planilla de cálculo, se elaboraron los freatigramas del año 2017 y 2018 de los pozos seleccionados; se analizaron para corroborar si entre ambos meses se registró un ascenso y, en caso de confirmarlo, poder determinar su magnitud. Se calculó el promedio de ascenso de la napa en el área estudiada con las diferencias de nivel entre agosto del 2018 y agosto del 2017.

3.5 DEFINICIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL

En base al conocimiento del área tanto por estudios previos y recopilación de datos como por entrevistas con técnicos del consorcio de riego, se elaboró el modelo conceptual del área. Para determinar la geometría del acuífero freático a modelar, se obtuvo de estudios previos el relieve, la geomorfología y geología de la zona. Del análisis de los datos de la red freatimétrica, se obtuvo la hidrodinámica del acuífero freático. Técnicos del CRDyVR aportaron información en relación a la red de riego y drenaje y la dinámica teórica de su influencia en el acuífero freático.

Toda la información reunida sirvió para comprender y determinar el modelo conceptual, y cómo el acuífero freático se interrelaciona con los demás factores tanto naturales como antrópicos del área de estudio.

3.6 ESTRATEGIAS DE MODELACIÓN

La metodología propuesta para este estudio se basó en el empleo de técnicas de simulación numérica para predecir las fluctuaciones de los niveles freáticos. Una vez elaborado el modelo conceptual del sistema, se reprodujo el flujo subterráneo mediante su simulación numérica en régimen estacionario, evaluando los resultados y comprobando que el movimiento de agua se condice con el modelo conceptual propuesto (Marizza *et al.*, 2009).

Es importante resaltar que en el estado estacionario los valores de rendimiento no cambian, no hay variación de almacenamiento.

Se pretendió dejar las bases para que en futuras líneas de investigación dicho modelo sea empleado para analizar temporalmente la respuesta del sistema a las acciones relacionadas con el riego y el drenaje evaluándose su viabilidad para predecir situaciones futuras derivadas de otros escenarios de manejo.

3.6.1 Construcción del Modelo Numérico en Estado Estacionario

Se utilizó el código Modflow (Harbaugh *et al.*, 2000) del Geological Survey de Estados Unidos, en su versión amigable VisualModflow 2011.1 desarrollada por Waterloo Hydrogeology Inc. El método de solución utilizado es el método numérico, cuyo uso en problemas de flujo subterráneo y superficial se ha difundido notablemente en las tres últimas décadas. Uno de los puntos más críticos de las simulaciones numéricas en medios heterogéneos radica en la incertidumbre asociada a los parámetros físicos y a

las condiciones de borde (Cello, 2016), por ello, la calibración de dichos parámetros es fundamental.

Una vez conformado el modelo conceptual en el modelo numérico, se lo calibró utilizando Visual Modflow. Como primera premisa se realizó la calibración en Estado Estacionario, es decir, no se consideró que hubiera variación del almacenamiento en la ecuación de continuidad y, citando a Cello (2016), la calibración se realizó con el método de prueba y error, que resulta el más difundido hasta el momento. Para las observaciones que requiere el modelo se usaron las mediciones de la red freaticométrica de agosto del 2018, momento del año en el cual se considera que la capa freática no tiene influencia antrópica por la operación del sistema de riego que debido al receso invernal se encuentra inactivo.

Para simular los requerimientos hidrológicos de un sistema de agua subterránea, Modflow posee paquetes o subrutinas que agregan términos de entradas y salidas en la ecuación general de flujo (Bravo y Montoya, 2016). Se usaron varios paquetes o subrutinas para simular el modelo conceptual: para las condiciones de borde se aplicó las subrutinas de ríos (RIV), drenes (DRN) y altura constante (CHD), es decir, aquellas condiciones iniciales y de funcionamiento general de todo el sistema; para simular las acciones externas de recarga y extracción de flujo se utilizó el módulo de Evapotranspiración (EVT) y de recarga (RCH).

La Figura 3.8 muestra todas las condiciones de borde y su distribución espacial en el área a modelar para comenzar a correr el modelo en el estado planteado.

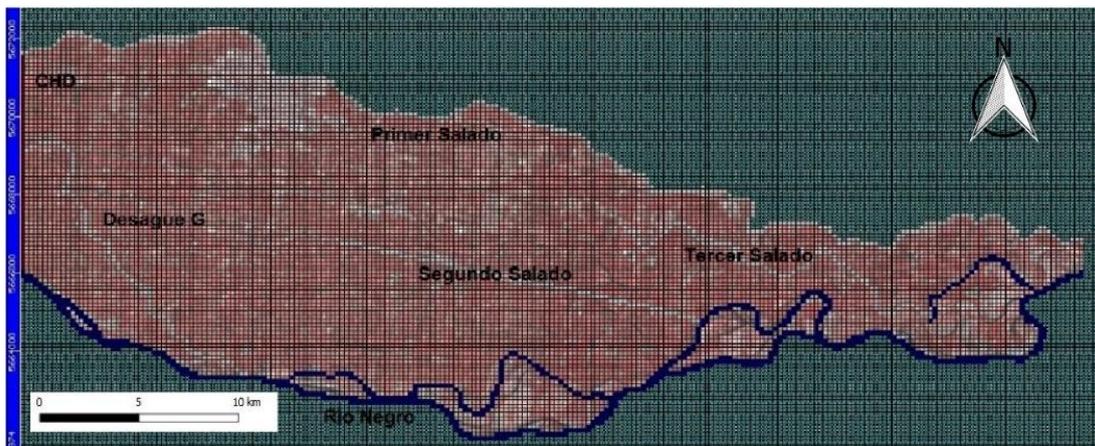


Figura 3.8. Condiciones de borde para la calibración en Estado Estacionario. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Una vez cargadas las propiedades, acciones externas y las condiciones de borde, se utilizó la herramienta ZBud que permite dividir el área de estudio en zonas de balance. Es decir, zonas en las cuales el software realiza el balance hidrológico con los volúmenes de control determinados por el usuario además del balance general de todo el sistema.

En la Figura 3.9 se observan las nueve zonas delimitadas para conocer en mayor profundidad la interacción de los cuerpos de agua superficiales con el acuífero freático. Se delimitaron todos los desagües y se independizaron los distintos brazos del río para ser analizados por separado en la corrida final.

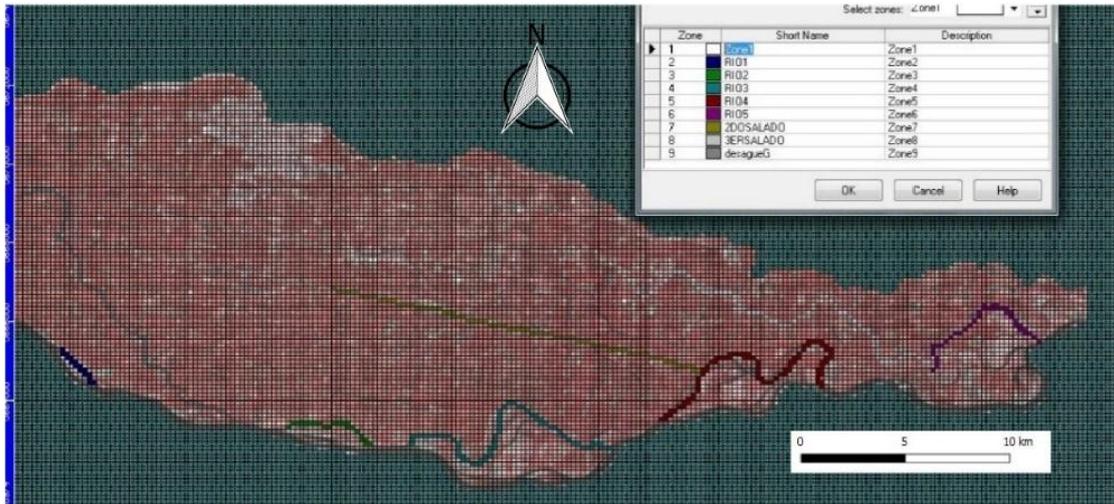


Figura 3.9. Zonas de Balance hídrico delimitadas. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Se realizó una primera corrida con los datos iniciales, observando que se estabilizó, pero no hubo convergencia con los valores observados, por lo que se realizó la calibración utilizando el método de prueba y error, ajustando los parámetros de recarga, la conductividad hidráulica y la conductancia hasta lograr un ajuste óptimo con diferencias aceptables entre los valores calculados y observados.

Cabe aclarar que la conductividad hidráulica que fue considerada inicialmente para la calibración, fue obtenida de manera indirecta a través de la Transmisividad en ensayos de bombeo puntuales realizados en el área, en marco del proyecto del Estudio Integral del Río Negro (CIL-AyEE, 1991c).

CAPÍTULO 4 – MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

El AVRNYN es de origen fluvial y fluvio-glacial y parcialmente relleno por sedimentos depositados y re-depositados por el río (Rossi, 2013). El distrito de riego y drenaje de Villa Regina conforma una porción del valle del río al Este de la región, con un ancho variable entre los 3 y 11 km y un largo aproximado de 31 km.

4.1 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

Las hojas Geológicas 3966-II y III de Villa Regina cubren el sector Noroccidental del Macizo Nordpatagónico y el extremo Oriental de la Cuenca Neuquina. Las características geomórficas de la Hoja están dadas en su parte septentrional por el valle del Río Negro que se extiende entre Stefenelli y Chimpay y por la Antigua Planicie Aluvial disectada que domina su sector central. El ciclo sedimentario más antiguo corresponde al tramo superior del Grupo Neuquén, que aparece representado por el Subgrupo Río Colorado, integrado por las Formaciones Bajo de la Carpa y Anacleto. Posteriormente se depositaron en discordancia sedimentitas de la Formación Chichinales, que se atribuye al Oligoceno superior y Mioceno inferior a medio.

A partir del Pleistoceno, se produjeron distintos episodios de erosión y acumulación, así, se han carteadado dos niveles de sedimentación, extensos depósitos de una antigua planicie aluvial disectada y, finalmente, varias terrazas del valle del Río Negro y de algunos cursos fluviales menores.

El Holoceno está bien representado por un elevado número de unidades carteadas que configuran el actual aspecto geomórfico de la comarca, incluyendo depósitos de bajos, playas, médanos y de cauces y lagunas actuales (Leanza *et al.*, 2001). En la Figura 4.1 se observa el área de estudio. En relación a la estratigrafía se documentó en el Holoceno depósitos de la planicie aluvial del río Negro, compuestos por gravas, arenas y limos.

Ésta, constituye una de las regiones más fértiles para la producción frutihortícola. También pueden observarse facies de planicie de inundación que son áreas en las que la influencia fluvial se evidencia en períodos de creciente, donde predomina la granulometría limosa y arcillosa con muy poca participación de areniscas (Leanza *et al.*, 2001).

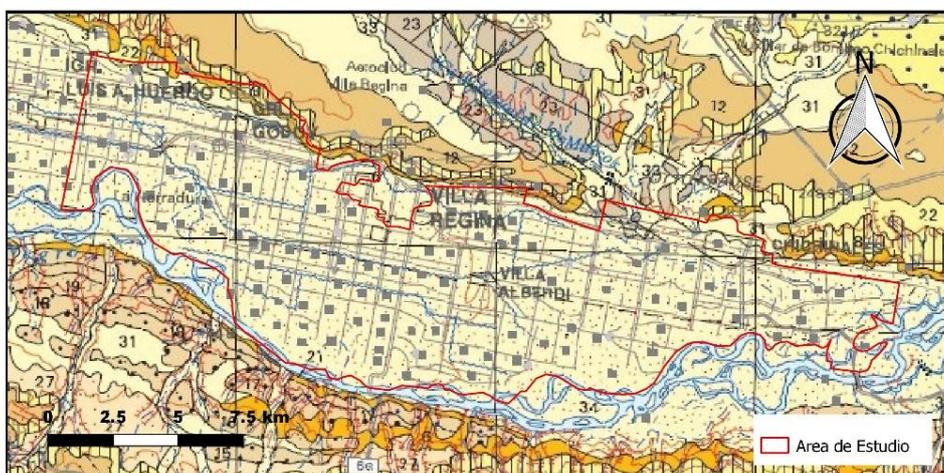


Figura 4.1. Carta Geológica de Villa Regina. Fuente: Leanza H. A. *et al.*, 2001.

El área bajo estudio es una región con características propias y distintivas, por lo cual se lo considera como una región geomórfica independiente. Se reconocen depósitos de terrazas que están circunscriptos al recorrido del río, adosadas lateralmente al valle, aunque en forma discontinua. Éste ha labrado el valle en terrenos correspondientes a las Formaciones Chichinales y El Palo. El tipo del cauce del Río Negro corresponde al tipo meandriforme, siendo comunes las lagunas en collera y meandros abandonados que muestran albardones semilunares sobre sus pendientes internas. El desnivel entre la Antigua Planicie Aluvial disectada y el piso del valle frente a Villa Regina, alcanza los 150 metros (Leanza *et al.*, 2001).

4.2. HIDROGEOLOGÍA E HIDRODINÁMICA

Del Estudio del Aprovechamiento Integral del Río Negro Etapa II, realizado en el año 1991, se definieron dos acuíferos: uno somero y libre el cual es el objeto de estudio del presente trabajo, y uno confinado a mayor profundidad, que se encuentra por debajo del hidroapoyo. Este último no será estudiado en esta tesis debido a la falta de información, pudiendo ser en el futuro un eje de trabajo importante. Se destaca en dicho estudio, que en gran parte del valle el contacto hidráulico entre ambos es pequeño o nulo (CIL-AyEE, 1991c). Actualmente no hay publicados estudios más actuales que hayan profundizado en dicha temática.

El acuífero freático posee un espesor que varía alrededor de 12 metros. En épocas de riego, puede elevarse hasta aflorar en determinados sectores. En cambio, en épocas de no riego su profundidad desciende notablemente pudiendo variar hasta los 4 metros de profundidad aproximadamente. Su hidroapoyo se encuentra a los 12 metros de profundidad, dependiendo de la zona. El origen de las sales disueltas en el agua subterránea de este acuífero es casi exclusivamente continental, producto del lavado de los sedimentos por los cuales circula y, en ciertos sectores, de los aportes provenientes de las áreas de meseta. Esta fuente de agua subterránea, en general de escasa producción, es utilizada para riego a presión, industrial y doméstico (Rossi, 2013). Cabe destacar, que, en el área, no es muy explotado el recurso hídrico subterráneo debido a la disponibilidad del recurso hídrico superficial.

La conductividad hidráulica se encuentra en un rango de 83 m/d hasta 825 m/d, siendo este segundo valor un extremo que es muy elevado, y que será considerado dado que fue obtenido en el área bajo estudio en el EIRN. Debido a las características diferenciales en relación a todo el Alto Valle, es posible encontrar un comportamiento distintivo y con valores más elevados de los parámetros hidráulicos en el distrito de Villa Regina. El coeficiente de almacenamiento o el rendimiento específico varían entre un 5 % y un 30 %, lo cual califica al acuífero como libre (CIL-AyEE, 1991c).

En relación a la hidrodinámica del distrito, en el año 1987, el estudio de la red freaticométrica regional en todo el AVRNYN determinó el rumbo general del flujo, siendo éste NO – SE, finalizando en el río. Villa Regina es una excepción a dicho esquema, ya que drena hacia el Primer Salado al Norte del área y al río al Sur, comportándose como una isla con zonas críticas al centro como lo plasma Rossi (2013).

La Figura 4.2 muestra el comportamiento hidrodinámico en determinados momentos del año, dicho trabajo fue realizado por Rossi (2013). En el período de septiembre a diciembre, se registró en el centro del distrito un área crítica en relación al nivel freático,

asociado fundamentalmente al riego. En el período invernal descendió notablemente, coincide con la inactividad del riego, es decir, la recarga debido a los retornos de riego es prácticamente nula.

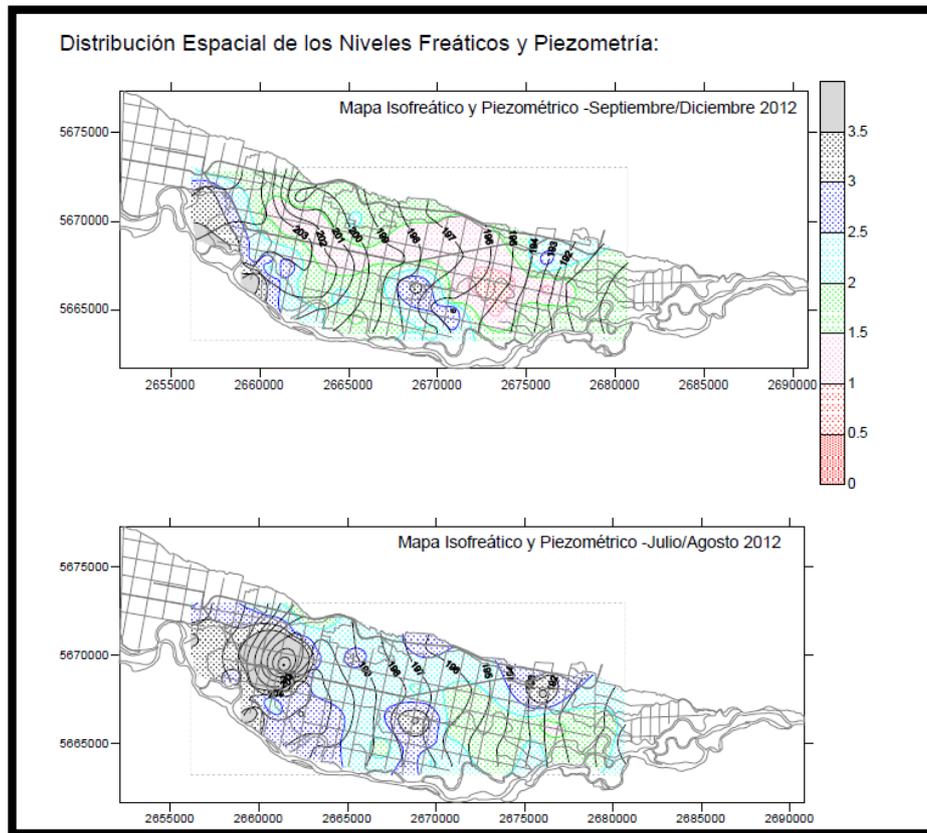


Figura 4.2. Mapas de Isopiezas del distrito de Villa Regina. Fuente: Rossi (2013).

4.2.1 Base impermeable.

El hidroapoyo es la base impermeable del acuífero freático en el área de estudio y que se encuentra a 12 metros de profundidad. Se corresponde con el grupo Neuquén, constituye un homoclinal subhorizontal con suave inclinación noreste-suroeste, constituido por capas alternantes de areniscas y pelitas de resistencia mecánica diferencial. Esta formación presenta baja permeabilidad, muy inferior a las de las capas superiores. Dicha formación no tiene importantes accidentes de relieve, posee una geomorfología plana con una inclinación que acompaña la pendiente promedio del río (CIL-AyEEE, 1987).

4.2.2 Niveles freáticos.

Para realizar la calibración del modelo numérico se requieren datos de Niveles Freáticos (NF) en el área. Para el presente estudio, se contó con una base de datos de NF del período 2010-2019 con mediciones mensuales, aportada por el CRyDVR. La red cuenta con 51 freatómetros dispersos en el área, lo que da una densidad de 263 hectáreas por freatómetro, la Figura 4.3 muestra la configuración espacial de la red de observación utilizada para la calibración.



Figura 4.3. Red de Freatímetros del área del distrito de Villa Regina, utilizada para la calibración del modelo.
Fuente: CRyDVR, 2020.

Con las mediciones del mes de agosto del 2018 se realizaron las isopiezas correspondientes al período que se calibró el modelo, la figura 4.4 muestra los resultados. Se destaca que el acuífero se encuentra en equilibrio en el agrosistema, el nivel freático desciende a su nivel más bajo debido a que no hay influencia antrópica (Montenegro *et al.*, 2014; Galeazzi *et al.*, 2005).

La dirección del flujo general es NO-SE, y se observa que hay recarga tanto en dirección hacia el Primer Salado, como hacia el río Negro, lo que le confiere al área las propiedades de una isla (CIL-AyEE, 1991). Hacia el este de la zona también se observan zonas de descarga, que coinciden con el segundo y tercer salado que también están activos en invierno. Al Oeste del área se encuentra un bajo, que puede coincidir también con la existencia del desagüe G que la drena.

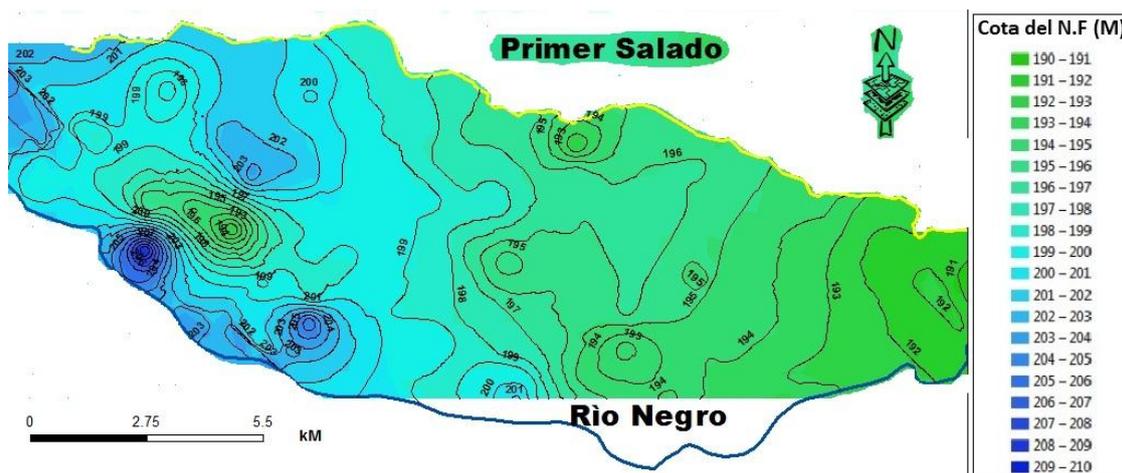


Figura 4.4. Isopiezas en el período agosto del 2018. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Esta situación particular, que se observa en la Figura 4.4, denota que en el sector Oeste el río aporta a la freática a la altura del desagüe G, situación que Rossi 2013 también distingue en su estudio, como se observa en la Figura 4.2. Este tema podría ser abordado en futuras líneas de investigación, con el objetivo de poder explicar este comportamiento diferencial en un sector del río.

4.2.2.1 Comportamiento del nivel freático estacional debido al riego

Numerosos estudios en la región han realizado un análisis del comportamiento del nivel freático y cómo es la influencia del riego en determinados períodos. A través de técnicas de geoestadística discriminaron zonas de elevado nivel freático, que pueden llegar a ser perjudiciales para los cultivos presentes. Horne *et al.* (1992), Álvarez *et al.* (1995), Mendia *et al.* (1994), Rossi (2013), Galeazzi *et al.* (1998, 2003, 2004) y Montenegro (2014), mapearon el nivel freático en distintos momentos del año y relacionaron dichas fluctuaciones con la recarga por riego.

Se determinaron cuatro momentos bien diferenciados respecto al nivel de la capa freática en relación a la práctica de riego convencional en el valle. Esta, se realiza en base al ciclo de los frutales, en los meses de invierno no se riega ya que coincide con el receso invernal de los cultivos.

En consecuencia, la recarga se produce en los meses de primavera, verano y los primeros días de otoño. De mayo a agosto inclusive no se produce recarga por riego y se entiende que el acuífero está en equilibrio (CIL-AyEE, 1991d).

La Figura 4.5 muestra un freatigrama típico para la zona, calculado a partir de las mediciones mensuales en el período 2010-2019. En el mismo se marcan los momentos más importantes para registrar las fluctuaciones de la capa freática y su relación en el tiempo con respecto a la práctica del riego.

El momento del año en el cual la freática está en su punto más bajo es en julio y agosto, época en la que no hay riego y por ende no hay intervención antrópica. En septiembre comienza la temporada de riego y todo el sistema de canales conduce agua, comenzando así la temporada productiva.

En octubre, debido a las heladas tardías, los chacareros aplican grandes volúmenes de agua para combatir esa adversidad climática, por lo que la capa freática asciende y puede alcanzar niveles cercanos a la superficie. Las consecuencias pueden llegar a ser perjudiciales para determinados cultivos, aunque en otras situaciones puede ser beneficioso el aporte capilar al balance hídrico (Mañueco, 2020).

En verano, el nivel desciende levemente porque disminuyen los riegos, pero se mantiene a un nivel bastante elevado debido a que se realizan los riegos pre y pos-cosecha. Por último, en otoño comienza a descender, los riegos son menores y a fines de abril deja de haber agua en los canales cerrando la temporada que inició en septiembre.

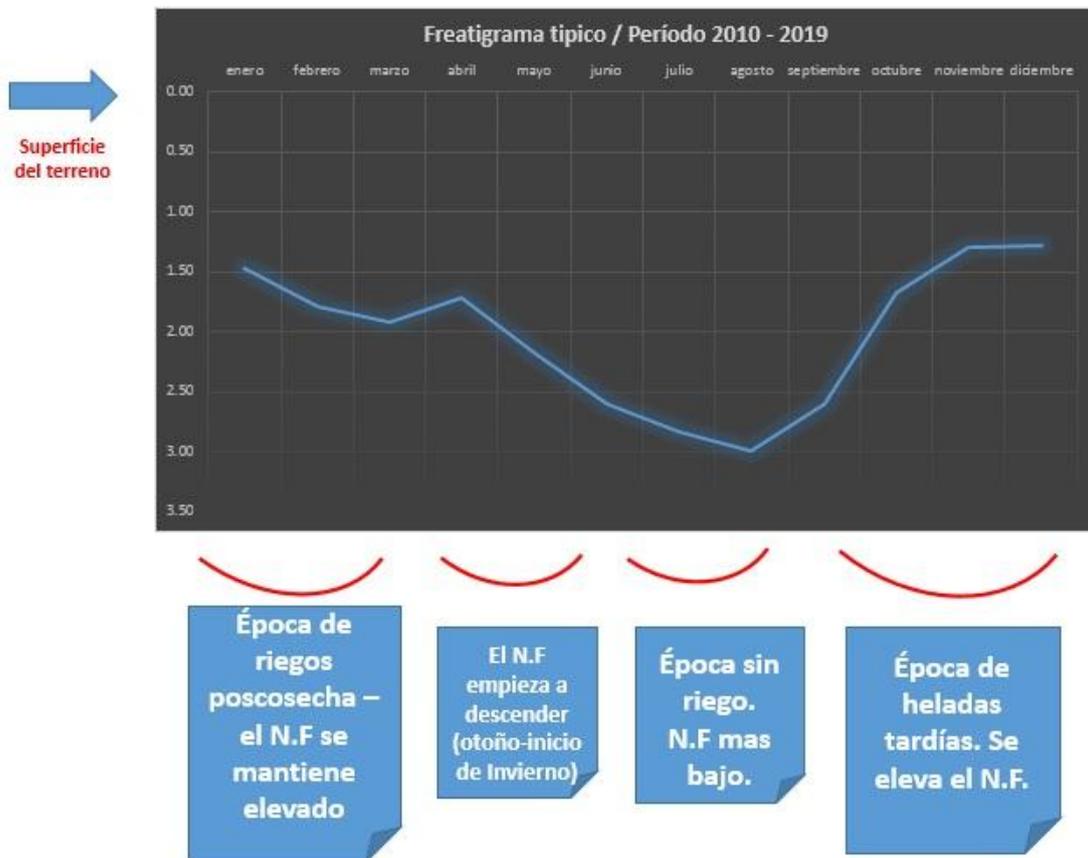


Figura 4.5. Freatigrama típico de la capa freática en el valle. Fuente: Elaboración propia, 2020.

4.3 CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES

El acuífero freático se caracteriza por presentar una relación efluente – influente con los cursos superficiales, el río y los desagües de origen natural y antrópico, que depende fundamentalmente de sus caudales (Rossi, 2013).

Existen cuerpos de agua superficial que están activos y en constante interacción con el acuífero todo el año, así como cuerpos de agua que se activan en el período de riego. La Figura 4.6 muestra los cuerpos de agua que están activos todo el año. Se destaca el río Negro que funciona como una zona de transición, es decir, que el agua circula permanentemente entre el río y el acuífero y el nivel del primero define si el agua entra o sale del mismo.

Los otros cuatro cuerpos de agua que se muestran en la Figura 4.6 son desagües que forman parte de la red oficial de drenaje. Sacan agua del acuífero todo el año, el caudal extraído depende del nivel que tengan. Como se explicó en el apartado 4.2.2.1, durante los meses de invierno el nivel de agua que poseen los desagües está en equilibrio con el acuífero, siendo este nivel el más bajo de todo el año, representando el equilibrio natural del agrosistema.

A partir de septiembre y hasta abril del año siguiente, se activa la red de canales y desagües completa, como se observa en la Figura 2.6. Los canales tienen una influencia periódica en el acuífero debido a que no están cementados y generan una recarga

debido a las pérdidas por filtración, según el CIL-AyEE (1987), el 10 % del caudal transportado se pierde y recarga el acuífero.



Figura 4.6. Cuerpos de agua superficiales activos todo el año. Fuente: Elaboración propia, 2020.

4.4 RECARGA

Del estudio realizado por Godagnone *et al.*, (2009) se desprende que la recarga dada por infiltración de las precipitaciones es escasa, debido al marcado déficit hídrico de la región. Por ende, se entiende que la recarga al acuífero se produce en mayor medida por el riego.

Datos aportados por la estación meteorológica de Villa Regina en el período 2010-2019 mostraron una media anual de la ETo de 1136 mm y una media de precipitaciones de 254 mm.

La Figura 4.7 muestra las variaciones de los fenómenos de precipitación y evapotranspiración potencial del agrosistema en los meses de un año típico. Se observa déficit hídrico todo el año. De septiembre a abril aumenta considerablemente la demanda evaporativa del ambiente, que coincide con el período de riego y la recarga al acuífero se produce por dicha práctica como citan Galeazzi *et al.* (2019) y Montenegro (2014).

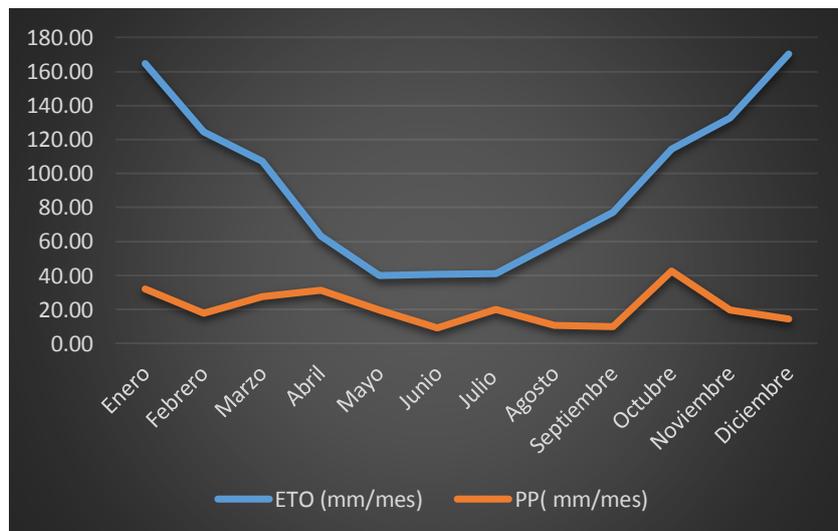


Figura 4.7. Promedios mensuales de evapotranspiración potencial y precipitaciones para el período 2011-2019 Fuente: Estación Meteorológica Villa Regina, 2020.

En la Figura 4.8 se muestran los caudales medios mensuales del período 2010-2019 que ingresan al distrito debido al riego y que fueron utilizados para contabilizar la recarga al sistema, como se explicará en el apartado **5.1.4**.

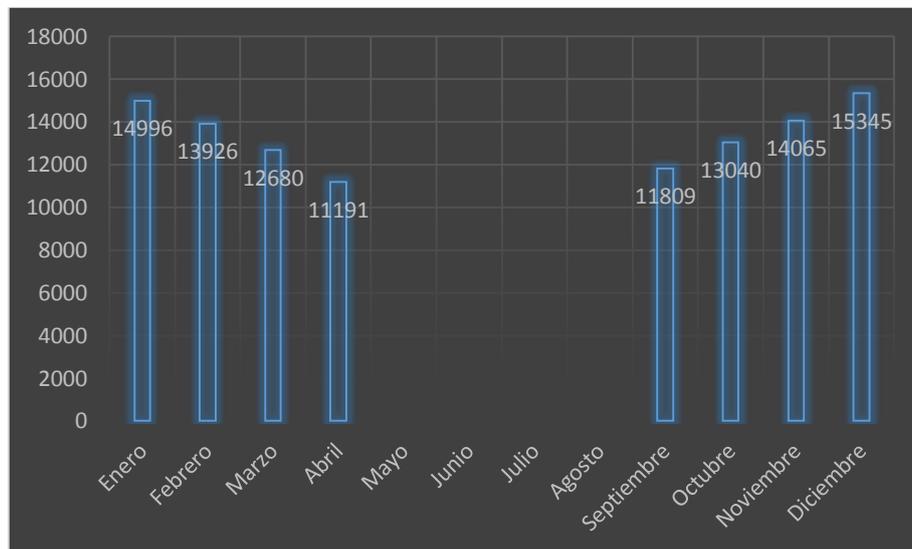


Figura 4.8. Caudal mensual (L/s) entrante para riego al área de estudio. Fuente: Consorcio de Riego y Drenaje de Villa Regina, 2020.

CAPÍTULO 5 – MODELO NUMÉRICO EN ESTADO ESTACIONARIO E INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y SATELITAL ASOCIADA

A continuación, se realiza una breve reseña de los ítems más importantes en la construcción del modelo numérico en el software Visual Modflow. Cuáles fueron los parámetros iniciales y sus valores numéricos iniciales, para luego calibrarlos por el método de prueba y error y lograr un buen ajuste del modelo numérico, que confirme y represente al modelo conceptual hidrogeológico planteado en el capítulo 4, analizando los resultados preliminares alcanzados con dicha metodología y la comprensión del funcionamiento del sistema hídrico.

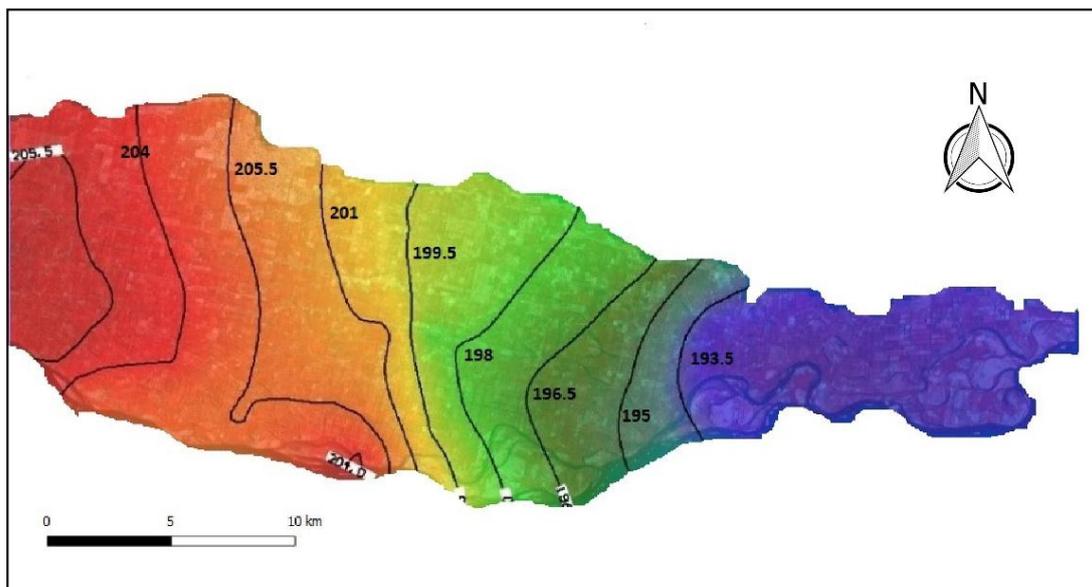
Luego, se abordan los resultados alcanzados por la aplicación de técnicas de SIG y uso de información satelital que se complementa con el modelado matemático del área.

5.1. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

5.1.1 Límites del modelo

Los límites del área a modelar fueron aportados por la capa del distrito de riego, que delimita el polígono completo en base a la superficie bajo riego que está bajo tutela del consorcio. El relieve se realizó en el software Modflow al incorporar las cotas del terreno de los 51 freatímetros de la red instalada y acotada por AyEE en 1991. Las cotas se interpolaron por el método de Kriging y se obtuvieron las curvas del nivel de la superficie de todo el distrito.

La base impermeable del acuífero freático a modelar se situó a los 12 metros de profundidad de la superficie, de acuerdo a la localización del hidroapoyo que se extiende en todo el valle (CIL-AyEE, 1987). Para obtener las curvas de nivel de la base se restó 12 metros a las cotas terreno de la red. La cota obtenida representa el hidroapoyo en ese punto y esos datos fueron interpolados para toda el área. La configuración espacial de ambos límites se observa en la Figura 5.1.



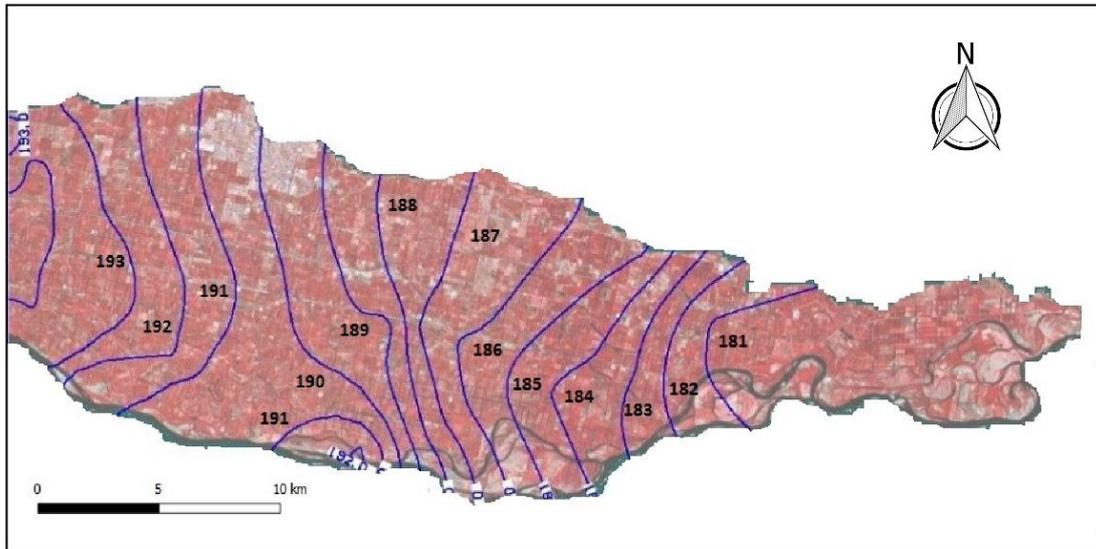


Figura 5.1. Arriba: topografía del área de estudio, Abajo: hidroapoyo. Fuente: Elaboración propia, 2020.

5.1.2 Discretización del modelo - Zona de estudio

La estructura del modelo numérico para régimen estacionario se observa en la Figura 5.2. Para la discretización espacial se confeccionó una malla de 250 columnas por 130 filas, siendo la dimensión de cada celda 110 metros de lado aproximadamente, de las cuales 13427 son activas para los cálculos del modelo, arrojando un área a modelar de 162 km² y 19073 están desactivadas y no forman parte del dominio de cálculo (celdas de color verde). La discretización vertical se realizó con una sola capa de 12 metros de espesor, como se explicará en el apartado siguiente.

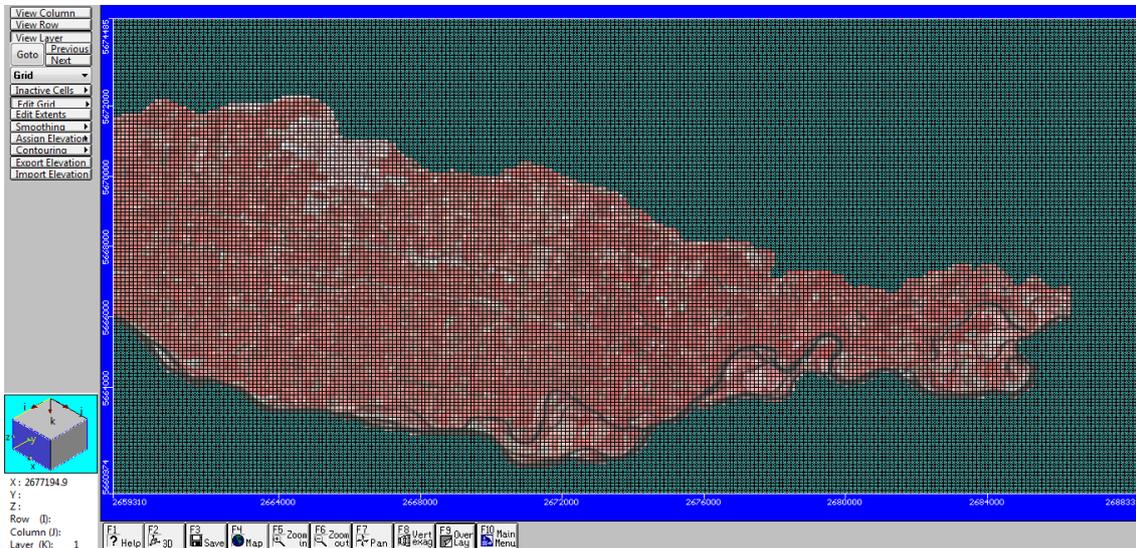


Figura 5.2. Grilla del modelo numérico, en verde celdas desactivadas. Fuente: Elaboración propia, 2020.

5.1.3 Zonificación de permeabilidad y transmisividad

En relación a los parámetros hidráulicos teóricos, los valores ingresados fueron uniformes en toda la capa. Se incorporaron los valores citados por el EIRN, (1991c). La porosidad total adoptó un valor de 0,3; la porosidad efectiva, un valor de 0,25; el almacenamiento específico, un valor de 0,25; el rendimiento específico adoptó un valor de 0,2125 y la conductividad hidráulica un valor de 83 m/d, obteniendo un promedio de todos los pozos medidos en el Estudio Integral. Cabe destacar que en la zona a modelar

se registraron los valores más altos de conductividad hidráulica de todo el valle, el rango obtenido en los distintos ensayos de bombeo en el área fue de 80 m/d hasta 825 m/d (CIL-AyEE, 1991), lo que supone que el acuífero del área posee una mayor capacidad de evacuación del agua, siendo una zona con elevada capacidad de drenaje en comparación a otras.

Los parámetros hidrogeológicos fueron cargados en la pestaña de propiedades del software como se muestra en la Figura 5.3. Los mismos iniciaron con los valores citados en el párrafo anterior, luego para calibrarlo se fueron ajustando como se explica en el apartado 5.2.2.

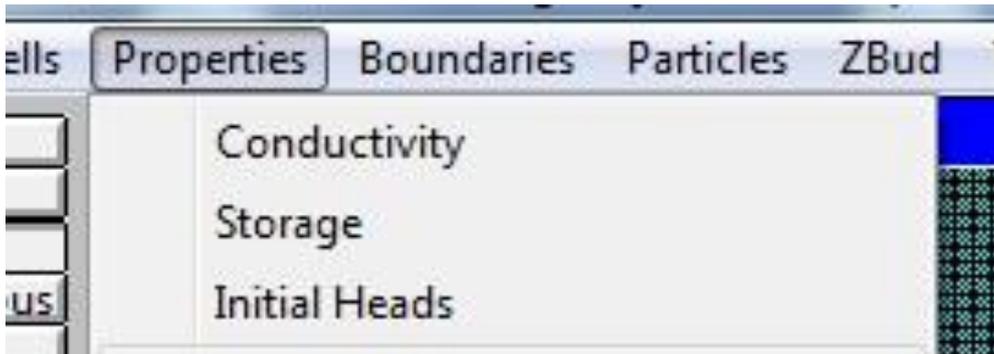


Figura 5.3. Propiedades hidrogeológicas e iniciales. Fuente: Elaboración propia, 2021.

El CIL-AyEE (1987) delimita dos estratos en el acuífero freático del valle, uno superior de menor conductividad con material fino que forma el suelo de 2 metros de espesor aproximadamente, y uno inferior con material más grueso formado por gravas y arenas sin cementar y de mayor conductividad hidráulica.

En el presente trabajo en el modelo numérico se optó por una simplificación de las capas del acuífero freático, por lo que se conformó el modelo con un solo estrato de características hidrogeológicas uniformes y teniendo en cuenta el EIRN prevalecieron las características del estrato inferior, es decir, el de mayor espesor. Además, se considera que, al calibrarse en agosto, los valores de nivel freático se encontraron dentro del perfil de mayor espesor, como plantea Pavese *et al.* (2015).

5.1.4 Recarga y evapotranspiración

En relación a las entradas y las salidas, se tuvieron en consideración las acciones externas que interactúan en un año hidrológico, que son la recarga, debido al riego y a las lluvias y las salidas, que en este caso es la evapotranspiración.

Para simular la recarga se utilizó el paquete RCH. Este requiere un valor de recarga pixel a pixel como se ve en la Figura 5.4. Para la primera corrida del modelo el valor de la recarga neta fue igual para toda el área. Se calculó la recarga efectiva, es decir, el riego más las precipitaciones menos la evapotranspiración del cultivo.

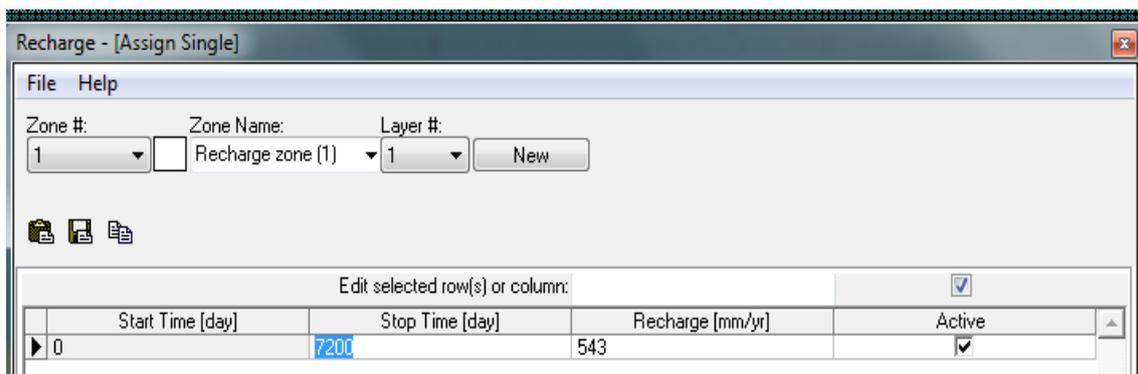


Figura 5.4. Paquete RCH utilizado para el cálculo de la recarga. Fuente: Elaboración propia, 2021.

Para calcular la recarga se realizó un balance hídrico anual, calculado en relación a las entradas y salidas del sistema.

Una de las entradas consideradas fue la precipitación del año 2018 que arrojó un valor de 280 mm, según la medición de la estación meteorológica del área de estudio. La lámina de riego se calculó en función al agua ingresada a toda la sección de riego. Se utilizó el dato del caudal del canal principal, que fue de 13595,5 L/s multiplicado por 10645 ha, es decir, el área a regar que se calculó por la base de datos del QGIS. Se calculó una lámina de 2630 mm/año a la cual se le restó la eficiencia de riego estimada por Galeazzi *et al.* (2018) en un 30%, por lo tanto, la lámina que ingreso por percolación fue de 1841 mm/año.

Finalmente, se calculó la evapotranspiración del cultivo (ETc), multiplicando la Evapotranspiración Potencial (ETo), calculada por la estación agrometeorológica de Villa Regina en el año 2018 utilizando el método de Penman Monteith por los coeficientes del cultivo (Kc) obtenidos por Requena *et al.*, (2012) para la manzana y la pera (cultivos predominantes en la región), lo que arrojó un valor de 617 mm/año.

La recarga efectiva (R_{efect}) obtenida a través del balance de entradas y salidas fue:

$$R_{\text{efect}} = R + PP - ETc$$

$$R_{\text{efect}} = 1844 \frac{\text{mm}}{\text{año}} + 280 \frac{\text{mm}}{\text{año}} - 617 \frac{\text{mm}}{\text{año}} = 1507 \text{ mm/año}$$

Donde R es la recarga anual efectiva, PP es la precipitación anual y ETc es la evapotranspiración del cultivo.

En relación a las salidas, si bien se contempló en la recarga efectiva la evapotranspiración del cultivo, también se consideró la evaporación de los cuerpos de agua. Para ello se utilizó el paquete EVT (Figura 5.5), que precisa el dato de evapotranspiración y el valor de profundidad de extinción. Éste es un valor umbral del suelo en el cual si el nivel freático está por encima de dicho valor hay evaporación y si el nivel freático está por debajo, no hay evaporación.

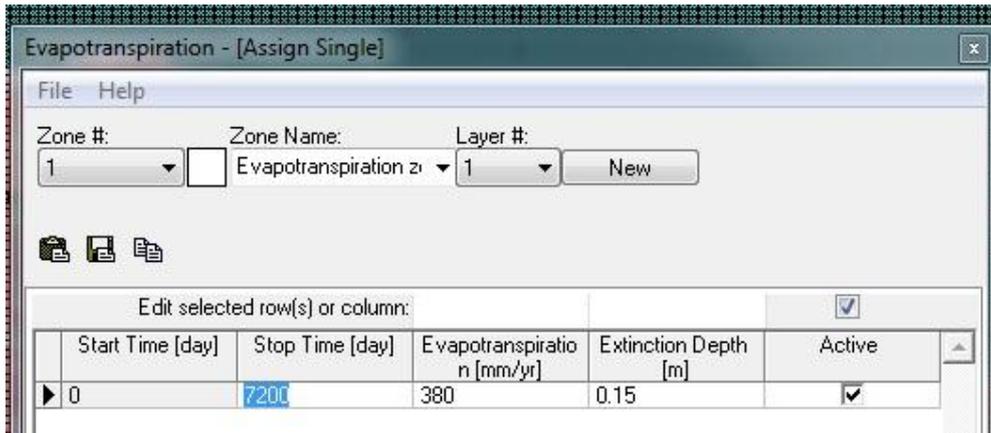


Figura 5.5. Paquete EVT para simular las salidas por evaporación desde cuerpos de agua. Fuente: Elaboración propia, 2021.

En la simulación se utilizó el valor de evapotranspiración potencial del año 2018, es decir 380 mm/año, y la profundidad de extinción fue de 0,15 metros, asegurando que el paquete simule sólo la evaporación que ocurre en los cuerpos de agua, ya que la transpiración está considerada en la recarga efectiva.

5.1.5 Ríos y desagües

Los ríos aportan o drenan agua a los sistemas de agua subterránea, dependiendo del gradiente hidráulico entre el río y el acuífero, el objetivo del paquete Río (RIV) es simular dicha interacción. Para alcanzar estos objetivos, los términos de filtración entre un cuerpo y otro son los que representan las características desde o hacia la superficie y deben añadirse a la ecuación de flujo de aguas subterránea para cada celda afectada por la interacción río-acuífero (Bravo *et al.*, 2016).

Se cargó pixel a pixel la configuración espacial del río y en cada celda se incluyeron los datos requeridos por el paquete: la cota del pelo de agua (m), la cota del fondo del río (m), la conductividad del lecho del río (m/d) y el espesor (m) del mismo (Figura 5.6).

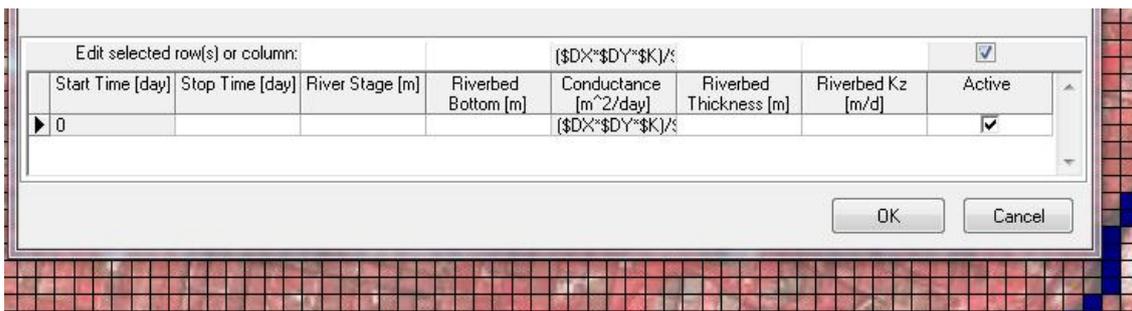


Figura 5.6. Subrutina del paquete RIV. Fuente: Elaboración propia, 2021.

Para cada celda se calculó el valor de las cotas interpolando los valores de la Estación Limnigráfica para ese período, utilizando la pendiente del río de 0,07 m/m y la longitud de las celdas como parámetros de la función lineal aplicada para dicha interpolación. El espesor fue de 0,05 m y la conductividad del lecho del río de 0,05 m/d citando a Pavese *et al.* (2013).

Un dato fundamental es la conductancia, dicho parámetro numérico representa la resistencia al flujo entre el cuerpo de agua superficial y el agua subterránea. El modelo lo calcula con la siguiente ecuación:

$$CRIV = \frac{K \cdot L \cdot W}{M}$$

Donde, CRIV (m³/d) es la conductancia, K (m/d) es la conductividad hidráulica del lecho del río, W y L (m) son las dimensiones de la celda que representa la porción del río, y M (m) es el espesor del lecho del río. En la figura 6.7 se observa el esquema de una celda.

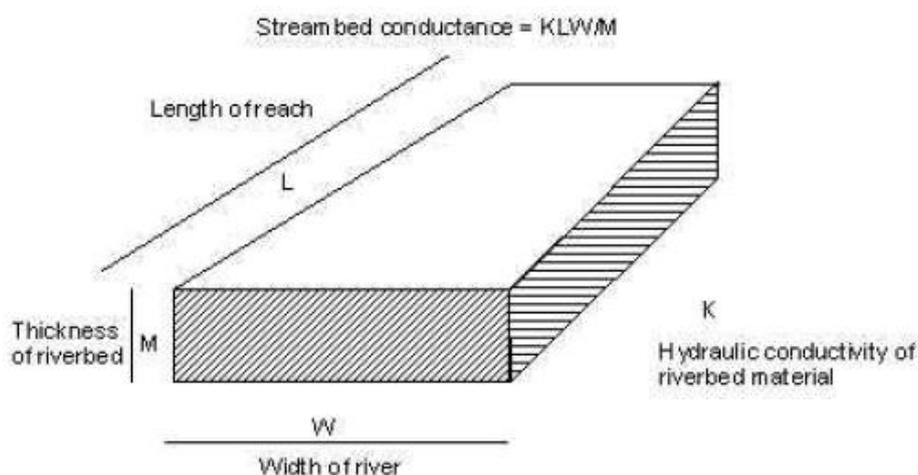


Figura 6.7. Celda teórica del río.

El paquete simula el flujo con la fórmula que se presenta a continuación:

$$QRIV = CRIV(HRIV - h)$$

Donde, QRIV (m³/s) es el caudal que pasa de un cuerpo al otro, CRIV es la conductancia, HRIV la altura piezométrica del río en la celda y h es la altura piezométrica del acuífero en esa celda.

El flujo es nulo cuando la carga hidráulica en la celda (h) es igual al nivel de agua en el río (HRIV). Para valores de h mayores que HRIV, el flujo es entrante al río, y se representa como un flujo negativo al acuífero; para valores de h menores que HRIV, el flujo es positivo y entrante el acuífero (Harbaugh, 2005).

El Paquete Dren (DRN) se diseñó para simular el efecto de algunas características tales como los drenes agrícolas, que eliminan el agua del acuífero a una velocidad proporcional a la diferencia entre la carga hidráulica en el acuífero y la carga hidráulica del dren, siempre que la primera sea mayor a la del dren. Si la carga hidráulica del acuífero cae por debajo de la elevación del dren, éste no tiene ningún efecto. Como en el paquete RIV, la constante de proporcionalidad se conoce como la conductancia del dren (CD) y se calcula de manera equivalente a la del paquete RIV. La fórmula de la interacción es la siguiente:

$$Q_{out} = CD(HD - h) \quad \text{si } h > HD;$$

$$Q_{out} = 0 \quad \text{si } h < HD$$

Donde, Q_{out} es el caudal equivalente entrante al acuífero, CD es la conductancia de dren, HD es la carga hidráulica del dren en la celda y h es la carga hidráulica del acuífero en la celda.

Se procedió de la misma manera que en el río y se cargó celda a celda la configuración espacial en el visual Modflow, cargando los datos requeridos por el modelo, es decir, la cota del dren (m) y la conductancia por unidad de área (1/día), para calcular luego el

caudal con la formula anteriormente citada (Figura 5.8). La cota del dren se midió en campo al inicio y al final de cada desagüe con el procedimiento explicado en el capítulo 3. Se introdujo dicho dato a la celda correspondiente, luego los valores faltantes fueron interpolados utilizando una función lineal con pendiente 0.06 m/m estimada con los datos relevados en campo. Fueron cuatro los desagües incorporados en el modelo estacionario: el Primer Salado como condición de borde Norte y dentro del área a modelar el Segundo y Tercer Salado y el desagüe G.

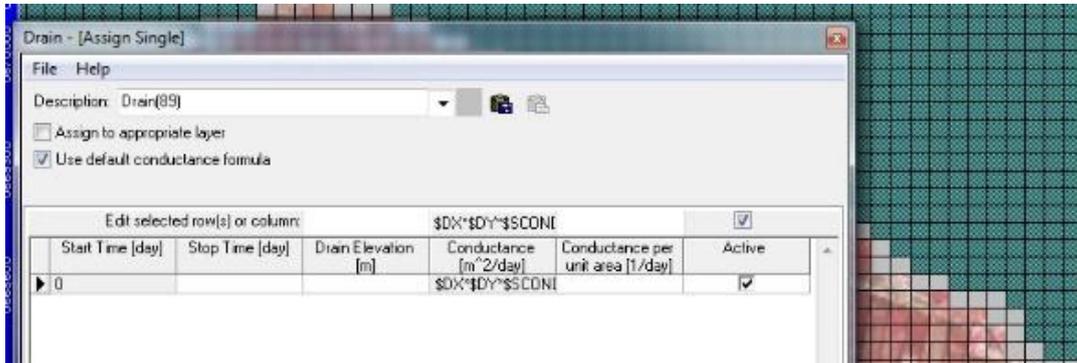


Figura 5.8. Paquete DRN, datos necesarios por celda. Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.1.6 Condición de altura constante

La condición de altura hidráulica constante (CHD) es una condición de borde conocida, y establece que desde el inicio hasta el final del período de simulación hay una altura constante de lámina de agua en esa condición, es decir, que se fija un umbral de agua conocido, es un nivel fijo. A priori se conoce la altura piezométrica en las celdas que fueron incorporadas al Oeste del área en este paquete como condición de borde.

En el presente caso, se representa la conexión hidráulica del acuífero freático del consorcio a modelar y el colindante al Oeste, que es el consorcio de riego de Ingeniero Huergo.

Pixel a pixel se delimito el área que estuvo representada por el paquete CHD y se cargó la altura hidráulica de cada uno de ellos (Figura 5.9). Este dato se obtuvo del mapa de isopiezas calculado para el mes de agosto del 2018 realizado en QGIS y que se visualiza en el apartado 4.2.2.

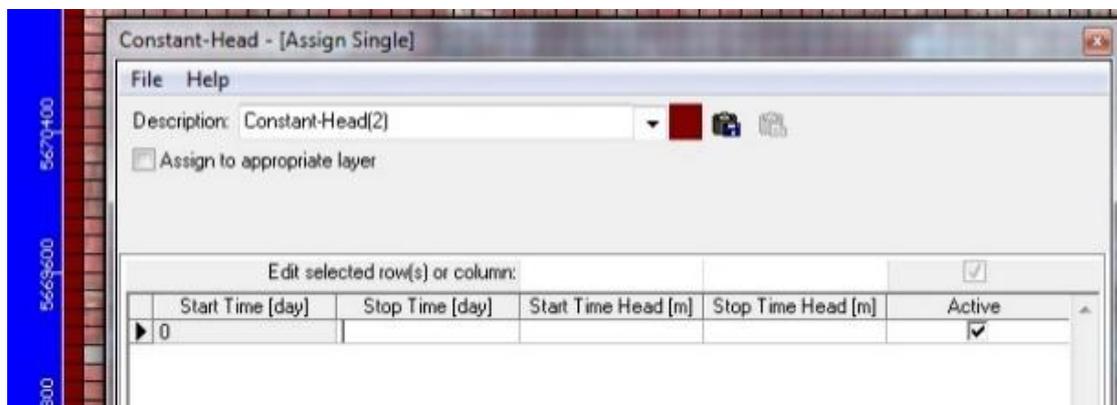


Figura 5.9. Condición de Borde CHD en el modelo Estacionario. Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.1.7 Datos Observados

Para realizar la calibración en “Head Obs” se cargaron los freatómetros activos de la red propia del CRYDVR (ver apartado 2.2.1) correspondientes al mes de agosto del 2018 con los valores de cota del agua freática (Figura 5.10). Esta capa será la utilizada por el software para realizar la calibración.

En ese período de tiempo la base de datos freaticométrica tuvo 35 observaciones para ser utilizadas en la calibración, su configuración se observa en la Figura 4.3 del capítulo 4.

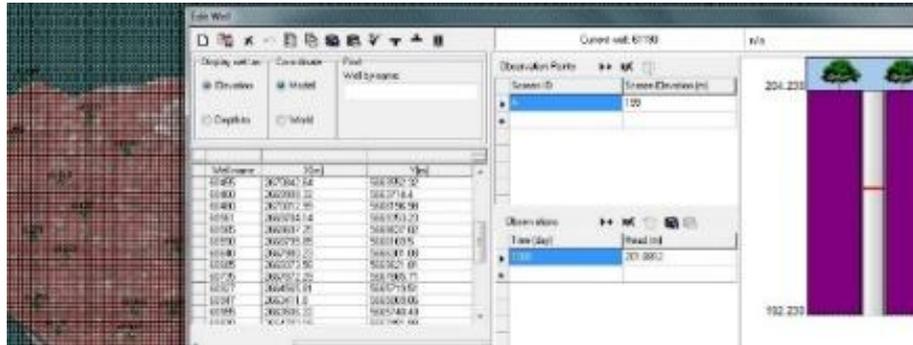


Figura 5.10. Input de pozos de observación en el modelo con la cota freaticométrica. Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.2 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

Se calibró satisfactoriamente el modelo conceptual planteado mediante la simulación numérica. La Figura 5.11 muestra el flujo y la velocidad del agua obtenidas en la calibración, y cuyo resultado se corresponde con el modelo hidrogeológico. El mapa equipotencial confirma que existen dos direcciones de flujo general, una hacia el Norte y otra hacia el Sur. Se observa claramente en la configuración espacial y curvas de isopiezas del acuífero la influencia de los desagües dentro del área. Además, se observa como en determinados sectores, el río actúa como ganador, tema que se aborda en el apartado 5.2.4.

El modelo numérico confirma que dicha zona se comporta de manera distinta a todo el Valle, siendo una pequeña isla, aparece el flujo de descarga al Norte del área debido al Primer Salado, y también se visualiza el flujo hacia el río al Sur. No obstante, al Oeste del área se observa como el río le aporta al acuífero, a la altura del desagüe G, coincidente con lo que se visualiza en las isopiezas calculadas en el presente estudio y en el estudio de Rossi, 2013.

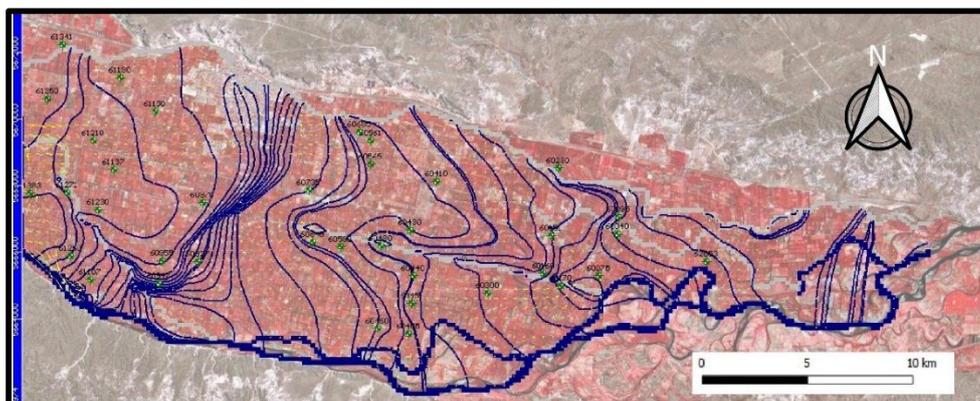


Figura 5.11. Calibración en Estado Estacionario en agosto 2018. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Internamente se visualizó como la configuración espacial de las curvas de nivel también direccionan el flujo del agua hacia los distintos desagües, siendo receptores del agua del acuífero en todo el año, como lo expresa el modelo conceptual.

La Figura 5.12 muestra la magnitud y dirección de los vectores velocidad del flujo y cómo se sectorizan zonas con mayor velocidad como se constata en el área de Villa Regina y zonas en las cuales el agua se mueve lentamente en función al gradiente hidráulico. Dicho comportamiento puede estar asociado exclusivamente a las características hidrogeológicas que denotan una elevada heterogeneidad en el área.

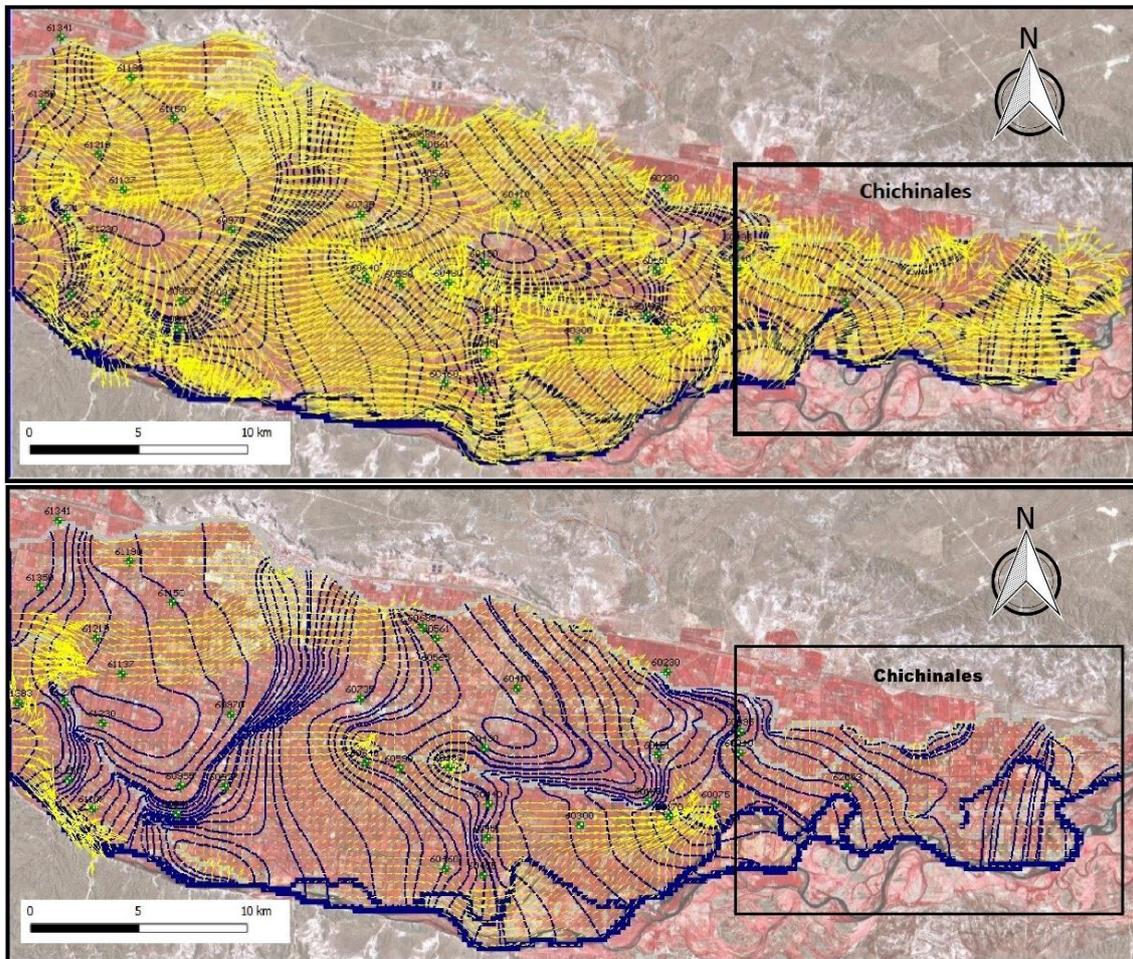


Figura 5.12. Arriba: dirección del flujo obtenida. Abajo: Magnitud del flujo. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Nótese en el mapa, cómo existen flujos y contraflujos del agua subterránea, es destacable particularmente en la zona de Chichinales los contraflujos obtenidos. Esto coincide con el comportamiento descrito por los técnicos del consorcio, quienes lo destacan en especial, al observarse la dificultad de los desagües para descargar el agua en la zona, generando por ejemplo lagunas temporarias y permanentes como se describió en el capítulo 2.

Ambos mapas son de utilidad a la hora de analizar posibles intervenciones en el distrito para mejorar la evacuación del agua superficial. Por ejemplo, la sectorización de las velocidades será un factor a tener en cuenta a la hora de seleccionar y priorizar la

limpieza de determinados desagües, sectores con velocidades de flujo menores requerirán de limpiezas más seguidas y en mayor profundidad.

5.2.1 ESTADÍSTICOS Y MAPA DE RESIDUOS DE LA CALIBRACIÓN

El ajuste obtenido es bueno, utilizando como datos reales el relevamiento freaticométrico de agosto del 2018 (Figura 5.12). Para la calibración se emplearon 35 puntos de observación. Se advierte el elevado nivel de ajuste de los valores calculados en función a los observados y cómo, todos los residuos se posicionan dentro del intervalo de confianza del 95 %, lo que confirma y sustenta que el modelo numérico planteado coincide con el modelo conceptual del área.

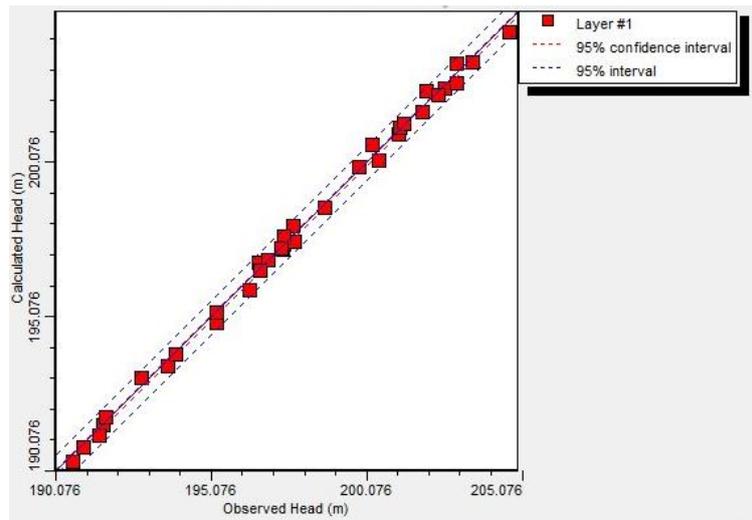


Figura 5.12. Niveles freáticos calculados vs observados. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Para realizar el ajuste, el software utiliza la siguiente fórmula para calcular los residuos:

$$R_i = X_{cal} - X_{obs}$$

Donde, R_i es el residuo, X_{cal} el valor calibrado, y X_{obs} el observado.

Partiendo de los valores residuales se calculan una serie de estadísticos que describen la calidad de los resultados. En la tabla 5.1 se muestra un resumen de los mismos.

Tabla 5.1. Estadísticos obtenidos en la calibración del modelo numérico. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Nº de Puntos	35
Máximo Residual	-0,38 m
Mínimo Residual	0,007 m
Media Residual	-0,054 m
Media Residual Absoluta	0,19 m
SEE (desviación estándar del R)	0,04 m
RMS	0,22 m
RMS Normalizado	1,57 %
Coefficiente de Correlación (R)	0,99

La media residual absoluta arrojó un valor de 0.19 metros, que resulta adecuado dado el tamaño del área a muestrear (162 km²), la densidad de puntos de observación y la complejidad del área, en concordancia con Pavese *et al.*, 2013. El error cuadrático medio (RMS) de 0,22 m y el RMS normalizado 1,57 %, resultan adecuados. El R de 0,99 confirma un buen ajuste, demostrando un grado elevado de correlación entre los datos observados y los datos calibrados como en Matteoda *et al.*, 2011.

La Figura 5.13 muestra el mapa de residuos que se obtuvo en la calibración. Este es de suma utilidad, ya que muestra la ubicación, la magnitud y el signo (positivo/negativo) de los errores, con el objetivo de analizarlos espacialmente.

Los círculos celestes y azules representan errores positivos, es decir, que el valor calculado por el modelo está por encima del observado, traduciéndose en un exceso de agua. Contrariamente los círculos rosados y rojos son residuos negativos, esto quiere decir que el valor calculado es menor que el observado, y se traduce dicho valor en faltante de agua.

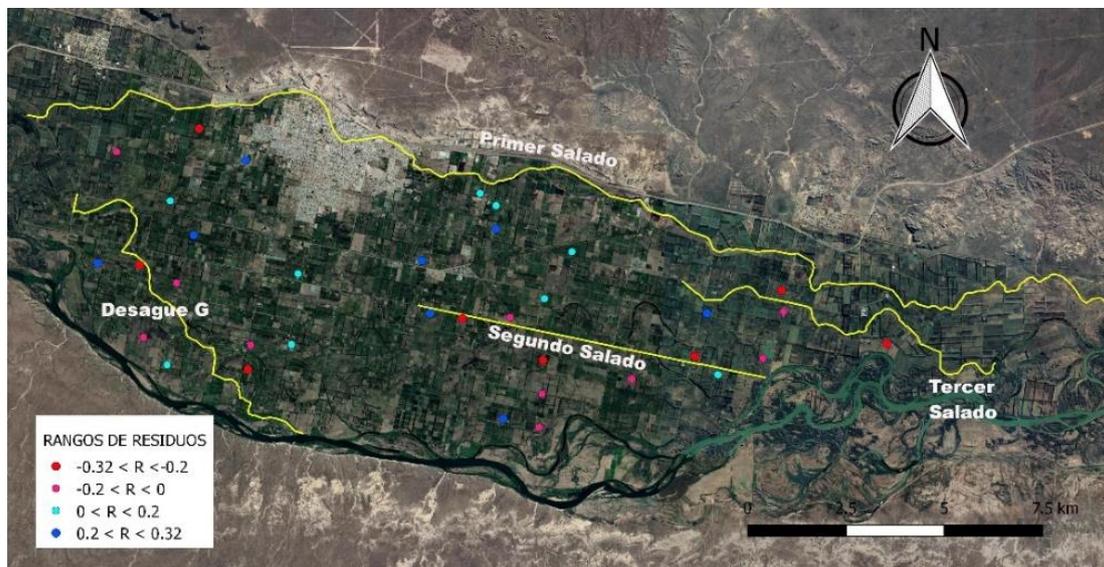


Figura 5.13. Mapa de residuos obtenidos del área de estudio. Fuente: Elaboración propia, 2020.

A la hora de realizar la calibración, el mapa de la Figura 5.13 es una herramienta fundamental para comprender los procesos que ocurren en el área y las relaciones entre las variables.

Si se analizan los residuos, se advierte que los positivos se concentran en el centro del área de estudio, indicando que se acumula más agua en ese sector, pudiendo interpretar que faltan estructuras para evacuar más rápido el agua que ingresa al acuífero ya que no sucede de manera natural. Los residuos negativos se concentran más alrededor de los desagües, esto, podría estar indicando que los valores de conductancia cargados al modelo podrían ser mejorados.

La conductancia, como bien se explicó en capítulos anteriores, es un parámetro que está relacionado al intercambio del río y del dren con el acuífero. Cuando los residuos alrededor de los cuerpos de agua superficiales son positivos, estos pueden traducirse en valores elevados de conductancia. En cambio, cuando los residuos son negativos se

asocian a valores bajos de conductancias, lo que redundaría en un mayor análisis de dichos parámetros, tema a estudiar para investigaciones futuras.

Numerosos mapas de residuos fueron utilizados como herramienta para poder intervenir de manera óptima en el proceso de calibración de los parámetros analizados, siendo fundamental el tipo de análisis realizado en el párrafo anterior, con el objetivo de poder completar el análisis de prueba y error y lograr el mapa de residuos que más se ajuste a la realidad (Figura 5.13), como lo demuestran los parámetros estadísticos.

5.2.2 PARAMETROS CALIBRADOS

Los parámetros que se utilizaron para calibrar el modelo en estado estacionario fueron: la conductividad hidráulica, la recarga y la conductancia del río y los desagües.

En la Figura 5.14 se observa la zonificación que se obtuvo de la conductividad hidráulica (k) con un total de nueve zonas. El rango de variación fue de 10 m/d hasta 810 m/d, siendo este último, un valor extremo y elevado que se corresponde con el extremo medido de transmisividad en el CIL-AyEE, 1991c.

Este resultado denota la marcada heterogeneidad del área en relación a los materiales presentes y el comportamiento diferente del área de estudio, similar al de una isla en comparación al resto del valle (CIL-AyEE, 1991c), como obtuvieron Pavese *et al.*, (2013) y Polla *et al.*, (2013).

También se destaca la diferencia en la distribución de los valores de K , de estudios anteriores, como Polla *et al.*, (2013), Pavese *et al.*, (2013, 2015). A nivel de gran área se observaba que los valores de este parámetro aumentaban en relación a la cercanía al río, dado que Villa Regina se comporta distinto. Se observa cómo los valores aumentan del centro tanto para los bordes Norte como Sur, siendo lógico, dado que el acuífero drena en ambas direcciones.

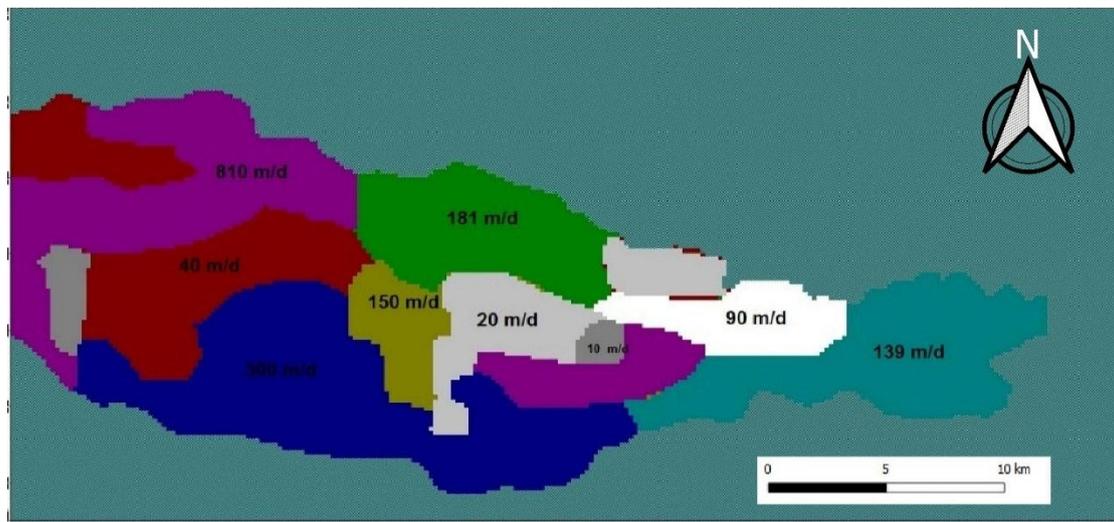


Figura 5.14. Zonificación de la K en la calibración. Fuente: Elaboración propia, 2020.

La Figura 5.15 muestra la zonificación de la recarga con un total de seis zonas. Nótese que la zona azul es una recarga nula, que se corresponde a la zona urbana de la localidad de Villa Regina. Una gran área alrededor posee una baja recarga, que se corresponde a caudales menores de riego debido al tipo de suelo y la recarga cercana al río

principalmente se da por las precipitaciones, que como se explicó en apartados anteriores, son muy escasas.

En relación a la recarga estimada en un principio, este valor arrojó una elevada cantidad de agua que ingresa al acuífero. El modelo en esas condiciones no logró converger y al disminuir dicho valor levemente, igualmente dió un muy mal ajuste que generaba agua en exceso. Esta situación planteó la necesidad de disminuir notablemente la recarga y dividirla en zonas.

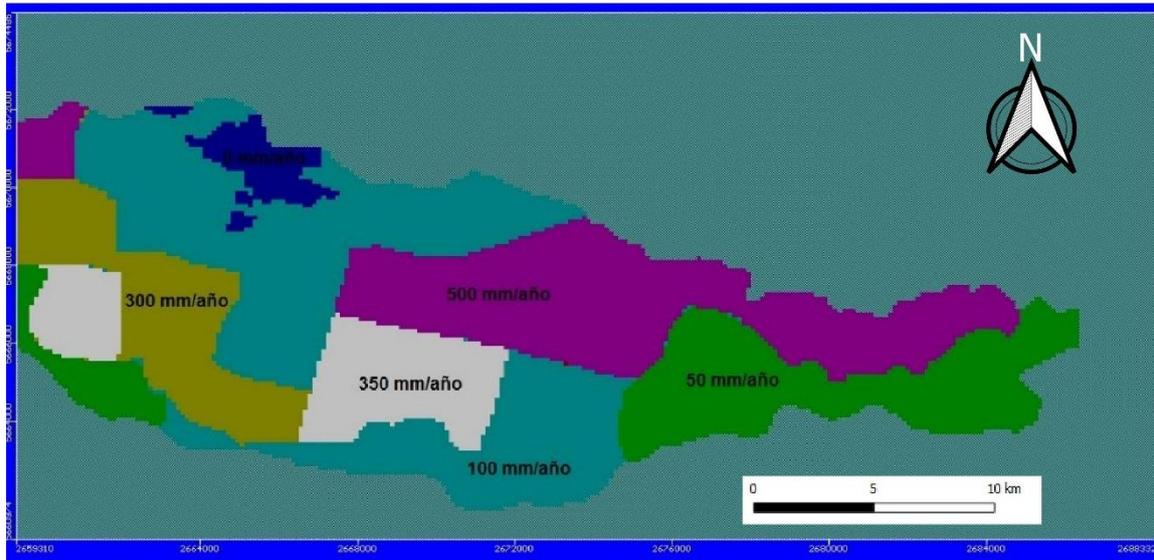


Figura 5.15. Zonificación de la recarga en la calibración. Fuente: Elaboración propia, 2020.

El tercer parámetro utilizado para calibrar el modelo fue la conductancia del río y la conductancia de los drenes (Tabla 5.2). Inicialmente se comenzó con valores bajos debido a las condiciones de elevada cantidad de sedimentos propios del lecho del río y de los desagües, luego se fueron ajustando a lo largo de la longitud de cada curso de agua, mostrando tener una influencia localizada correspondiéndose con el estudio de Rodríguez, (2006).

Tabla 5.2. Conductancia obtenida de los cuerpos de agua a partir del modelo numérico. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Cuerpo de Agua	Conductancia Promedio (m ² /d)	Rango de conductancia (m ² /d)
Río Negro	2260	12 – 2000
Desagües activos en invierno	12000	600 – 60000

Al comparar la conductancia promedio con la inicialmente contemplada se advierte que aumentó en un orden de magnitud, representando una mayor interacción dren – acuífero que la observada teóricamente, no obstante, se obtuvo un rango de tres (3) órdenes de magnitud en todo el trazado de desagües, lo que denota comportamientos sectorizados dentro del trayecto de cada uno de ellos.

En relación a la conductancia del río, el valor calibrado promedio también superó el teórico, demostrando de esta manera que existe una mayor interacción río – acuífero. También se registraron comportamientos localizados longitudinalmente, actuando de

manera distinta los brazos pertenecientes al río, tema que se abordará en el apartado 5.2.4.

5.2.3 BALANCE DE AGUA TOTAL

La Figura 5.16 muestra el balance de masa de agua entre las entradas y las salidas del acuífero en el estado estacionario calibrado. En total, entra y sale del acuífero un volumen de 68,3 hm³, resulta consistente con el estado estacionario, es decir no hay variación de almacenamiento en el acuífero, todo el volumen que ingresa sale por alguna condición de borde.

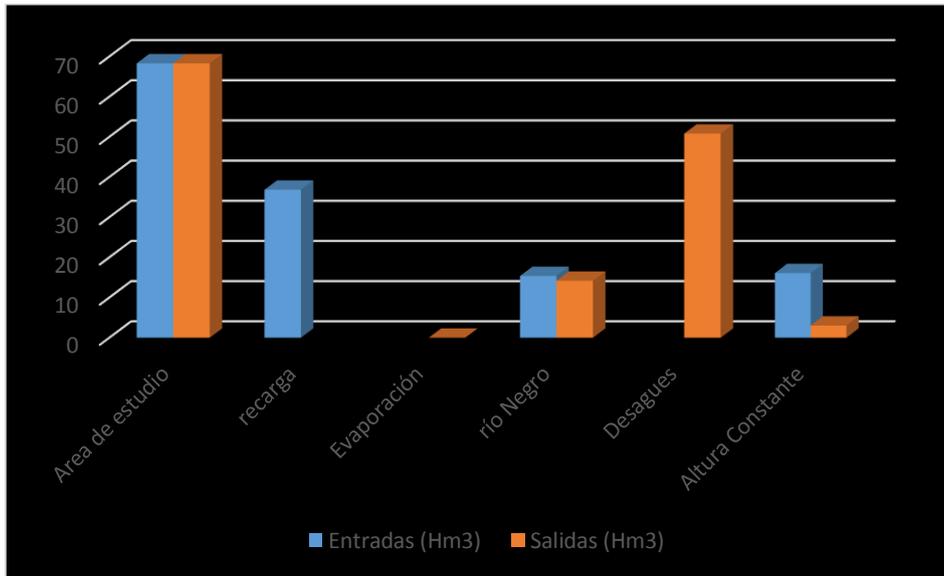


Figura 5.16. Balance de masa anual. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Como era de esperarse, el 75 % del agua que ingresa al acuífero es evacuada por los desagües, ese volumen corresponde a la suma de los cuatro desagües activos.

El 20 % del agua que entra y que sale lo hace por el río Negro, siendo éste una zona de transición, la dirección del caudal de entrada y salida dependerá de la altura del pelo de agua en todo su tramo.

El 54 % del agua que entra lo hace por la recarga. En este caso ese valor representa la recarga neta, es decir, el agua de riego que percola más la lámina que percola de las bajas precipitaciones de la zona, lo que lo constituye en el factor preponderante en relación a la entrada de agua al acuífero.

Por último, en relación a las entradas, el 24 % del agua que ingresa lo hace por el borde Oeste, es decir por el límite fijo establecido como condición de borde por las curvas de isopiezas de agosto del 2018 demostrando, como es de esperarse, una conexión hídrica con el consorcio colindante, que es el de Ingeniero Huergo.

En relación a las salidas de agua si bien se contempló la mayor proporción en el término de evapotranspiración del cultivo al calcular la recarga neta, se tuvo en cuenta la evaporación del río, el porcentaje de salida de agua por ese término no llega al 1 %.

5.2.4 BALANCE DE AGUA POR ZONAS

Se delimitaron nueve zonas para realizar balances de flujo del agua para establecer análisis más detallados (Figura 5.17).

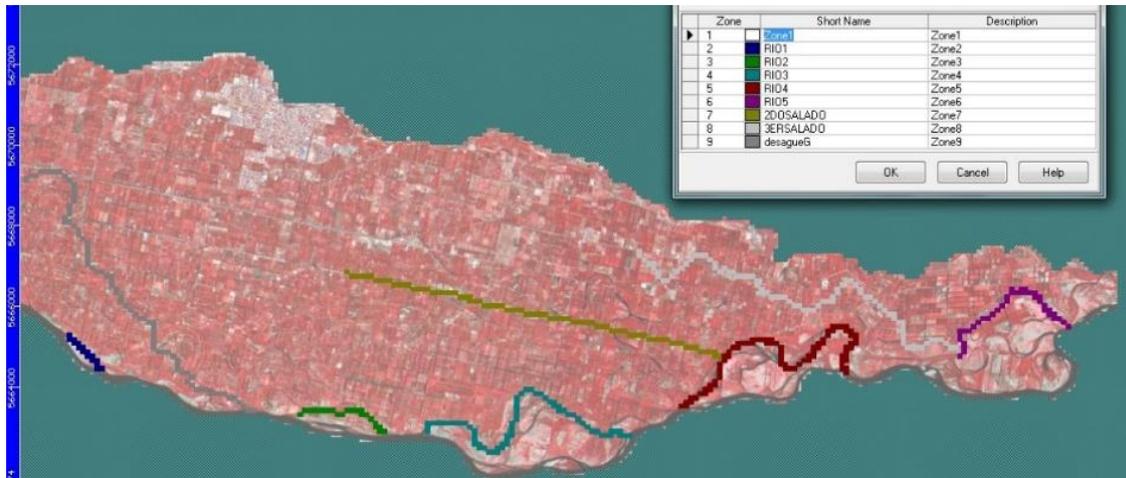


Figura 5.17. Zonas de Balance de flujo. Fuente: Elaboración propia, 2020.

En relación al drenaje del área, el caudal calculado por el modelo que evacúan los cuatro desagües es de 1750 L/s, valor razonable en relación al observado.

Si se analizan los cuatro por separado y la influencia que tienen en el total de agua que sale por ellos, se observa que tanto el Segundo Salado como el Desagüe G son los que más impacto tienen a la hora de evacuar el agua, llegando a evacuar cada uno un 33% del total. Luego sigue el Primer Salado con un 26 % y por último, el que menos impacto tiene es el Tercer Salado evacuando el 11 % del agua (Figura 5.18).

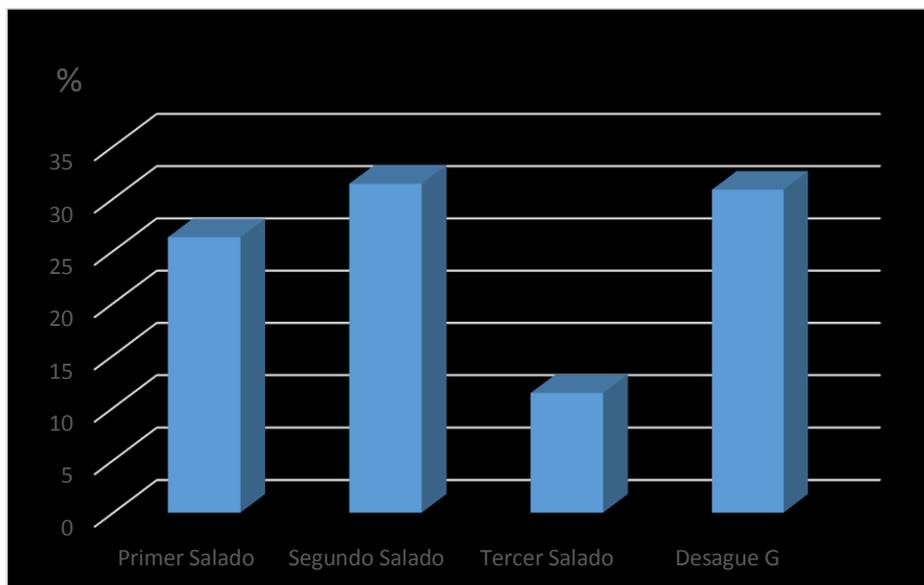


Figura 5.18. Porcentaje de Caudales salientes de los Desagües. Fuente: Elaboración propia, 2020.

El análisis por zonas arrojó en el Segundo, en el Tercer Salado y en el desagüe G sectores en los cuales ingresa agua, siendo el caudal muy bajo, tanto que prácticamente no interviene en el valor final, pero tiene un impacto localizado que se condice con lo observado en campo (Figura 5.19). Técnicos del CRyDVR informaron que en el último

sector del Segundo Salado la evacuación del agua se ve impedida, ya que en un tramo posee un nivel más bajo, lo que hace que se formen lagunas alrededor debido al impedimento en la descarga.

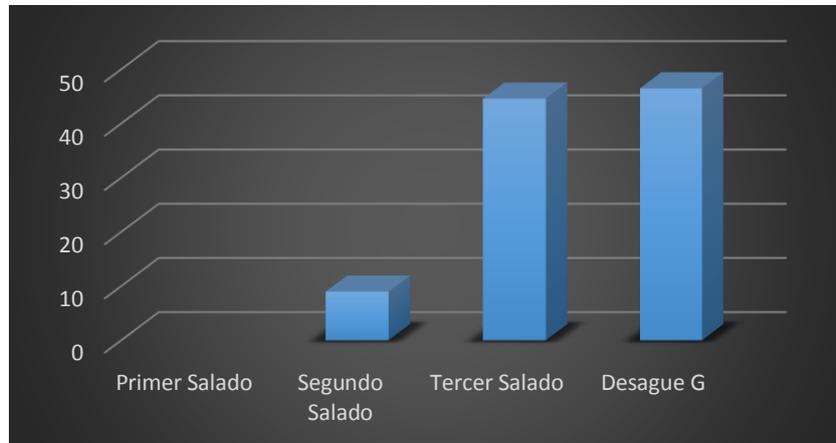


Figura 5.19. Caudales que entran al segundo, tercer salado y desagüe G. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Los resultados obtenidos advierten que los desagües Segundo y Tercer Salado y el Desagüe G no están funcionando correctamente y ponen en discusión la necesidad de intervenir para lograr el principal objetivo que es evacuar toda el agua, como sí ocurre en el Primer Salado. Para confirmar esta aseveración es necesario realizar una validación del modelo en flujo transitorio, considerando la época de riego y no riego, con las variaciones mensuales de la recarga. Así poder analizar puntualmente situaciones que se dan a lo largo del tiempo y sus posibles intervenciones.

Se analizó en seis zonas el balance del río, el tramo principal y cinco tramos más pequeños (Figura 5.20), su localización se observa en la Figura 5.17. Cabe resaltar que el río actúa como zona de transición para las entradas y salidas de agua al acuífero, es decir, que el agua circula entre los dos cuerpos constantemente en función de la altura del acuífero y el nivel del río, confirmando la constante interacción entre ambos, que es de carácter permanente (Pavese *et al.*, 2013).

Como se puede ver en la Figura 5.20 el tramo principal y los tramos uno, tres y cuatro son los que más interacción con el acuífero tienen. Cabe destacar que en relación al ingreso de agua el tramo principal recibe casi el 31 % de toda el agua que ingresa al río, siendo esta situación esperable debido a que es el mayor cuerpo de agua simulado. Además, toda el agua que ingresó a los demás tramos termina en el tramo principal, notando que le siguen en orden de relevancia el uno, el tres y el cuatro.

El tramo cinco no posee un gran porcentaje de participación, destacando que el resultado podría llegar a ser mejorado, ya que al Este de la zona debería en futuros trabajos incorporarse más pozos de observación para mejorar el resultado obtenido. Como se observa en la configuración espacial de la red, son pocos los puntos de muestreo para esa zona.

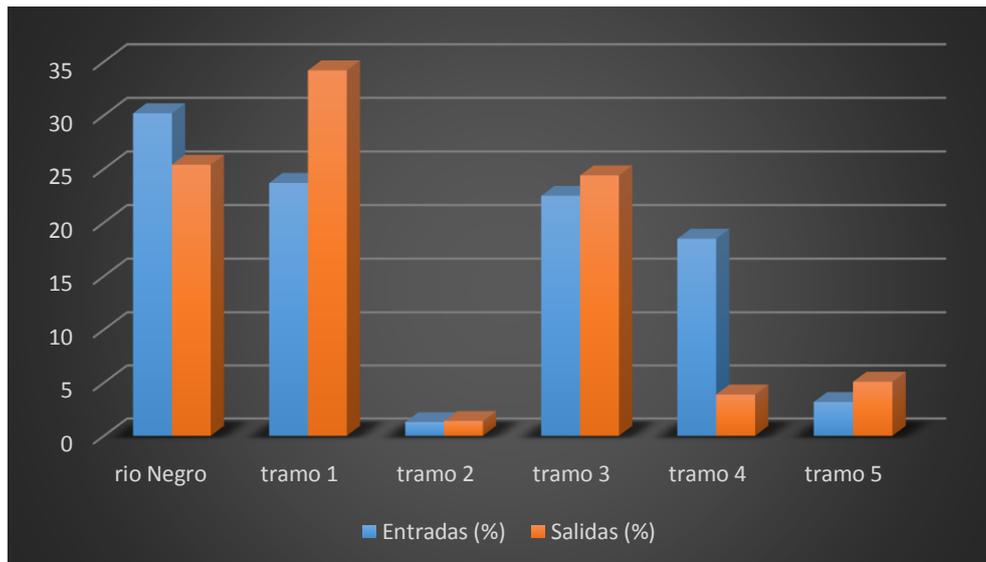


Figura 5.20. Balance de agua de la sectorización del río Negro. Fuente: Elaboración propia, 2020.

En todos los brazos del río hubo caudales entrantes y salientes, lo cual confirma la teoría de que hay una interacción permanente entre el río y acuífero, y además, el primero actúa como una zona de transición como se describió en párrafos anteriores.

Se obtuvo un volumen de agua que ingresa al río de 498,2 Hm³ y salieron del mismo un volumen de 477,6 Hm³, esta diferencia a favor de las entradas, infiere entonces que el acuífero en épocas de no riego alimenta al río, como obtuvo Pavese *et al.* (2013) en su estudio.

5.3 MANEJO DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (IG) Y SATELITAL PARA LA GIRH

5.3.1 BASE DE DATOS GEOGRÁFICA DEL DISTRITO

El consorcio de Riego y Drenaje de Villa Regina tenía ya conformada una BDG con diversas capas vectoriales de interés: *shapes* de la red de canales, red de desagües, red de comuneros, red freaticométrica, compuertas, área de influencia de los tomeros, turnados de riego, entre otras, elaboradas en el marco de un proyecto Institucional del INTA (Fernández, 2018).

En el presente trabajo, con los datos relevados se crearon más capas para robustecer la BDG existente. También se digitalizaron *shapes* con información de estudios antiguos como el Estudio Integral del Río Negro (CyL-AyEE, 1987; CyL-AyEE 1990) y se añadió información con la que cuentan otros entes como la AIC. De esta manera se contribuyó al conocimiento exhaustivo del distrito.

Las capas digitalizadas en el presente trabajo se detallan a continuación y se observan en la Figura 5.21:

- Capa de puntos de cotas MOP. Cada cota MOP fue medida y localizada en el año 1957 para el diseño de la ruta Nacional 22. Las cotas se midieron en cada km en distintos puentes. En la actualidad se realizó un relevamiento de cuáles existen todavía.
- Capa de puntos de mojones IGM y puntos fijos de interés, aportados por la AIC.

- *Shape* de cotas de pelo de agua, fondo de canales y desagües al inicio y al final de cada tramo en dos períodos: invierno y época de máximo riego.
- *Shape* de aforos de canales y desagües en puntos estratégicos en ambos períodos.
- Propiedades hidráulicas (K, T, espesor del acuífero freático, Sr y Sy) de los pozos de medición en el estudio integral del río Negro (1983).
- Con los datos de lecturas del nivel freaticométrico y las cotas de terreno de cada pozo se realizaron las capas *shape* anuales con los valores de cota de capa freática en cada lectura mensual, en el período 2010-2019.
- Se conformó la capa *shape* de usos del suelo de toda el área. En conjunto con técnicos de campo se elaboró la capa determinando los tipos de cultivo presentes y aquellas áreas en las que no hay actividad productiva.

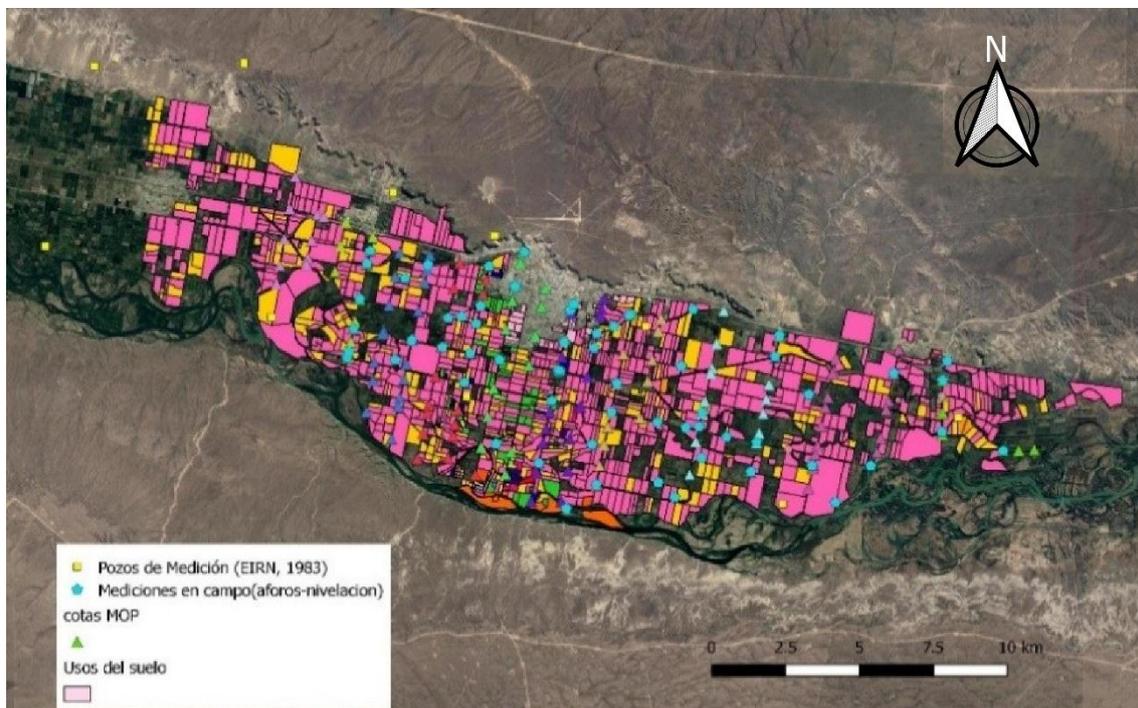


Figura 5.21. Capas *shape* de IG del distrito de Villa Regina, elaboradas en el marco del presente trabajo. Fuente: Elaboración propia, 2021.

Las nuevas capas digitalizadas en el período de elaboración del presente trabajo son de suma importancia para ser anexadas a la BDG que posee el área bajo estudio. Estas aportan al conocimiento integral de los factores naturales y antrópicos que dominan el agrosistema e influyen en la dinámica del agua. Por lo tanto, las nuevas capas son fundamentales para la toma de decisiones en cuanto al uso y la disponibilidad del agua, como soporte para el ordenamiento territorial, entre otras aplicaciones. Además, se provee al consorcio de información fundamental para operar el sistema de manera óptima y tomar decisiones.

5.3.2 DETECCIÓN DE CRECIDA DEL AÑO 2018, COMPARACIÓN CON EL 2017 (AÑO TÍPICO) – APLICACIÓN DE ÍNDICES ESPECTRALES

Se calcularon los índices MNDWI (Xu, 2006) y NDWI (Mcfeeters, 1996) con imágenes Sentinel 2 para ambos años analizados. Los resultados mostraron una buena performance a la hora de detectar la configuración espacial del río, siendo ambos índices complementarios en la zona. A continuación, se observa en la Figura 5.22 cada uno de ellos calculado para agosto del 2017 y agosto del 2018.

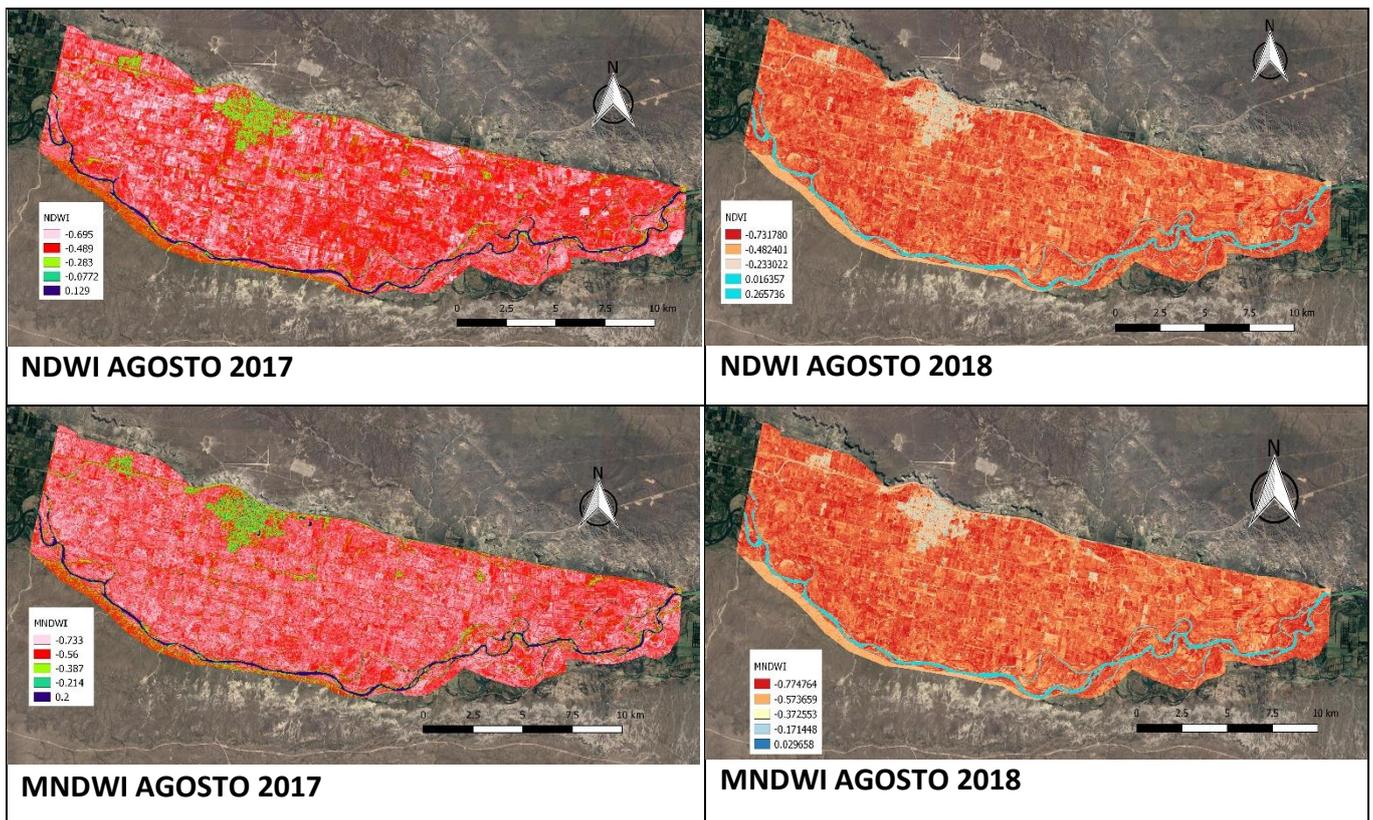


Figura 5.22. MNDWI y NDWI calculados en ambos períodos de análisis, valores mayores a 0 representan cuerpo de agua libre. Fuente: Elaboración propia, 2020.

En la Tabla 5.3 se observan el rango de valores obtenidos en cada índice espectral para las cuatro escenas procesadas.

Tabla 5.4. Máximos y Mínimos en los índices espectrales calculados. Fuente: Elaboración propia, 2021.

	MNDWI AGOSTO 2017	NDWI AGOSTO 2017	MNDWI AGOSTO 2018	NDWI AGOSTO 2018
Mínimo	-0,73	-0,69	-0,77	-0,73
Máximo	-0,04	0,13	0,03	0,26

Los valores de los índices superiores a cero corresponden a coberturas de cuerpos de agua. No obstante, en la zona urbanizada, determinados sectores que se corresponden con techos muy brillantes presentaron el mismo valor de los índices, generando que se mezclen las coberturas (Figura 5.23). Para subsanar la mezcla de píxeles, se vectorizó un polígono con las áreas que generan el ruido y se extrajeron de los *raster*, para que

luego en la construcción de las imágenes binarias no se contabilice la superficie correspondiente a suelo urbano como agua.

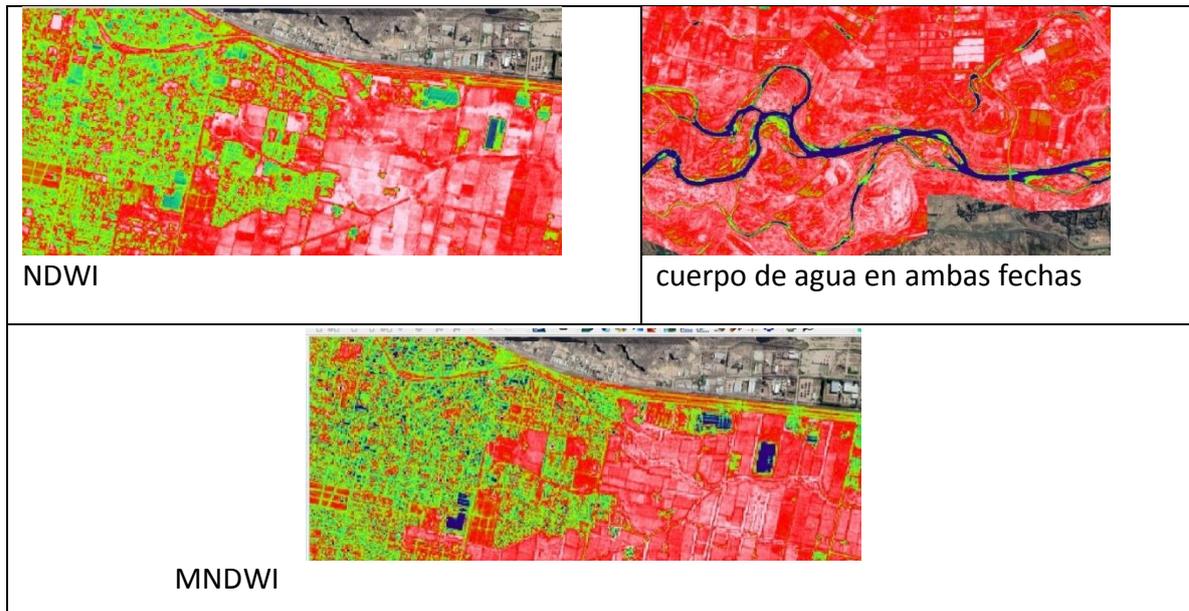


Figura 5.23. Mezcla de coberturas distintas a agua libre en el cálculo de los Índices, efecto mayor en MNDWI.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

Numerosos estudios revelan la capacidad de los índices para delimitar los cuerpos de agua en relación a otras coberturas terrestres. Mc Feeters (1996) mostró que el NDWI es un buen método para delinear de manera óptima las características de los cuerpos de agua y resaltarlas del resto de las coberturas terrestres en una imagen, siendo un método rápido y eficiente para estimar la superficie de áreas cubiertas por agua.

Xu (2006), Szabo *et al.* (2016), Haspert (2018) han utilizado el NDWI y el MNDWI entre otros métodos computacionales y los han comparado, determinando que el MNDWI tiene mejor desempeño para la determinación de los cuerpos de agua, ya que separa aún más la zona construida en relación al NDWI.

Era de esperar, dada la bibliografía consultada, obtener una mejor performance con el MNDWI. Sin embargo, el efecto de confusión de coberturas brillantes con el agua se registró mayormente con el índice de Xu (2006) siendo menor en el NDWI. Si bien la bibliografía consultada apunta a que el índice modificado posee una mayor exactitud que el NDWI, en el área bajo estudio se observó una complementariedad de ambos. Una de las hipótesis que puede explicar los resultados, es el uso de imágenes provenientes de distintos sensores. En la bibliografía se utilizó Landsat 8, mientras que en la zona se utilizó Sentinel 2, esta variable puede ser una posible causa de complementariedad, debido a la resolución espacial.

A partir de los resultados, se pretende en futuras líneas de investigación avanzar en el estudio del mejoramiento de la detección de cuerpos de agua utilizando estos índices espectrales y combinando con diversas técnicas de teledetección, profundizando y mejorando la metodología usada.

De las imágenes binarias se vectorizó el río en ambas escenas y se calculó el área cubierta por cada uno de ellos. En la Tabla 5.3 se muestra el resultado obtenido.

Tabla 5.3. Superficie cubierta por el río en relación al caudal medido. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Fecha de la Imagen	Caudal (m ³ /s) a la fecha	Superficie del curso de agua (km ²)
01/08/2017	318,66	6,32
01/08/2018	1157,97	6,74

En la escena del 2018 los índices detectaron una mayor área cubierta por agua, siendo esperable, ya que el caudal era casi tres veces mayor que en el año 2017. La metodología aplicada logró registrar el fenómeno natural, siendo una herramienta útil para avanzar en el conocimiento de la dinámica del río y para analizar eventos extraordinarios y su impacto en el sistema de estudio, como lo es una crecida de magnitud.

Al superponer las capas vectorizadas del río de ambos años, se puede delimitar las áreas en las cuales éste avanzó, producto de la crecida (Figura 5.24). Esta información es fundamental para el ordenamiento territorial del área y serviría, por ejemplo, para delimitar zonas de ribera. Para el consorcio de riego la implementación de este tipo de metodologías sería de un gran aporte para la planificación y gestión de las redes de canales y desagües.



Figura 5.24. Superposición de ríos vectorizados, en violeta el 2017 y en verde el 2018. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Este análisis permite tener una primera aproximación para acercarse a una metodología certera en la región que se base en la detección de cuerpos de agua libre y zonas inundadas y poder determinar el área de afectación de un evento.

Complementar los registros de las bases de datos con imágenes satelitales de acceso libre es una poderosa herramienta para comprender el sistema y actuar frente a diversos fenómenos que afectan a la cantidad del recurso hídrico disponible.

Al mismo tiempo complementar la información con la obtenida por el modelo y la base de datos del consorcio, será una herramienta de vital importancia para los tomadores de decisiones en la red de riego del distrito.

5.3.2.1 Análisis del Impacto de la crecida del río en el nivel freático

Se analizaron veinte freatómetros, en sólo tres se registraron ascensos menores a 0,20 metros de un año para el otro. En los restantes los ascensos superaron los 0,38 metros, registrando en el 60 % elevaciones superiores a los 0,7 metros.

Se confirma la influencia de la crecida del río como aporte al acuífero freático, dado que dicha influencia por la época de análisis está dada solo por la interacción río-acuífero.

Como infieren Godagnone (2009) y Marizza *et al.* (2009), el aporte de lluvias no fue significativo de un año para el otro como para suponer una elevación de la napa. De hecho, según la base de datos climática, entre agosto del 2017 y agosto del 2018 la precipitación fue de 220 mm, confirmando una escasa cantidad de lluvia caída como para que recargue notablemente el acuífero.

En relación a la afectación de la recarga por riego, como bien se explicó en apartados anteriores, agosto es el mes que muestra el equilibrio del acuífero, ya no hay en esa época recarga por riego. Por ende, con este análisis, se sustenta que la elevación registrada está dada por un factor natural, en este caso, la crecida del río.

La Figura 5.25 muestra los veinte freatómetros en los cuales se analizó la influencia del evento natural y la diferencia registrada entre el año 2018 y 2017, correspondiéndose con un aumento de la freática de un año para el otro.



Figura 5.25. Distribución espacial de los freatómetros y diferencia de cota entre el 2017 y 2018. Fuente: Elaboración propia, 2021.

Solo un freatómetros arrojó una diferencia negativa, es decir, que el nivel de la napa estaba más elevado en el año 2017 en comparación al año de la crecida. Debido a ser el único caso registrado en todos los analizados, se decidió eliminarlo infiriendo un posible error en la lectura.

Se calculó un promedio de ascenso para toda la zona analizada, éste arrojó un valor de 0,7 metros. La Figura 5.26 muestra la magnitud de la diferencia en los freatómetros analizados en un sentido Oeste-Este en relación a su configuración espacial.

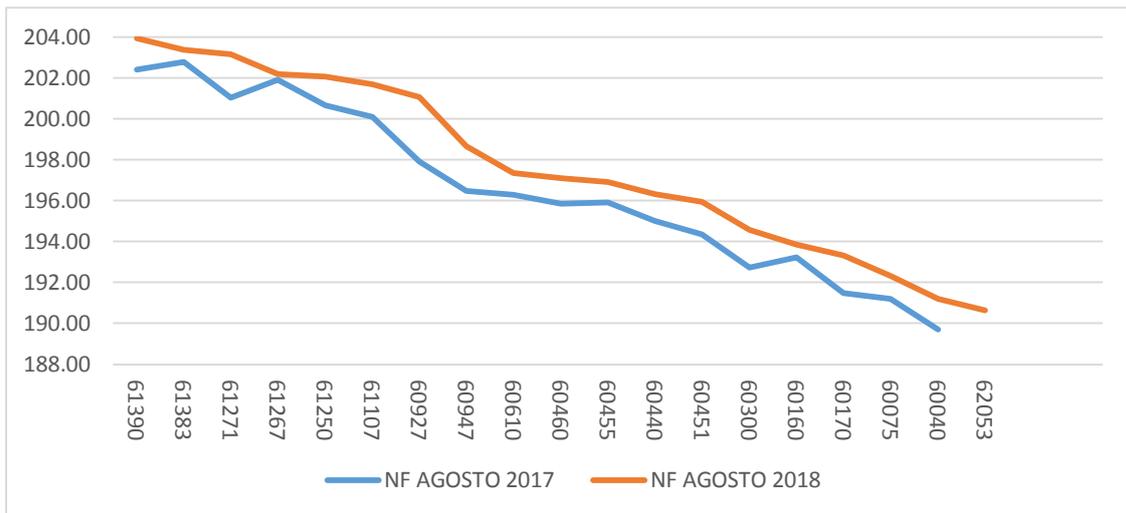


Figura 5.26. NF de los pozos observados en ambos años de análisis. Fuente: Elaboración propia, 2021.

Con imágenes Sentinel 2 se logró captar a través de los cambios en la cobertura terrestre el aumento de la superficie cubierta por el agua como consecuencia del mayor caudal transportado por el río y analizando el registro de lluvias en la zona y las variaciones de los freáticos en ambos años, logró confirmarse que se registró un ascenso en el acuífero freático como resultado de la crecida.

La implementación de diversas técnicas de análisis tanto de Información Geográfica como de bases de datos logró ajustar una metodología sencilla, rápida y eficaz para estudiar fenómenos naturales y su impacto en una cuenca, con un abordaje integral que comprendió el estudio y la interacción de las aguas superficiales y subterráneas.

Se pretende en futuros estudios, y con un mayor número de imágenes satelitales y datos freáticos, analizar si los ascensos del acuífero freático, debido tanto a eventos naturales como antrópicos, generan en el tiempo un ascenso paulatino de la napa que afectaría a la sustentabilidad del agrosistema.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los recursos naturales del mundo se encuentran expuestos a una creciente presión antrópica, ejerciendo graves consecuencias que se visualizan en su deterioro. Los cambios a nivel global que se observan día a día en la naturaleza, indican la necesidad de re pensar el vínculo entre los seres humanos y el ambiente que habitamos. Es aquí, donde la ciencia y la tecnología aplicada toman un rol fundamental, brindando herramientas y metodologías que aporten a lograr un nuevo vínculo que no vaya en desmedro del estado del ambiente.

Si de recursos hídricos hablamos, estos son vitales para la vida en todos sus aspectos. Existe numerosa evidencia científica de la presión a la que están sometidos, es evidente el deterioro de la cantidad y calidad del agua tanto superficial como subterránea.

Esto conlleva a la imperiosa necesidad de pensar y aplicar una nueva forma de manejar los recursos hídricos. Estudiar los procesos que se dan en la naturaleza y su interacción con una visión de sistemas complejos, aportará herramientas y un conocimiento más exhaustivo para afrontar la situación en la que actualmente nos encontramos. Esta nueva forma de manejar los recursos hídricos se basa en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, proceso que tiene un enfoque sistémico y propicia sistemas de desarrollo sustentable y gestión de los recursos hídricos.

El Consorcio de Riego y Drenaje de Villa Regina no escapa a la realidad planteada en el mundo, es un complejo sistema en el cual conviven diversas actividades, siendo la productiva la principal actividad económica que ejerce presión en el agua, tanto superficial como subterránea. En relación a la primera, se destaca el uso consuntivo del recurso que sostiene la economía de la zona, y su interacción constante con el agua subterránea como bien se expuso en el presente trabajo.

Lograr una GIRH en dicho ambiente es una meta en el tiempo y un desafío a cumplir desde diversos organismos de ciencia y técnica. A partir del rol que ocupamos en la sociedad, es que promovemos esta nueva mirada, y a través de nuestras investigaciones creemos fundamental el aporte de conocimiento científico y herramientas que aporten a dicho objetivo.

Bajo este enfoque, es que los resultados del presente trabajo de tesis permiten concluir que el uso de herramientas de modelación matemática integrada al uso de Información Geográfica y Satelital permitió analizar y comprender la interacción de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, en el marco del funcionamiento de un sistema productivo tan importante como lo es el Alto Valle del Río Negro y Neuquén, brindando conocimiento y herramientas que aporten a la implementación de una GIRH.

Poner a punto y a disposición una metodología que integre estas herramientas es fundamental para los tomadores de decisiones, para permitir mantener la sustentabilidad del agua involucrada en un sistema productivo intensivo como lo es el área de estudio. En este trabajo, se analizó la capacidad y potencialidad del modelado matemático y herramientas de Teledetección que pueden complementar con el análisis de bases de datos, con el fin de lograr comprender el sistema estudiado.

A continuación, se detallan las conclusiones específicas de cada herramienta utilizada y luego se realizarán recomendaciones de pasos a seguir y nuevas líneas de investigación que se desprenden de la tesis, para poder enriquecer los aportes realizados.

A partir de los resultados de desarrollo y aplicación del Visual Modflow y el QGIS, análisis de bases de datos y cálculo de índices espectrales para detección de cuerpos de agua libre, se concluye que:

- La calibración del modelo se considera exitosa en relación a los resultados. El modelo numérico propuesto converge a los valores observados en la simulación de estado estacionario para los valores de Niveles Freáticos de Agosto del 2018, logrando un ajuste adecuado con un error medio de 0,19 metros y un coeficiente de correlación de 0,99. Es fundamental destacar que dicha formulación coincide con el modelo hidrogeológico conceptual elaborado.
- La calibración permite simular correctamente la interacción río-acuífero y desagües-acuífero, permitiendo calcular condiciones iniciales para una posterior simulación en estado transitorio.
- Visual Modflow demostró ser una herramienta adecuada a las necesidades del presente trabajo, siendo de suma utilidad para integrar toda la información disponible del área de estudio y aportar al análisis cuali y cuantitativo del acuífero freático de Villa Regina.
- Los parámetros sensibles a la calibración fueron la Conductividad Hidráulica, la Recarga y la conductancia del río y los desagües.
- La conductividad hidráulica muestra un alto grado de variabilidad, con un total de nueve zonas dispersas en el área, confirmando la elevada heterogeneidad de los materiales de formación presentes y revalidando la complejidad del distrito en relación al flujo de agua subterránea.
- En relación a la recarga efectiva, fueron cinco sectorizaciones las que permitieron el ajuste adecuado. Incorporando en el estado transitorio la capa de usos del suelo podrá ajustarse aún más dicho resultado.
- Se obtuvo una conductancia del río y de los desagües, mayor que la teórica. Se infiere que existe una mayor interacción entre los cuerpos de agua superficiales y el acuífero, que además es sectorizada, denotando su complejidad.
- El balance de agua por zonas obtenido, corroboró una constante interacción entre el río y el acuífero freático. El primero funciona como zona de transición. Cabe destacar que en épocas de no riego el acuífero alimenta al río. No obstante, los eventos extremos requieren una atención especial en dicha interacción. Nótese que la crecida del 2018 elevó los Niveles Freáticos cercanos a menos de 2 km de distancia.
- Villa Regina posee un comportamiento especial a la hora de evacuar el agua subterránea, con dos direcciones bien marcadas, hacia el Sureste con dirección al río y hacia el Noreste con dirección al desagüe Primer Salado, lo que le confiere un comportamiento similar al de una isla.

- La mayor cantidad de agua que circula en el acuífero es evacuada por los desagües del área, llegando al 75 %. Estos son los encargados de evacuar todo el año el exceso por el riego, por lo tanto, se torna fundamental la limpieza y mantenimiento de los mismos para mantener en equilibrio el sistema hídrico superficial-subterráneo sin afectar la calidad del suelo y la actividad productiva imperante.
- El Modflow puso en evidencia que, al Este del área de estudio, en la zona de Chichinales, se manifiestan dificultades de evacuación del agua, como lo expresaron técnicos del consorcio de riego y drenaje. Se observan diversas direcciones y magnitudes del flujo que complejizan la correcta evacuación. Así mismo, se obtuvieron caudales ingresantes a los desagües en la zona mencionada que lo confirman.
- Las bases de datos generadas en el presente trabajo, desde las capas con los datos relevados a campo hasta las bases climáticas e hidrológicas con tecnología de SIG, permiten la elaboración de mapas ambientales que pueden integrarse y analizarse para resolver problemas en el campo de la investigación, el planeamiento y la gestión.
- El NDWI y el MNDWI fueron eficientes para detectar un evento natural como la crecida del río Negro de la magnitud estudiada en el área de estudio. La metodología es simple y efectiva y permite analizar eventos pasados y los cambios que se producen en el agrosistema en relación a los cuerpos de agua superficiales. Se evidencia la potencialidad y eficacia del MNDWI y el NDWI en la determinación de cuerpos de agua libre. Éstas pueden ser poderosas herramientas para el estudio de la dinámica de un cuerpo de agua superficial y la determinación y mapeo de zonas temporalmente anegadas.
- Se analizaron los freatómetros que se encontraban a menos de 2 km de distancia del río. Se detectó, debido a la crecida de éste, un ascenso promedio de 0,7 metros del Nivel Freático en dichos puntos de observación. Se refuerza y corrobora la fuerte interacción del río-acuífero expuesta por el modelo numérico.
- Complementar la modelación numérica con técnicas de SIG y teledetección aporta a generar un conocimiento integral de la interacción de las aguas superficiales y subterráneas del área. Se pretende brindar para los tomadores de decisiones, información fundamental en el comportamiento del ciclo hidrológico y las variables que intervienen, contribuyendo a la planificación y gestión de los recursos hídricos con una visión de GIRH, bajo un nuevo paradigma que se base en la sustentabilidad ambiental.

Hasta aquí, podemos concluir que los objetivos generales y específicos fueron cumplidos satisfactoriamente, siendo el Visual Modflow y las técnicas de SIG y Teledetección aplicadas, valiosas herramientas para analizar y generar información del sistema de Villa Regina que aportaron al análisis integral. Su complemento colabora de manera significativa a una visión sustentable del área.

De la presente investigación surgen disparadores de nuevos ejes de trabajo que se plantea abordar en futuras líneas de investigación con el objetivo de enriquecer el conocimiento sistémico del área de estudio. Algunas recomendaciones y futuros trabajos son:

- Incorporar la variable tiempo en el análisis del modelo. Para ello es fundamental validar el modelo numérico en estado transitorio en el área de estudio. Con dicha herramienta validada se podrán simular eventos puntuales en el distrito, ya sea de origen antrópico y natural. Así como diversos escenarios de disponibilidad hídrica bajo distintas condiciones de cambio climático.
- Incorporar a la validación la red de canales y desagües completa y la capa de usos de suelo, con el objetivo de realizar un análisis más exhaustivo de cada variable que interviene en el proceso de recarga del acuífero. Esto permitirá evaluar el comportamiento del manejo parcelario del agua y la eficiencia de la red de riego a lo largo de la temporada.
- Aumentar el número de pozos de observación al este del área, para lograr un mayor nivel de confianza y aumentar la densidad de los valores observados.
- Plantear una nueva modelización que complejice el escenario, teniendo en cuenta los dos estratos presentes, es decir, modelar el área con dos capas heterogéneas y comparar resultados.
- Debido a los elevados datos obtenidos en la conductividad hidráulica, que se conciden con estudios previos, se recomienda profundizar en el estudio de la conductividad hidráulica para verificar que los elevados valores obtenidos resulten correctos, promoviendo la realización de nuevos estudios hidrogeológicos en el área.
- En caso de fenómenos climáticos adversos, se recomienda seguir el monitoreo de la red mensualmente. Si es necesario, aumentar la frecuencia de muestreo con el objetivo de captar el proceso con mayor información, para que sean insumo tanto para el modelo como para la aplicación de índices espectrales y corroborar su relación con las aguas subterráneas.
- En futuras crecidas del río, complementar el cálculo del MNDWI y el NDWI con trabajo de campo, monitoreando los sitios afectados por el agua para poder evaluar el error estimado en los resultados obtenidos.
- En relación a la detección de cuerpos de agua superficiales, se recomienda aplicar otros índices y metodologías para dicho fin y comparar su performance para llegar a obtener el más adecuado en la zona. Otra de las variables a analizar es el utilizar imágenes con distintas resoluciones espaciales, analizando la performance de las mismas y obtener la más adecuada para el área.
- Con la base de datos existente de los freatómetros, analizar si existe una tendencia a largo plazo de un ascenso paulatino del Nivel Freático y cuál es su causa, modelar dicho impacto y sus consecuencias en la red de riego.

- Hacer hincapié en la medición de diversos datos hidrológicos del río, de los desagües principales y la red de canales, que aporten como insumos para los estudios detallados anteriormente.

Para finalizar, entre las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo, se puede afirmar que las herramientas utilizadas son adecuadas para generar conocimiento científico sobre el comportamiento e interacción de las aguas superficiales y subterráneas. Comprender la complejidad del agrosistema aportará para la GIRH y serán sustento para los tomadores de decisiones en la generación de políticas públicas y en la planificación y gestión de los recursos hídricos en la región.

BIBLIOGRAFIA

ALFARO, P.; LIESCHI, T.; GOLDSCHIEDER, N. 2017. Modelling groundwater over-extraction in the southern Jordan Valley with scarce data. *Hydrogeology Journal*. 25:1319-1340. DOI 10.1007/s10040-017-1535-y.

ALVAREZ, A.O.; GALEAZZI, J.O.; STANGAFERRO, S.; BARTUSCH, A.; POLLA, G. 1995. Organización, procesamiento y evaluación de la información sobre niveles del agua freática en el Alto Valle de Río Negro. Informe técnico, convenio FCA-DPA-ITAC. 93 p.

ALLAN FREEZE, R.; CHERRY, J. A. 1979. *Groundwater*. Prentice Hall. 624 p. ISBN 0-13-365312-9. Englewood Cliffs. New Jersey. EE UU.

ANDRADE, F. H. 2016. Los desafíos de la agricultura. Primera Edición. Acassuso: International Plant Nutrition Institute. 136 p. ISBN 978-987-46277-0-4. Balcarce. Argentina.

ANTÓN RODRIGUEZ, A. 2019. Análisis evaluativo de índices espectrales en imágenes de satélite. Trabajo fin de grado en Ingeniería Informática. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Informáticos. Universidad Politécnica de Madrid. 57 p.

ARUMÍ, J. L.; RIVERA, D.; MUÑOZ, E.; BILLIB, M. 2012. Interacciones entre el agua superficial y subterránea en la región del Bío Bío de Chile. *Obras y Proyectos N° 12*. 4-13. Concepción. Chile.

AUGE, M.; WETEEN, C.; BAUDINO, G.; BONORINO, G.; GIANNI, R.; GONZÁLEZ, N.; GRZINIK, M.; HERNÁNDEZ; RODRÍGUEZ, J.; SISUL, A.; TINEO, A.; TORRES, C. 2006. Hidrogeología de Argentina. *Boletín Geológico y Minero*, 117 (1): 7-23. ISSN: 0366-0176.

BAUER, C. E.; BERECIARTÚA, P.J. 2011. La cuestión del agua: consideraciones sobre el estado de situación de los recursos hídricos de la Argentina. Primera Edición. La Plata: Universitaria de La Plata. Academias Nacionales de Ingeniería, Ciencias Económicas y Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 128 p. [en línea]. [<https://iarh.org.ar/advf/documentos/4e49647d7d2cd.pdf>]

BASÁN NICKISCH, M. 2008. Curso "Aforadores de Corriente de Agua". INTA EEA Santiago del Estero. 61 p. [en línea]. https://www.produccion-animal.com.ar/agua_bebida/127-curso_aforadores_agua.pdf

BIANCHI, L. O.; RIVERA, J. A.; ROJAS, F.; BRITOS NAVARRO, M.; VILLALBA, R. 2018. A regional water balance indicator inferred from satellite images of an Andean endorheic basin in central-western Argentina. *Hydrological Sciences Journal*. 62:4. 533-545. DOI: 10.1080/02626667.2016.1247210

BRAVO, E.; MONTOYA, S. 2016. Manual de Modelamiento Numérico con MODFLOW. Curso de modelamiento con MODFLOW. Gestión de los Recursos Hídricos (GIDAHATARI). 113 p. [en línea]. <https://gidahatari.com/ih-es/manual-de-modelamiento-numerico-con-modflow-en-espanol>

CALCAGNO, A.; MENDIBURO, N.; GAVIÑO NOVILLO, M. 2000. Informe sobre la gestión del agua en la República Argentina. *Word Water Vision*. 151 p. [en línea]. [<http://www.protectora.org.ar/wp-content/2010/10/Informe-Nacional-sobre-la-Gestio%CC%81n-del-Agua-en-Argentina.pdf>]

CASSIRAGA, E. 2013. Hidrología Subterránea. Apuntes de Curso de Posgrado. Grupo de Hidrogeología. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. Neuquén. Argentina.

CATOIRA, P. F. 2014. El Uso de la tierra en el Alto Valle del Río Negro. FyDEEA Alto Valle. Centro Regional Patagonia Norte. Revista FyD número 73. 16-20 p. <https://inta.gob.ar/documentos/el-uso-de-la-tierra-en-el-alto-valle-de-rio-negro>

CELLO, P. A. 2016. Modelación del flujo subterráneo del sistema acuífero de Ingeniero Jacobacci, provincia de Río Negro. Informe Final. CENTRO de Estudios Hidro-Ambientales (CENEHA), Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH), Universidad Nacional del Litoral (UNL). 24p.

CHANG MARTINEZ, T. O. 2012. Integración de un modelo de flujo a un Sistema de Información Geográfica (SIG). Tesis para obtener el grado de Maestro (a) en Geociencias Aplicadas. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C. IPICYT. San Luis Potosí. México. 101 p.

CHUVIECO SALINERO, E. 2008. Teledetección Ambiental. 3ra Edición. Editorial Ariel S.A. ISBN: 978-84-344-8073-3. 457 p. Barcelona. España.

CIL-AyEE (Consortio Iconas Latinconsul - Agua y Energía Eléctrica) 1991b. Estudio para el aprovechamiento integral del Río Negro. Etapa II. Nivel prefactibilidad. Rio Negro. 200 p.

CIL-AyEE (Consortio Iconas Latinconsul - Agua y Energía Eléctrica) 1991c. Estudio para el aprovechamiento integral del Río Negro. Etapa II. Investigaciones y estudios Hidrogeológicos. Informe Final. Tomos 1-2-4. Rio Negro.

CIL-AyEE (Consortio Iconas Latinconsul - Agua y Energía Eléctrica) 1991d. Estudio para el aprovechamiento integral del Río Negro. Etapa II. Informe del propósito drenaje fase II – Contra canales colectores II. Rio Negro.

CIL-AyEE (Consortio Iconas Latinconsul - Agua y Energía Eléctrica) 1990. Estudio para el aprovechamiento integral del Río Negro. Etapa II. Drenaje, Informe fase I. Rio Negro. 138 p.

CIL-AyEE (Consortio Iconas Latinconsul - Agua y Energía Eléctrica) 1987. Estudio para el aprovechamiento integral del Río Negro. Sector Drenaje. Informe Final. Rio Negro.

CUSTODIO, E; LLAMAS, M. R. 1983. Hidrología Subterránea. Editorial Omega. Barcelona. Tomo II. 2359 P.

CUÉLLAR, A. C. 2014. Uso de sensores remotos para la predicción de casos de malaria en el departamento de Orán, Salta, Argentina. Tesis para obtener el título en Magister en aplicaciones espaciales y de alerta temprana de emergencias. Facultad de Matemática, Astronomía y Física. Instituto de Alto Estudios Espaciales Mario Gulich. 95 p.

DA SILVA, C. J.; INSAURRALDE, J. A.; CARDOZO, O. D. 2014. Cartografía de coberturas del suelo mediante sensores remotos, de la ciudad de Resistencia, Argentina (2013). Revista Geográfica Digital. IGUNNE. Facultad de Humanidades. UNNE. Año 11. Nº 21. ISSN 1668-5180.

FERNANDEZ, E. J. 2018. Proyecto PROFEDER. Aportes a la valorización y al uso sustentable de los recursos agua y suelo por parte de los productores y organizaciones del área de influencia de la AER Villa Regina. AER Villa Regina. Villa Regina. Argentina.

FATORRELLI, S. *et al.*; FERNANDEZ P. C. 2011. Diseño Hidrológico. Edición digital. Water Assessment and Advisory Global Network (WASA-GN). ISBN: 978-987-05-2738-2. [En línea]. 531 p.
https://www.academia.edu/9251651/Dise%C3%B1o_Hidrol%C3%B3gico_EDICION_DIGITAL_C_D_I_N_C_L_U_I_D_O

FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION (FAO). (s.f.). Aquastat.
<http://www.fao.org/aquastat/es/>

FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION (FAO). 2015 a. Documento de trabajo Nº 2. Disponibilidad de Recursos y Condiciones Agroclimáticas. Proyecto FAO UTF ARG 017. Desarrollo institucional para la inversión. 87 p.

FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION (FAO). 2015 b. Documento de trabajo Nº 8. Infraestructura de Riego en la Provincia de Río Negro. Proyecto FAO UTF ARG 017. Desarrollo institucional para la inversión. 125 p.

FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION (FAO). 2015 c. Documento de trabajo Nº 11. Balance Hídrico de la Cuenca del Río Negro. Proyecto FAO UTF ARG 017. Desarrollo institucional para la inversión. 50 p.

FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION (FAO). 2015 d. Documento de trabajo Nº 12. Aspectos ambientales de la Provincia de Río Negro. Proyecto FAO UTF ARG 017. Desarrollo institucional para la inversión. 93 p.

GALEAZZI, J.O.; ARUANI, M.C. 2019. Manejo del riego en pera (*Pyrus communis*) cv. Williams cultivada en suelo con capa freática poco profunda. Chilean journal of agricultural & animal sciences, 35(2), 151-162.

GALEAZZI, J. O.; MAÑUECO, M.L.; MONTENEGRO, A.; STORTI, C.; SHERIDAN, M. 2018. Gestión Consorciada del Agua de Riego en el Alto Valle de Río Negro y Neuquén. I Jornadas Patagónicas de Acceso y Gestión del Agua en la Agricultura Familiar. 309-316. Plottier. Argentina.

GALEAZZI, J. O.; PESAN, P.; MUÑIZ, J.; SIGNORELLI, V.; QUIROGA, J.; 2007. Reconocimiento de la dinámica freática mediante monitoreo de un área piloto del Alto Valle del Río Negro. XXI Congreso Nacional del Agua (CONAGUA 2007). Tucumán. Argentina.

GALEAZZI, J. O.; MUÑIZ, J.; PESAN, P. 2005. Programa de monitoreo del sistema de riego y drenaje del área Puente la S. Informe Técnico. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Comahue. Cinco Saltos. Argentina.

GALEAZZI, J. O.; ALVAREZ, O.; DE BERNARDIN, F.; BERETTA, G. 2005. Frecuencia de medición de los niveles freáticos en el Alto Valle de Río Negro. XX Congreso Nacional del Agua (CONAGUA 2005). Mendoza. Argentina.

- GALEAZZI, J. O.; PESAN, P.; MUÑIZ, P. 2004. Informe Técnico - Programa de monitoreo del sistema de riego y drenaje del área de "Puente la S". Convenio ARSA – FaCA (UNCo).
- GALEAZZI, J. O.; MARTÍN, E.; STORTI, C.; MUÑIZ, J.; MELIDEO, C. 2003. Programa de monitoreo de los niveles freáticos a nivel de sección de turnado – área de Puente la S – Alto Valle de Río Negro (Arg.). Congreso Internacional de Riego y Drenaje. La Habana. Cuba.
- GALEAZZI, J. O.; ALVAREZ O. 1998. Determinación de áreas afectadas por niveles freáticos críticos en el Alto Valle de Río Negro. Congreso Latinoamericano y Argentino de Ingeniería Rural. La Plata. Argentina.
- GARCÍA, H. L.; MARIÑO, E.; VIVES, L. S. 2018. Modelación del flujo subterráneo de un sector del acuífero Toay - Santa Rosa - Anguil, La Pampa, Argentina. XIV Congreso Latinoamericano de Hidrogeología y X Congreso Argentino de Hidrogeología, Salta.
- GEBREYOHANNES, T.; DE SMEDT, F.; WALRAEVENS, K.; GEBRESILASSIE, S.; HUSSIEN, A.; HAGOS, M.; AMARE, K.; DECKERS, J.; GEBREHIWOT, K. 2017. Regional groundwater flow modeling of the Geba basin, northern Ethiopia. *Hydrogeology Journal*. (2017) 25:639–655. DOI 10.1007/s10040-016-1522-8.
- GODAGNONE, R. E.; BRAN, D. E. 2009. Inventario integrado de los recursos naturales de la Provincia de Río Negro. Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). 392 p.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L. I.; FERRER, M.; ORTUÑO, L.; OTEO, C. 2002. Ingeniería Geológica. PEARSON PRENTICE HILL. ISBN: 84-205-3104-9. 744 p. Madrid. España.
- GOMEZ BELTRÁN, G.; MORALES REYES, G. P.; MACEDO MIRANDA, G.; PAVÓN SILVA, T. B. 2013. Aplicación del modelo Visual Modflow para la evaluación de la hidrodinámica del acuífero subyacente a un vertedero de residuos sólidos urbanos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. vol. 29. núm. 3. 119-126 p. Universidad Nacional Autónoma de México. Distrito Federal. México.
- GUIÑAZU MICAMES, M. S. 2017. Estudio de caso sobre gestión comunitaria del agua de riego en parajes Lote G y el 15, Municipio Contralmirante Cordero, Río Negro, Argentina. Tesis de Maestría en Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.
- GRASSI, C. J. 1998. Fundamentos del riego (No. 631.587 G769f). Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. Mérida. Venezuela.
- HARBAUGH, A.W. 2005. MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular ground-water model -- the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16.
- HARBAUGH, A. W.; BANTA, E. R.; HILL, M. C.; MC DONALD, M. G. 2000. Modflow 2000, the U.S.G.S. Modular ground-water model. User guide to modularization concepts and the ground water flow process. USGS Open file report 00-92.
- HASPERT, F. 2018. Delimitación de la zona intermareal de cinco estuarios patagónicos mediante el uso de imágenes satelitales. 4to Encuentro de Investigadores en Formación

de Recursos Hídricos (IFRH). Instituto Nacional del AGUA (INA). ISBN 978-987-45194-9-8. Buenos Aires. Argentina.

HOOGEVEEN, J. (7/03/2021) Monitoring water use in agriculture through satellite remote sensing.

<https://www.globalcause.co.uk/water/monitoring-water-use-in-agriculture-through-satellite-remote-sensing>

HORNE, F.J.; ALVAREZ, O.; GALEAZZI, J.O.; POLLA, G.; STANGAFERRO, S. 1992. Análisis y elaboración de datos freáticos e hidroquímicos del Alto Valle de Río Negro. Informe técnico, convenio FCA-AyEE-ITAC; 47 p.

HISCOCK, K. M.; BENSE, F. V. 2014. Hydrogeology, Principles and Practice. 2da Edición. Editorial John Wiley & Sons. 544 p. ISBN: 978-0-470-65662-4.

LEANZA, H. A.; HUGO, C. A. 2001. Hoja Geológica 3966-II y III Villa Regina. Formación Chichinales en el río Negro al sur de Villa Regina. Provincia de Río Negro. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín No 309. 53p. ISSN 0328-2333.

LÓPEZ GETA, J.A.; FORNÉS AZCOITI, J. M.; RAMOS GONZÁLEZ, G.; VILLARROYA, GIL F. 2009. Las Aguas Subterráneas: un recurso natural del subsuelo. 4ta Edición. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. España.

LOSADA VILLASANTE, A. 2005. El riego II. Fundamentos de su hidrología y de su práctica. 261 p. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. España.

MAESTRI, M. L.; CASTETS, F.; BAYALA, M.; CANZIANI, G. 2019. Análisis comparativo de cinco métodos de procesamiento para calcular el área de lagunas pampeanas a partir de imágenes satelitales Landsat. Biología Acuática. n 33. ISSN 1668-4869.

MAÑUECO, M. L. 2020. Comportamiento de niveles freáticos y efecto de su variación estacional sobre el desarrollo y manejo agronómico de cerezos (*Prunus Avium* L.). 111 p. Tesis para optar por el título de Master en Riego y Drenaje. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo.

MARIZZA, M.; GALEAZZI J. O.; VIVES, L.; NITMAN, J. 2009. Modelación del flujo subterráneo en un área piloto del alto valle de Río Negro (Argentina). (E. y. Mariño, Ed.) Aportes de la Hidrogeología al Conocimiento de los Recursos Hídricos, Tomo II, p. 497-504.

MATTEODA, E. M.; BLARASIN, M.; VIVES, L.; CABRERA, A.; FELIZZIA, J. 2011. Modelación Numérica del flujo de agua subterránea del acuífero freático sedimentario de la cuenca del arroyo El Barreal, Córdoba. Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente. Nº 27. 25 – 34. Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería.

MC FEETERS, S. K. 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal Remote Sensing. Vol. 17. No.7. 1425-1432. DOI: 10.1080/01431169608948714.

MC DONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. 1988. A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. Techniques of Water Resources Investigations 06-A1. United States Geological Survey.

MENDIA, J.M.; IRISARRI, J. 1995. Las condiciones físicas del suelo asociadas al drenaje en el manejo del monte frutal. En: Curso internacional de Suelo, Riego y Nutrición. Estación Experimental. General Roca, Rio Negro, Argentina, p. 4-1 a 4-40.

MENDIA, J. M.; ROCA, J. C. 1994. Evaluación del comportamiento del nivel freático en el valle del Río Negro. Período 1993/1994 – Distrito de Villa Regina. 28 p. Secretaria de Gestión Ambiental. Autoridad Interjurisdiccional de las cuencas de los ríos Limay, Neuquén y Negro (AIC).

MOLINAS, P.; VIVES L. 2008. Análisis de la explotación del manantial de la Fonte da Pureza. Sistema acuífero Barreiras/Jandaíra en la cuenca del rio Maxaranguape, RN, Brasil". IX Congreso Latinoamericano de Hidrogeología (ALHSUD). Quito. Ecuador.

MONTENEGRO, A.; FERNANDEZ, E.; CICCIOLO, J. J.; VETTORI, O.; STARKLOFF, H. 2018. Cartografía colaborativa – Proceso de aprendizaje y comprensión del territorio del distrito de riego de Villa Regina. I Jornadas Patagónicas de Acceso y Gestión del Agua en la Agricultura Familiar. 331-336. Plottier. Argentina.

MONTENEGRO, A. 2014. Análisis de la incidencia de factores que intervienen en la sustentabilidad del agro sistema frutícola en "Colonia la Lucinda (Rio Negro)". Tesis de grado para la Licenciatura de Saneamiento y protección ambiental. Facultad de Ciencias del Ambiente y la Salud. Universidad Nacional del Comahue. 120 p. Neuquén. Argentina.

MORABITO, J.; SALANTINO, S.; HERNÁNDEZ, R.; GUTIÉRREZ, A. E. 2008. Los regadíos en los países de América Latina, perspectivas de modernización y control de los impactos ambientales. Jornadas sobre "Ambiente y Riegos: Modernización y Ambientalidad". La antigua. Guatemala.

OLAYA, V. 2014. Sistemas de Información Geográfica. España. 854 p [en línea]. <http://volaya.es/writing>.

ORDOÑEZ GÁLVEZ, J. J. 2011. Balance Hídrico Superficial. Cartilla Técnica: "Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico". Sociedad Geográfica de Lima. Foro Peruano para el Agua - GWP Perú. ISBN: 978-9972-602-75-7. Lima Perú.

ONU. (s.f.). Water and sanitation.

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation>

PALACIO, L. M. 2012. Actualización del Modelo Conceptual y Modelo Numérico de flujo de agua subterránea en el acuífero libre de General Pico – Dorila, Provincia de La Pampa, Argentina. Tesis para optar por el título Magíster en Recursos Hídricos. Universidad Nacional de La Pampa. Santa Rosa. Argentina.

PARUELO J.M.; DI BELLA C.M.; MILKOVIC M. 2014. Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica. Sus aplicaciones en Agronomía y Ciencias Ambientales. Ed. Hemisferio Sur. ISBN 978-950-504-618-8. Buenos Aires. Argentina.

PAVESE, J.; MAIOMONE, G.; CHANDIA, G. 2015. Implementación de un modelo numérico como herramienta de gestión ambiental en aguas subterráneas. XXVIII Jornadas Matemáticas de la Zona Sur. Termas de Chillán. Chile.

PAVESE, J.; CHANDIA, G.; POLLA, G.; HORNE, F.; STANGAFERRO, S. 2013. Simulación numérica del acuífero del Alto Valle del Río Negro. XXIV Congreso Nacional del Agua. San Juan. Argentina.

PIZARRO, F. 1985. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Editorial Agrícola Española S.A. Madrid. España. 542 p.

POLLA, G.; PAVESE, J.; ELISSALDE, M.; HORNE, F. 2013. Evaluación del comportamiento del acuífero del Alto Valle de Río Negro para control de heladas en un distrito de riego. VIII Congreso Argentino de Hidrogeología. UNLP. La Plata. Argentina.

REQUENA, A. 2013. Informe de avance – INTA-AUDEAS-CONADEV. Aportes para mejorar la Operación de Distritos de Riego. EEA Alto Valle. INTA. General Roca, Río Negro.

REQUENA, A.; MAÑUECO, M. L.; CASTILLO, E. 2012. Evapotranspiración y coeficientes de cultivo del manzano en su tercera temporada de crecimiento. Jornadas de Actualización en Riego y Fertilización. 6. 2012 11 07-09, 7, 8 y 9 de noviembre de 2012. Chacras de Coria, Mendoza, Argentina.

RODRIGUEZ, A. B.; MUÑOZ, A. R. 2005. Síntesis agrometeorológica para el período 1990-2004. EEA INTA Alto Valle. Boletín de divulgación técnica N° 53. INTA. Alto Valle del Río Negro. 38 pp.

RODRIGUEZ, L. B.; CELLO, P. A.; VIONNET, C. A.; GOODRICH, D. 2008. Fully conservative coupling of HEC-RAS with MODFLOW to simulate stream-aquifer interactions in a drainage basin. *Hidrogeology Journal*. 353. 129– 142. DOI:10.1016/j.jhydrol.2008.02.002.

RODRÍGUEZ, L.B.; CELLO, P.A; VIONNET, C.A. 2006. Modeling stream-aquifer interactions in a shallow aquifer, Choele Choel Island, Patagonia, Argentina. *Hydrogeology Journal* 14. 591–602. <https://doi.org/10.1007/s10040-005-0472-3>.

ROSSI, P. 2013. Agua subterránea en el Alto Valle de la Provincia de Río Negro. Departamento Provincial de Aguas, Provincia de Río Negro. 37 p [en línea]. <https://dpa.rionegro.gov.ar/?contID=30234>.

ROSSI, P. 2007. Informe Freatimétrico. Área de Estudio – Valle Irrigado del Alto Valle. Delegación Regional Valle Medio. Departamento Provincial de Aguas (DPA). Luis Beltrán. Argentina.

ROSSI, P. 2005. Informe Freatimétrico. Área de Influencia Consorcio de Riego y Drenaje Villa Regina, General Godoy y Chichinales. 10 p. Delegación Regional Valle Medio. Departamento Provincial de Aguas (DPA). Luis Beltrán. Argentina.

ROSSI, P. 2002. Estudio Hidrogeológico y análisis relación río-acuífero freático. Área de Influencia Consorcio de Riego y Drenaje Villa Regina, General Godoy y Chichinales. 11 p. Delegación Regional Valle Medio. Departamento Provincial de Aguas (DPA). Luis Beltrán. Argentina.

ROSSI, P. 2001. Informe Hidrogeológico y evaluación de las condiciones de drenaje en la zona de influencia "Consortio Villa Regina, General Godoy y Chichinales". 11 p. Delegación Regional Valle Medio. Departamento Provincial de Aguas (DPA). Luis Beltrán. Argentina.

SANCHEZ SAN ROMÁN, F. J. 2014. Conceptos Fundamentales de Hidrogeología. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca. [en línea]. España. 11p. <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/06/Conceptos-Fundamentales-de-Hidrogeolog%C3%ADa-.pdf>

SERVICIO NACIONAL DE SANIDAD Y CALIDAD AGROALIMENTARIA (SENASA). 2020. Anuario Estadístico 2019 - Centro Regional Patagonia Norte. [en línea]. Argentina. 154 p. [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/anuario_estadistico2017c.pdf]

SHIKLOMANOV, I. A. 1997. Assessment of Water Resources and Water Availability in the World. Background document to the Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World. United Nations. New York.

SOBRINO, J. A.; RAISSOUNI, N.; KERRY, Y.; OLIOSSO, A.; LÓPEZ GARCÍA, M. J.; BELAID, A.; EL KHARRAZ, M. H.; CUENCA, J.; DEMPERE, L. 2000. Teledetección. Sobrino J. A. (Editor). Servicio de Publicaciones. Universidad de Valencia. ISBN 84- 370- 4220-8). Valencia. España. 467p. 467.

SOPHOCLEOUS, M. 2002. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal* (2002) 10:52–67. DOI 10.1007/s10040-001-0170-8. Kansas. Estados Unidos.

SZABO, S.; GÁCSI, Z.; BALÁZS, B. 2016. Specific features of NDVI, NDWI and MNDWI as reflected in land cover categories. *Landscape & Environment* 10 (3-4). 194-202. DOI: 10.21120/LE/10/3-4/13

TANJI, K. K.; KIELEN, N. C. 2002. Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas. FAO. Irrigation and drainage paper 61. Roma. Italia. 205 pp.

URRAZA, M. S.; SHERIDAN, M. M.; MUÑIZ, J. A. 2013. El territorio en Campo Grande. Una aproximación a partir del análisis del uso y cobertura del suelo. Extensionistas en la Agencia de Extensión Rural Cipolletti. EEA Alto Valle. CR Patagonia Norte INTA. Allen. Argentina.

VARNI, M. R.; USUNOFF, E. J. 1999. Simulation of regional-scale groundwater flow in the Azul River basin, Buenos Aires Province, Argentina. *Hydrogeology Journal*. 7:180–187.

VIVES, L.; MOLINAS, P. 2008. Estudio de la disponibilidad hídrica de un futuro emplazamiento turístico e inmobiliario en la zona de Pitangui, RN, Brasil". IX Congreso Latinoamericano de Hidrogeología (ALHSUD). Quito. Ecuador.

VILLAREAL, P. 2018. Fruticultura de Pepita en la Norpatagonia. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Centro Regional Patagonia Norte. EEA Alto Valle. 4 p. [en línea]. https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_fruticultura-de-pepita-en-la-norpatagonia.pdf

VILLAROYA, F. 2009. Tema: Tipos de acuíferos y parámetros hidrogeológicos. Jornadas técnicas sobre aprovechamiento de aguas subterráneas para riego. Centro Nacional de

Tecnología de Regadíos (CENTER). Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Torrejón de Ardoz. Madrid. España.

VIVEK SINGH, K.; SETIA, R. SHASHIKANTA, S.; PRASADA, A.; PATERIYA, B. 2014. Evaluation of NDWI and MNDWI for assessment of waterlogging by integrating digital elevation model and groundwater level. Geocarto International. DOI: 10.1080/10106049.2014.965757

WATERLOO HYDROGEOLOGIC. 2011. Visual Modflow Flex Versión.2011.1 32 Bit. Division of Nova Metrix Ground Monitoring (Canada) Ltd. Trial Version

Xu, H. 2006. Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. Int. J. Remote Sens. (27): 3025-3033.

ANEXOS A

A.I DEFINICIONES HIDROGEOLÓGICAS BASICAS

A.I.I AGUA SUBTERRÁNEA

El término agua subterránea hace alusión al agua que se encuentra debajo de la capa freática en suelos y formaciones geológicas que están completamente saturadas, es decir, los poros están llenos de agua, pero al analizar y estudiar un acuífero son muchos los procesos por fuera de dicha dimensión que interaccionan.

A la concepción clásica de agua subterránea, debe incorporarse un enfoque sistémico que contemple otros procesos como, por ejemplo, el régimen de humedad del suelo, capilaridad, zona saturada y zona no saturada, es decir, conceptos que son fundamentales para comprender el ciclo hidrológico y el rol primordial de los recursos subterráneos (Allan Freeze *et al.*, 1979).

De la concepción del ciclo hidrológico descrita en el capítulo 1 se desprende la importancia de las aguas subterráneas en dicho proceso, vale la pena enfatizar la importancia cuantitativa en relación con los otros componentes del ciclo. Las estimaciones (Nace, 1971) consideran que el agua subterránea representa aproximadamente dos tercios de los recursos de agua dulce del mundo, si se limita la consideración a los recursos de agua dulce utilizables (menos las capas de hielo y los glaciares), el agua subterránea representa casi el volumen total (Allan Freeze *et al.*, 1979).

A.I.II AGUA EN EL SUELO

En el suelo y el subsuelo existen varias zonas donde el movimiento del agua tiene características propias y leyes particulares. Se pueden visualizar cuatro zonas (figura A.1): suelo, zona no saturada, zona capilar y zona saturada (González de Vallejo *et al.*; 2002).

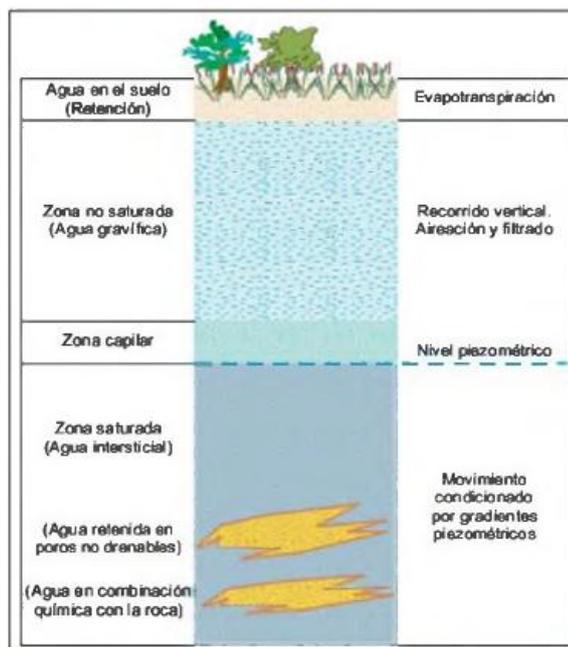


Figura A.1. Perfiles y movimiento de agua en el suelo y en el acuífero. Fuente: González de Vallejo *et al.*; 2002.

En la parte más superficial de las formaciones geológicas y en contacto con la atmósfera, se encuentra la zona húmeda caracterizada por su alta porosidad y abundancia de materia orgánica conocida como el suelo, en ella el movimiento del agua está caracterizado por los fenómenos de almacenamiento, evaporación y transpiración. Éste puede almacenar una cantidad o reserva de agua para las plantas que depende de su capacidad de campo (humedad máxima que se puede almacenar), punto de marchitez permanente (humedad mínima necesaria para que las plantas puedan vivir), profundidad radicular media y densidad aparente. Cuando llueve, dichas precipitaciones van llenando las reservas del suelo; si este se satura, el excedente o discurre por la superficie o drena por gravedad (infiltración), si no llueve, las plantas consumen el agua (evapotranspiración) hasta que lleguen nuevas reservas bien por lluvia o por riego (González de Vallejo *et al.*, 2002).

La zona no saturada abarca la parte posterior al suelo hasta llegar a la zona capilar. El agua se mueve por acción de la gravedad y el contenido de humedad es variable, dicho movimiento es vertical descendente. La zona de transición entre la no saturada y la saturada (poros llenos de agua) se llama zona capilar y se sitúa inmediatamente por encima de la zona saturada, el agua freática asciende por sobre esta por el fenómeno de capilaridad y se llama agua capilar (estado casi saturado) (González de Vallejo *et al.*, 2002; Pizarro, 1985).

Por último, en la zona saturada y más profunda, todos los poros están ocupados por agua; se llama agua freática y su límite superior se llama capa o superficie freática. Si las entradas superan a las salidas, el agua en exceso se infiltra a más profundidad que la zona no saturada. En estas condiciones si continúa entrando agua, la zona saturada se va elevando, aproximándose a la superficie (Pizarro, 1985). El nivel de la capa freática está sometido a fluctuaciones debido a la variación de los factores de recarga y descarga, en las épocas de lluvia y riego se eleva y en la época seca desciende debido a la evapotranspiración (González de Vallejo *et al.*, 2002).

A.I.II.b.1 Isopiezas. Mapas Piezométricos y Freáticos. Gradiente Hidráulico.

La superficie piezométrica es el lugar geométrico de los puntos de igual nivel piezométrico dentro de una formación, es decir, la energía contenida en las partículas de agua dada la presión de alojamiento. En cambio, la superficie freática es el lugar geométrico de los puntos de un acuífero en que la altura de presión es nula y es coincidente con la superficie del agua en los acuíferos libres. Bajo condiciones de no existencia de flujos verticales en estos, la superficie piezométrica y freática son términos coincidentes, en los acuíferos confinados las superficies piezométricas son más elevadas que el techo de la formación acuífera (González de Vallejo *et al.*, 2002).

El nivel piezométrico se obtiene en cualquier tipo de acuífero, generalmente, por medidas directas sobre puntos en el terreno y se define la superficie piezométrica con el trazado de líneas de igual potencial. Estas curvas, denominadas **isopiezas**, son perpendiculares a los bordes impermeables del acuífero y paralelas a las líneas de recarga y/o descarga, las líneas de flujo en cada punto son perpendiculares a dichas curvas. En los mapas de superficies piezométricas se suele representar la dirección del flujo con flechas, que se orientan de mayor a menor piezometría (González de Vallejo *et al.*, 2002).



Figura A.2. Isopiezas y líneas de flujo. Fuente: González de Vallejo et al., 2002.

En la Figura A.2 se observan los flujos del agua en un acuífero y como las isopiezas representan dicho movimiento, por ejemplo en la “zona de influencia” se dice que el río es efluente, es decir, que drena al acuífero y en la “zona de efluencia” se dice que el río es influente, es decir, que ingresa agua desde el acuífero (González de Vallejo *et al.*, 2002). Los llamados “ojos de buey”, según su forma pueden ser zonas de recarga o descarga como se observa en la Figura 11.

La obtención de los mapas de Isopiezas son fundamentales en el estudio de cualquier sistema hidrológico; estos datos permiten estudiar y analizar el movimiento del agua subterránea, así como diversos problemas de drenaje en los territorios; y comprender posibles fuentes de recarga o descarga que influyen en el comportamiento del sistema como un todo.

El agua subterránea se desplaza desde los niveles energéticos más altos a los más bajos, por lo que la energía procede esencialmente de las diferencias de presión y nivel. Simplificando dicho concepto, el **gradiente hidráulico** es la pendiente que obliga al agua a circular a través de un medio poroso. La altura del agua que influye en el gradiente es ni más ni menos que el nivel piezométrico o potencial hidráulico, y determinará la dirección y el movimiento del fluido a través de la formación geológica. Es decir, que es la energía que tiene el agua en virtud de su altura, presión y movimiento y que le permite desplazarse dentro de un acuífero hacia las posiciones de menor energía (Custodio *et al.*, 1983).

A.I.II.b.2 Acuífero

Allan Freeze *et al.* (1979) definen a un acuífero como una unidad geológica permeable saturada que puede transmitir cantidades significativas de agua bajo distintos gradientes hidráulicos.

Cuando una formación geológica transmite el agua muy lentamente y es difícil de extraerla recibe el nombre de acuitardo, sin embargo, puede intercambiar importantes cantidades de agua con aquellos acuíferos con los que están en contacto horizontal ya

que la superficie de contacto es grande. Aquellas formaciones que contienen agua y no la transmiten son acuicluidos, y acuífugos si son totalmente impermeables y no contienen agua.

Según la presión hidrostática del agua contenida en un acuífero, estos pueden clasificarse en:

- **Acuíferos libres, no confinados o freáticos.** El límite superior de la masa de agua forma una superficie real que está en contacto con el aire de la zona no saturada, y por lo tanto está a presión atmosférica. Si se perfora un pozo en dicho acuífero desde la superficie del terreno, el agua aparece en el pozo cuando se corta o alcanza el Nivel Freático (NF) y se mantiene a esa profundidad. La recarga de éstos se da principalmente por infiltración de la precipitación y /o riego a través del suelo o por interacción con un río o lago.
- **Acuíferos confinados, cautivos o a presión.** En su límite superior el agua está a mayor presión que la atmosférica, se comportan así los materiales permeables que están cubiertos por una capa confinante mucho menos permeable. El agua que se encuentra alojada está a una gran presión; si se realiza un pozo, el agua ascenderá hasta llegar a su nivel piezométrico.
- **Acuíferos semiconfinados o semicautivos.** Se pueden considerar como un caso particular de acuíferos cautivos, en el que sus límites tanto superior e inferior no son totalmente impermeables y permiten una circulación vertical del agua.



Figura A.3. Tipos de acuíferos y niveles hidrostáticos. Fuente: López Geta *et al.*; 2009.

A.I.III LEY DE DARCY

Henry Darcy en 1856 formuló empíricamente la ley fundamental que rige el movimiento del agua subterránea en flujo saturado utilizando el aparato experimental que se muestra en la figura A.5.

Consistía en un cilindro circular de sección transversal “A” lleno de arena, tapado en cada extremo y equipado con tubos de entrada y salida y un par de manómetros. Se introdujo agua en el cilindro y se le permitió fluir a través de él hasta que todos los poros se llenen de agua y la velocidad de entrada “Q” sea igual a la velocidad de salida (Hiscock *et al.*; 2014).

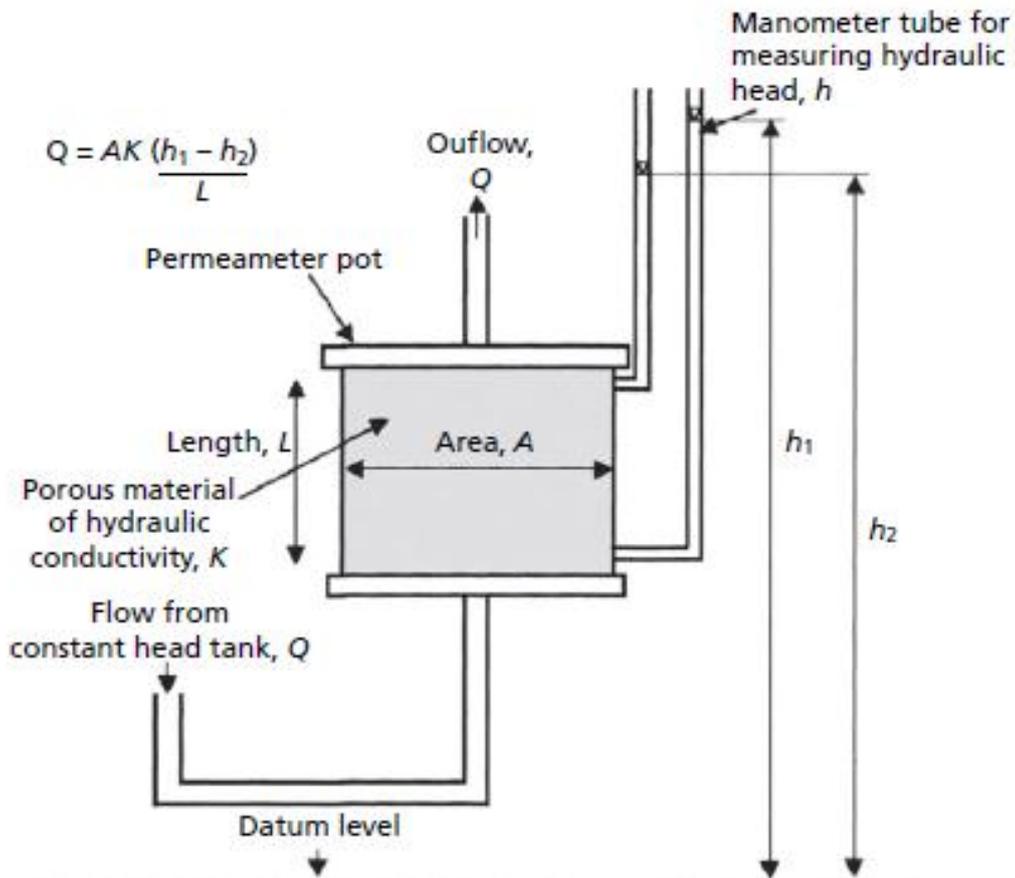


Figura A.5. Aparato experimental para determinar la K de un material poroso con la Ley De Darcy. Fuente: Hiscock *et al.*; 2014.

En dicho experimento, Darcy estudió el flujo de agua a través del material poroso y descubrió que el flujo total (Q), es proporcional tanto a la diferencia en el nivel de agua ($h_1 - h_2$) medida en los tubos de manómetro en cada extremo de la columna, como en la sección transversal área de flujo (A), e inversamente proporcional a la longitud de la columna (L). Cuando combinó con la constante de proporcionalidad (K) Darcy obtuvo:

$$Q = -K.A.\frac{h_1 - h_2}{L} \quad (A)$$

En términos generales es mundialmente conocida como:

$$Q = -K.A.\frac{dh}{dl} \quad (A.1)$$

Donde Q es el flujo del agua subterránea en m^3/s ; A es el área en m^2 , dh/dl es el gradiente hidráulico y K es la conductividad hidráulica en m/s .

El signo negativo indica que el flujo se da en dirección de gradientes hidráulicos mayores a menores. Si dh/dl se escribe como i , la ecuación queda como:

$$Q = -K.A.i \quad (A.2)$$

A.I.III.a Análisis del Movimiento del agua en el suelo

El movimiento del agua en un medio poroso se explica y expresa matemáticamente utilizando la Ley de Darcy y el principio de conservación de la masa. Como resultado, en cualquier sistema hidrogeológico se determina que las entradas son iguales a las salidas, más/menos las variaciones de la masa de agua existentes en el almacenamiento.

$$\Delta M = +/ - \left(\frac{\delta(\rho u)}{\delta X} \right) + \left(\frac{\delta(\rho v)}{\delta Y} \right) + \left(\frac{\delta(\rho w)}{\delta Z} \right) \quad (\text{A.3})$$

Donde δ es la densidad del agua; u , v y w son las velocidades del flujo según los ejes y ΔM es la variación de la masa de agua en la unidad de tiempo.

Teniendo en cuenta que $\Phi = K.h$, los vectores velocidad se describen como:

$$u = \frac{\delta\Phi}{\delta x} \quad ; \quad v = \frac{\delta\Phi}{\delta y} \quad ; \quad w = \frac{\delta\Phi}{\delta z} \quad (\text{A.4})$$

Y sustituyendo (A.4) en (A.3) en función al potencial hidráulico y para un intervalo de tiempo determinado:

$$\frac{\delta^2 h}{\delta X^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta Y^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta Z^2} = \frac{S}{T} \frac{\delta h}{\delta t} \quad (\text{A.5})$$

Dicha ecuación, es la expresión más conocida de la ecuación de continuidad y expresa el principio de conservación de la energía en régimen transitorio y con flujo tridimensional, **S** es el coeficiente de almacenamiento y **T** es la transmisividad.

Para régimen permanente o estado estacionario, el tiempo se anula, por lo que la ecuación queda;

$$\frac{\delta^2 h}{\delta X^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta Y^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta Z^2} = 0 \quad (\text{A.6})$$

En estado estacionario, las condiciones, la magnitud y la dirección de la velocidad del flujo en cualquier punto son constantes con el tiempo. Para condiciones transitorias, la magnitud o la dirección de la velocidad del flujo en cualquier punto pueden cambiar (Custodio *et al.*, 1983).

A.I.IV PARAMETROS HIDRAULICOS

A.I.IV.a Conductividad Hidráulica. Transmisividad

La **permeabilidad** es la facilidad de un cuerpo a ser atravesado por un fluido, en el caso de la hidrogeología, el fluido es el agua. Dicha cualidad también es llamada **conductividad hidráulica** (**K**) o **coeficiente de permeabilidad**, la cual depende del medio poroso y de las propiedades del fluido que atraviesa dicho medio, de forma tal que (Custodio *et al.*, 1983).;

$$K = k \cdot \frac{\gamma}{\mu} \quad (\text{A.7})$$

Donde; γ (N/m³) es el peso específico del fluido ($\gamma = \rho g$, donde ρ (kg/m³) es la densidad del fluido y g (m/s²) es el aceleración gravitacional) μ (Pa.s) es la viscosidad del fluido, y k (m²) es la permeabilidad intrínseca del material poroso que engloba las características de la roca;

$$k = C d^2 \tag{A.8}$$

Donde **C** es el factor de forma (coeficiente que depende de la roca-estratificación, empaquetamiento, textura, porosidad y estructura sedimentaria), y es adimensional.

La **permeabilidad** tiene dimensiones de velocidad (m/s) pero no es un parámetro que indique realmente la velocidad de circulación del agua subterránea, dicho parámetro puede variar según la dirección que tome el agua. La permeabilidad vertical, que es necesario tener en cuenta si el flujo es vertical (ascendente o descendente), es dos o tres órdenes de magnitud inferior a la horizontal, a este cambio del valor de la permeabilidad según la dirección que lleve el agua se denomina anisotropía (Custodio *et al.*, 1983).

Los valores de **conductividad hidráulica** muestran un amplio rango en la naturaleza, que abarca 11 órdenes de magnitud como se observa en la tabla A.1, en general, los materiales de grano grueso y fracturado tienen valores elevados, en cambio los limos y las arcillas de grano fino tienen valores bajos (Custodio *et al.*, 1983).

Tabla A.1. Valores de permeabilidad o conductividad hidráulica. Fuente: Custodio *et al.*, 1983.

		PERMEABILIDAD EN (m/día)										
		10 ⁴	10 ³	10 ²	10	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶
CLASIFICACIÓN GEOLÓGICA		GRAVAS LIMPIAS	GRAVAS Y ARENAS, O ARENAS GRUESAS		ARENAS FINAS O CON MEZCLA DE LIMOS		LIMOS O ARCILLAS ARENOSAS		ARCILLAS COMPACTAS			
CLASIFICACIÓN HIDROGEOLÓGICA		BUEN ACUÍFERO			ACUÍFERO POBRE		ACUITARDO		PRÁCTICAMENTE IMPERMEABLE			

La **transmisividad** es un parámetro hidráulico que indica la facilidad del agua para circular horizontalmente por una formación geológica y es una combinación de la conductividad hidráulica y del espesor;

$$T = K \cdot b \tag{A.9}$$

Donde **T** es la transmisividad en m²/s; **K** es la conductividad hidráulica en m/s y **b** es el espesor del acuífero en m.

En acuíferos libres la transmisividad es variable, ya que su espesor saturado varía con las oscilaciones freáticas, por ejemplo, en zonas de regadío. En acuíferos confinados el espesor es constante por consecuencia la transmisividad también lo es (Custodio *et al.*, 1983).

En la Tabla A.2 se exponen algunos valores de transmisividad de diversos acuíferos confinados relacionados a la capacidad de explotación del agua.

Tabla A.2. Acuíferos confinados y Transmisividad. Fuente: Villarroya, 2009.

T (m²/día)	Calificación	Posibilidades del acuífero
T < 10	Muy Baja	Menos de 1 l/s con 10 m de depresión
10 < T < 100	Baja	Entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión
100 < T < 500	Media a Alta	Entre 10 y 50 l/s con 10 m de depresión
500 < T < 1000	Alta	Entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión
T < 1000	Muy Alta	Más de 100 l/s con 10 m de depresión

A.I.IV.b Coeficiente de Almacenamiento y Porosidad.

Se define al **coeficiente de almacenamiento (S)** como el volumen de agua desplazado por una columna del acuífero de superficie unitaria, cuando la superficie desciende un valor unitario. Cuando la carga hidráulica de un acuífero disminuye, su estructura granular se comprime y se reduce la porosidad, por lo que libera agua. De la misma forma, el volumen de agua liberado será el resultado de la expansión del agua en los poros. Por lo tanto, el **S** dependerá físicamente de la compresibilidad de la estructura granular del acuífero y la del agua en los poros (Sánchez San Román; 2014). La expresión es la siguiente;

$$S = e \cdot \rho \cdot g (\alpha + \Phi \cdot \beta) \quad (A.10)$$

Donde **S** es el coeficiente de almacenamiento (adimensional); **e** es el espesor del acuífero (m); **ρ** es la densidad del agua (kg/m³); **g** es la gravedad (m/s²); **α** es la compresibilidad vertical; **Φ** es la porosidad total y **β** es la compresibilidad del agua.

En un acuífero libre **S** es equivalente a **Sy** y puede oscilar entre el 2% para materiales arcillosos hasta un 34-35% para gravas, el mismo concepto aplicado a un acuífero confinado implica el descenso en un valor unitario de la presión hidrostática en la columna del prisma acuífero considerado (figura A.6). Los valores promedio de **S** para acuíferos libres oscilan entre 0.3 a 0.02 y para acuíferos confinados, donde predomina el espesor sobre el coeficiente de almacenamiento varían entre 0.001 hasta 0.00001 (Sanchez San Román, 2014).

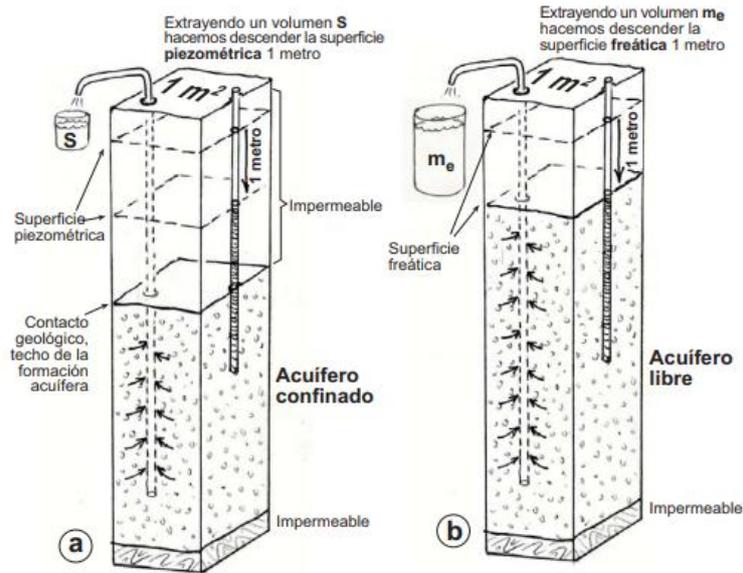


Figura A.6. Conceptualización del coeficiente de almacenamiento en los distintos acuíferos. Fuente: Sánchez San Román, 2014.

El medio poroso por el que circula el agua tiene una matriz sólida o esqueleto, constituida por un agregado de granos minerales sólidos, separados y rodeados de huecos, poros o intersticios, los cuales pueden estar llenos de agua, gases o de materia orgánica. La porosidad total ϕ hace referencia a dichos espacios vacíos, y se calcula como:

$$\phi = \frac{V_v}{V_t} \quad (\text{A.12})$$

Donde ϕ es la porosidad total y es adimensional, V_v es el volumen de huecos y V_t es el volumen total del suelo. El valor se expresa en porcentaje o en tanto por uno.

Si la porosidad se originó cuando se formó el material, se habla de **porosidad primaria** como pasa en las arenas, en cambio se habla de **porosidad secundaria** cuando la porosidad se adquiere luego de procesos de alteración en una roca.

La porosidad de una formación geológica depende de la forma, disposición y tamaño de sus partículas, de la cementación y compactación a la cual ha sido sometido desde su deposición, de la desaparición de mineral debido a la circulación del agua y de la fracturación de la roca, en la figura A.7 se esquematizan distintas matrices porosas en relación a su textura (Sánchez San Román, 2014).

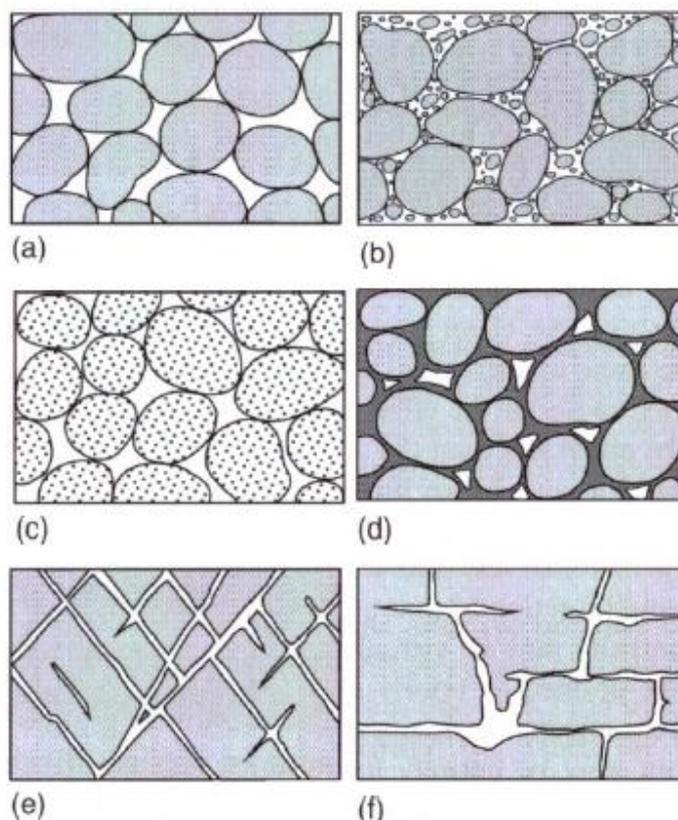


Figura A.7. Diferentes tipos de porosidad con relación a la textura de la roca: (a) depósito sedimentario bien ordenado (alta porosidad); (b) depósito sedimentario pobremente ordenado (baja porosidad); (c) depósito sedimentario bien ordenado cuyas partículas son porosas (muy alta porosidad); (d) depósito sedimentario bien ordenado con materia depositada en los intersticios (cementación) que disminuye la porosidad; (e) roca fracturada.; (f) roca con porosidad por disolución. (Adaptado de Meinzer 1923.)

En cualquier medio poroso existen poros intergranulares que pueden o no estar conectados entre sí, los que no están conectados entre sí influyen e interceptan el flujo del agua subterránea, por consiguiente, frente a dicha cualidad es que los hidrogeólogos hablan de la porosidad eficaz, que es aquella parte de los huecos que contiene agua y se puede drenar por gravedad, definida por;

(5)

$$\Phi_e = \frac{V_{vi}}{V_t}$$

Donde; Φ_e es la porosidad eficaz (adimensional); V_{vi} es el volumen de poros interconectados y V_t es el volumen total de poros.

Esta propiedad es importante desde el punto de vista de la explotación del recurso hídrico subterráneo y generalmente es una fracción más pequeña que la porosidad total. El **rendimiento específico (Sy)** se define como la relación entre el volumen de agua que drena a partir de una roca saturada debido a la acción de la gravedad y el volumen total de la roca considerada. La **retención específica (Sr)** se define como la relación entre el volumen de agua que una roca retiene contra la fuerza de gravedad y el volumen total de la roca considerada (Cassiraga, 2013).

La porosidad es la suma del rendimiento específico y de la retención específica, esto es,

$$\Phi = S_y + S_r \quad (6)$$

A pesar de que la porosidad eficaz y el rendimiento específico no son sinónimos, desde un punto de vista práctico, sus valores suelen considerarse similares. Como se observa en la figura 11, la retención específica se incrementa cuando decrece el tamaño de grano del suelo, por ejemplo, una arcilla puede tener una ϕ del 50% con una S_r del 48% (Cassiraga; 2013).

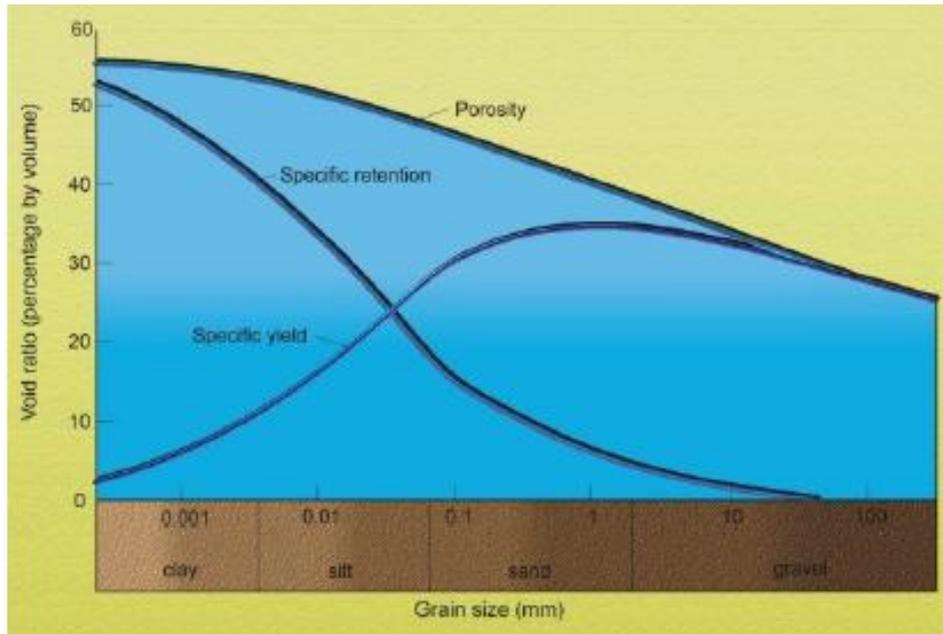


Figura A.8. Porosidad y Rendimiento Específico en función a la textura del suelo. Fuente: Cassiraga; 2013.

Algunos rangos de valores de dichos parámetros se observan en la Tabla 4.

Tabla A.3. Porosidad y Rendimiento Específico de diversas formaciones geológicas. Fuente: Cassiraga; 2013.

Sedimento/Roca	Porosidad (%)	Porosidad eficaz (%) o rendimiento específico (%)
Arcilla	40-60	0- 5
Limo	35-50	3-19
Arena		
Fina o limosa	20-50	10-28
Gruesa o bien ordenada	20-50	20-35
Grava	25-40	13-26
Esquisto		
Intacto	1-10	0.5-5
Fracturado	30-50	
Arenisca	5-35	0.5-10
Caliza y dolomita		
No karstificada	0.1-25	0.1-5
Karstificada	5-50	5-40
Creta	5-45	0.05-0.5
Anidrita	0.5-5	0.05-0.5
Sal	0.1-0.5	0.1
Basalto	1-50	
Metamórficas e ígneas		
No fracturadas	0.01-1	0.0005
Fracturadas	1-10	0.00005-0.01

A.II MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Un modelo es una entidad que reproduce algún aspecto del funcionamiento de un sistema real, los modelos matemáticos a través del uso de una o varias ecuaciones simulan un fenómeno de interés; dichas ecuaciones describen los procesos físicos que ocurren en el sistema (Cassiraga, 2013).

En hidrología e hidráulica se usaban modelos físicos, pero actualmente estos fueron desplazados por los modelos matemáticos, que son muy versátiles y pueden fácilmente cambiar los valores de las variables o parámetros, su dificultad en el uso radica que generalmente es necesario hacer simplificaciones del fenómeno físico real para lograr una óptima representación matemática (Fatorrelli *et al.*, 2011).

Algunos conceptos que se usan con frecuencia en dichos modelos son: **Parámetro**, que es el valor que caracteriza a un sistema, por ejemplo, en el área de un acuífero sus parámetros hidrogeológicos como altitud media, perímetro, etc. **Variable**, que es el valor que se relaciona a una condición eventual del sistema y que varía en el espacio y el tiempo, por ejemplo, la recarga por riego en un acuífero. **Fenómeno**, que es el proceso físico o evento que produce la alteración en el estado de un sistema; por ejemplo, la precipitación, la evapotranspiración, la percolación son fenómenos del ciclo hidrológico que producen un cambio de estado de un sistema; en un acuífero el nivel freático puede ascender debido a una elevada recarga. **Datos** que es la información que sirve para el modelo, como lluvia, caudal, cota, altura del pelo de agua de un río, entre otros. La **Calibración** es la comparación entre los valores calculados por el modelo y los medidos en el sistema real, por ejemplo, el uso de datos freáticos para tal fin (Fatorrelli *et al.*, 2011).

Los modelos matemáticos recurren al uso de software y hardware para sus resoluciones, y pueden clasificarse en **analíticos**, es decir, que dan la solución exacta de las ecuaciones diferenciales y resuelven problemas sencillos; y los **numéricos** que recurren a una serie de aproximaciones numéricas para resolver las ecuaciones diferenciales, como diferencias finitas y elementos finitos. Al utilizar un modelo, debe implementarse un código (puede ser libre o no), el cual contiene todas las ecuaciones y rutinas y subrutinas que dicho modelo correrá para realizar y resolver la modelación y/o simulación que el usuario planteará (Cassariaga, 2013).

A.II.I Visual Modflow

Modflow es un modelo matemático de flujo de aguas subterráneas, fue desarrollado por Michael McDonald y Arlen Harbaugh para el Servicio Geológico de los EEUU (USGS) en el año 1984; teniendo sucesivas modificaciones por dichos autores como el 88, 96, 2000 y 2005, las cuales cuentan con diversas actualizaciones y mejoras que potencian aún más sus capacidades.

Es una representación virtual del medio físico en un ordenador, que, mediante operaciones adecuadas, calcula la evolución de los niveles y el flujo hídrico producido en condiciones específicas, pudiendo simular pozos de bombeo, inyecciones, recarga distribuida en superficie, evapotranspiración, flujo hacia drenes y flujo a través del lecho de los ríos, la simulación se realiza en tres dimensiones en una cuenca hidrogeológica (Polla *et al.*, 2013).

El flujo de agua de densidad constante en tres dimensiones en un medio poroso saturado, heterogéneo y anisótropo que cumple con la ley de Darcy, puede ser descrito por la siguiente Ecuación;

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} * \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} * \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} * \frac{\partial h}{\partial z} \right) - w = S_s * \frac{\partial h}{\partial t} \quad (9)$$

donde, **x, y, z** son las coordenadas cartesianas alineadas a lo largo de las direcciones principales del tensor de conductividad hidráulica, **K_{ij}**; **h** es el potencial hidráulico por unidad de peso ($z+p/\gamma+v^2/2g$) expresado en metros; **w** es el término de fuente, es decir, volumen de agua por unidad de tiempo inyectado/extraído por unidad de volumen del acuífero en el punto(x,y,z); **S_s** es el coeficiente de almacenamiento específico del medio: y **t** es el tiempo.

Dicha ecuación, en conjunto con determinadas condiciones iniciales y de contorno, constituyen el modelo matemático de flujo de agua subterránea, la solución analítica es una función **h(x,y,z;t)** cuyas derivadas satisfacen la ecuación anterior y verifican las condiciones iniciales y de contorno. Una vez que se conoce **h**, se puede obtener información como: velocidades de flujo, variación de almacenamiento, caudales, balances hídricos, entre otros (Mc Donald *et al.*, 1984).

Como no hay solución analítica a dicha ecuación, Modflow utiliza el método numérico de diferencias finitas, donde se sustituye el sistema continuo por un conjunto finito y discreto de puntos en el espacio y tiempo, y sustituye las derivadas parciales por diferencias de valores de la función **h** en distintos puntos. Su solución da como resultado el valor de la altura freática en los puntos especificados, lo que constituye una aproximación a la distribución continua que daría una solución analítica de la ecuación diferencial (Mc Donald *et al.*, 1988).

ANEXO B

B DEFINICIONES BASICAS DE TELEDETECCIÓN Y SIG

B.I SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas para el manejo general de información geográfica, fundamentales para trabajar hoy en día con todo tipo de información georreferenciada. Un SIG es un sistema compuesto por cinco componentes: Hardware, Software, datos, procesos y el recurso humano, cada uno cumple un rol fundamental, el cual se caracteriza por su naturaleza integradora (figura B.1). La efectividad en la resolución de problemas es destacable en los SIG, al servir como soporte en la toma de decisiones y ayudar a la planificación (Olaya, 2014).

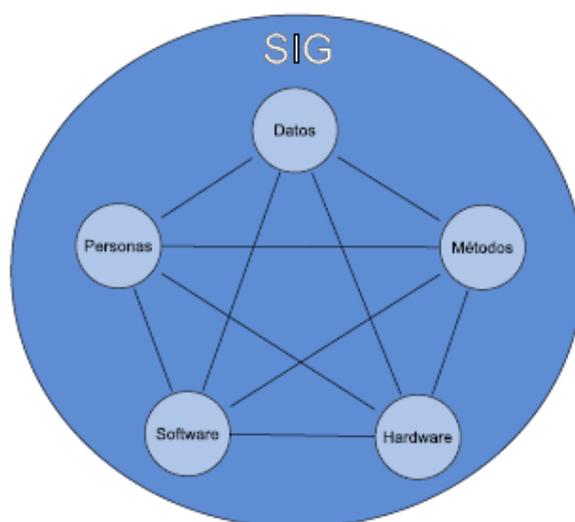


Figura B.1. Componentes de un SIG. Fuente: Olaya V.; 2014.

La gestión de la información espacial es uno de los puntos más importantes por el cual se decide utilizar un SIG, estos permiten separar la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, y facilitando al usuario la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología de los objetos, con el fin de generar otra nueva capa de información que de otra forma no se obtendría (Olaya, 2014).

En la actualidad estas herramientas y tecnologías son utilizadas para alcanzar diversos objetivos, dado el gran potencial que poseen para estudiar fenómenos en la superficie terrestre, es que son ampliamente utilizados en diversos ámbitos como en el drenaje de tierras agrícolas, hidrología, hidrogeología, minería, entre otros.

B.I.a QuantumGIS (QGIS)

El SIG seleccionado para realizar la presente investigación fue el QGIS, es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de Código Abierto licenciado bajo GNU - General Public License. QGIS es un proyecto oficial de Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Soporta numerosos formatos y funcionalidades de datos vectorizados, datos ráster y bases de datos. El proyecto de la elaboración del software y la incorporación de diversos complementos que aumentan su potencialidad se debe a una comunidad global

voluntaria, siendo los mismos usuarios en todo el mundo que aportan al desarrollo del programa, realizando contribuciones de código, corrección y reporte de errores, aportes de documentación, apoyo y soporte a otros usuarios (<https://www.qgis.org/es/site/about/index.html>).

B.II TELEDETECCIÓN

El objeto de estudio de la teledetección es la observación de la superficie terrestre a través de sensores aéreos y espaciales, analizando la interacción energética entre el suelo y dicho sensor. Se engloban los procesos de obtención, tratamiento y posterior interpretación (Chuvienco, 2008).

Desde el punto de vista físico, la teledetección parte del principio de la existencia de una perturbación (la energía electromagnética) que el sistema observado produce en el medio. La energía se transmite a un receptor que capta la señal registrada, la almacena e interpreta. En la práctica, el objetivo es el reconocimiento de las características de la superficie terrestre y los fenómenos que se producen registrados por un sensor (Sobrinó *et al.*, 2000). El principal reto en dicho campo de investigación es la transformación de los datos registrados; en magnitudes físicas y luego en información útil para el usuario.

Equipos multidisciplinares trabajan en el campo de la teledetección, los físicos estudian los principios de la radiación, su interacción con la superficie terrestre y el desarrollo de modelos de corrección de las distintas perturbaciones a la señal registrada. Los ingenieros se dedican al diseño instrumental de sensores y plataformas. Los matemáticos y estadísticos se encargan del tratamiento numérico de los datos, los informáticos en el desarrollo e implementación de software. Expertos en ciencias de la tierra, cartógrafos, geógrafos, geólogos, biólogos, hidrólogos, entre otros interpretan la información actualizada sobre el territorio (Sobrinó *et al.*, 2000).

El objetivo es obtener productos derivados accesibles a los usuarios (no necesariamente expertos en teledetección), acercando la información a los tomadores de decisiones como, por ejemplo, a responsables de la gestión ambiental (Sobrinó *et al.*, 2000).

B.II.a. Espectro Electromagnético

La percepción remota estudia la interacción de las ondas electromagnéticas con distintas superficies, estas se distribuyen a lo largo de un espectro que las caracteriza según su longitud de onda y frecuencia. El Espectro Electromagnético (EM) (ver Figura B.2) describe la distribución energética de las ondas electromagnéticas.

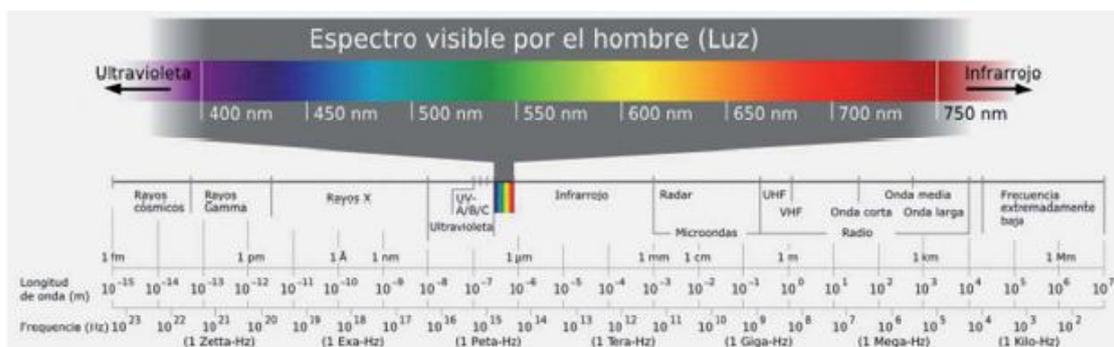


Figura B.2. Espectro Electromagnético. Fuente: Paruelo, 2014.

Si nos referimos específicamente a un objeto, sustancia o superficie, el EM es la radiación emitida (espectro de emisión) o absorbida (espectro de absorción). Es decir, que un espectro de absorción o emisión representa la cantidad de energía en función de la longitud de onda (λ) asociada a esa radiación (Paruelo, 2014). A menores longitudes de onda y mayores frecuencias más cantidad de energía contiene la radiación; y a mayores longitudes de onda y por lo tanto menores frecuencias disminuye la cantidad de energía presente.

Todos los cuerpos reflejan o emiten radiación, la variación de la energía reflejada o emitida en función de la λ constituye lo que se conoce como “firma espectral”, cada superficie tiene su curva característica (Sobrino *et al.*, 2000). La figura B.3 muestra la firma espectral teórica de distintas superficies.

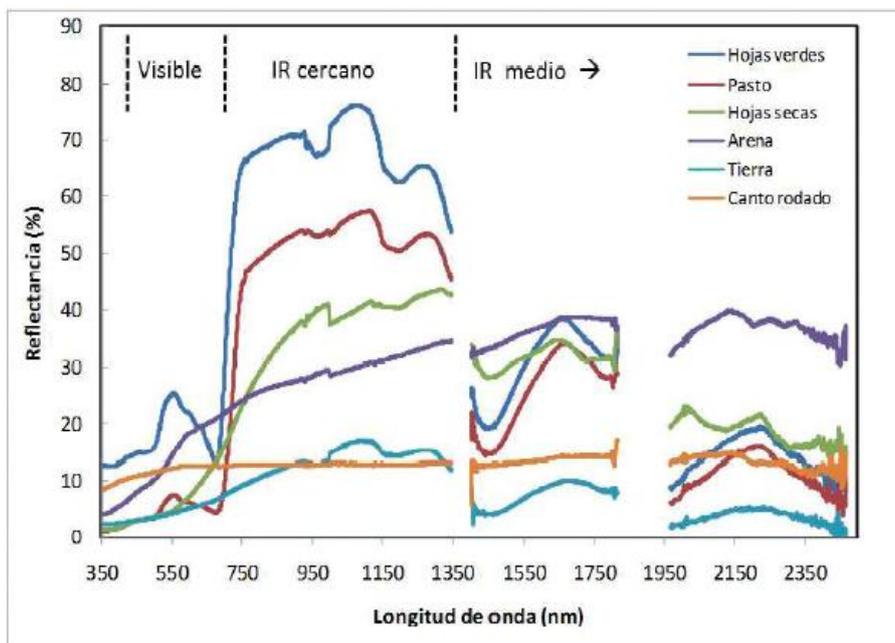


Figura B.3. Firmas Espectrales teóricas de distintas coberturas. Fuente: Paruelo, 2014.

B.II.b. Índices Espectrales de cuerpos de agua

En relación al estudio de las firmas espectrales de distintas superficies, es que la comunidad científica ha desarrollado una gran variedad de índices espectrales, estos son combinaciones de bandas de una misma imagen con el objetivo de resaltar determinadas superficies teniendo en cuenta la respuesta de la misma.

Los índices en general están condicionados a cambios en los estados fisiológicos de las coberturas vegetales, cambios en el estatus hídrico de estas, contenido de agua libre en el suelo, suelo desnudo, entre otros. Estas variaciones pueden ser utilizadas en estudios espacio-temporales del comportamiento de diferentes coberturas.

McFeeters (1996) propuso el índice de diferencia de agua normalizada (NDWI) para lograr diferenciar el agua del resto de las coberturas, utilizando la siguiente combinación de bandas:

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$$

(B.1)

Está diseñado para:

- maximizar la reflectancia del agua mediante el uso de longitudes de onda verdes
- minimizar la baja reflectancia de NIR por las características del agua
- aprovechar la alta reflectancia del NIR por la vegetación y las características del suelo.

Como resultado, las características del agua tienen valores positivos, mientras que la vegetación y el suelo generalmente tienen valores cero o negativos y, por lo tanto, se diferencian (McFeeters, 1996).

No obstante, en imágenes donde los cuerpos de agua están próximos a edificaciones, el NDWI no logra su objetivo, la información del agua extraída en esas regiones suele mezclarse con el ruido que introducen las edificaciones, es decir, que muchas características del terreno urbanizado también tienen valores positivos en la imagen NDWI.

Xu (2006) propone analizar las firmas espectrales; la figura B.4 muestra los patrones de reflectancia espectral de tres tipos de cobertura: agua, vegetación y tierra (suelo edificado). El patrón de reflectancia de la tierra en la banda verde (TM 2) y la banda NIR (TM 4) es similar al del agua, es decir, ambos reflejan la luz verde más de lo que reflejan la luz infrarroja cercana. Como resultado, el cálculo del NDWI también produce un valor positivo tanto para la tierra edificada como para el agua, dificultando así la diferenciación de ambas coberturas en una misma imagen utilizando el NDWI.

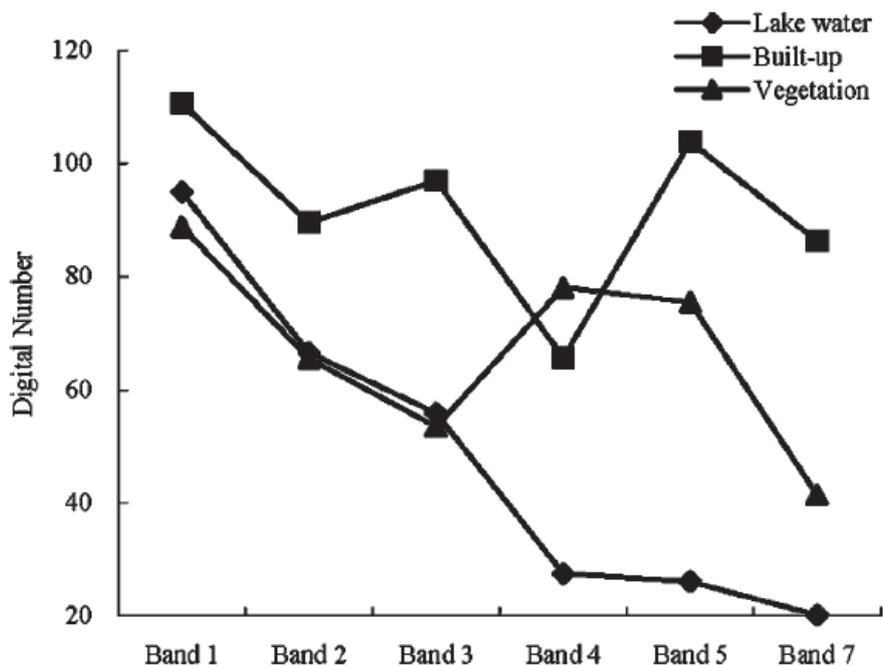


Figura B.4. Patrones de reflectancia espectral en la zona de Fuzhou City. Fuente: (Xu, 2006).

Dada dicha limitación; el autor analizó las firmas de la figura B.4; y observó que el número digital promedio de la banda 5, que representa la radiación infrarroja media (MIR), es mucho mayor que el de la banda verde. Por lo tanto, si se usa una banda MIR en lugar de la banda NIR en el NDWI, el suelo edificado debería tener valores negativos. Basándose en esta suposición, modificó el NDWI sustituyendo la banda MIR por la banda NIR. El NDWI modificado (MNDWI) se puede expresar de la siguiente manera:

$$MNDWI = \frac{GREEN - MIR}{GREEN + MIR} \quad (B.2)$$

Esta modificación producirá tres resultados:

- el agua tendrá valores positivos más altos que en el NDWI ya que absorbe más luz MIR que luz NIR;
- las urbanizaciones tendrán valores negativos;
- el suelo y la vegetación seguirán teniendo valores negativos ya que el suelo refleja la luz MIR más que la luz NIR y la vegetación refleja la luz MIR aún más que la luz verde

Comparando con el NDWI, el contraste entre el agua y las tierras urbanizadas del MNDWI se ampliará considerablemente debido al aumento de los valores de la característica del agua y la disminución de los valores de las tierras urbanizadas de positivo a negativo. Se espera que la mejoría del agua en la imagen MNDWI dará como resultado una extracción más precisa de las características de aguas abiertas, ya que la tierra, el suelo y la vegetación adoptan valores negativos y, por lo tanto, las coberturas podrán ser mejor separadas (Xu, 2006).