



FaIn·UNCo
Facultad de Ingeniería

TRABAJO FINAL DE LICENCIATURA
LICENCIATURA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

Estimación de la recarga de los acuíferos en el Dorso de los Chihuidos mediante Sistema de Información Geográfica

Autora: Toth, Alina

Legajo: ING 6524

DNI: 38809092

Directora: Dra. Dufilho, Ana Cecilia

Codirector: Lic. Gatica, José Ricardo

Neuquén, octubre 2022

RESUMEN

El área de estudio abarca el anticlinal del Dorso de los Chihuidos y se sitúa en la región centro norte de la provincia de Neuquén con una superficie total de 10.229 km². Se caracteriza por poseer condiciones climáticas áridas y semiáridas, donde las precipitaciones anuales no superan los 200 mm y la evapotranspiración del cultivo de referencia es superior a 1.000 mm. Esta zona es de interés en la recarga hídrica de los acuíferos confinados de la provincia de Neuquén.

El objetivo de este trabajo es la caracterización de la distribución espacial de la recarga de acuíferos en la zona del Dorso de los Chihuidos ya que, por un lado, existen poblaciones que se abastecen de agua subterránea y, por otro, la zona representa uno de los puntos con mayor desarrollo actual de la industria hidrocarburífera.

La metodología de trabajo consistió en estimar la recarga hídrica anual mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG). El primer paso fue definir las zonas aptas para la recarga teniendo en cuenta los actores que intervienen en la escorrentía: pendiente, tipo de suelo, cobertura vegetal permanente, litología y uso de suelo. Luego, se realizó un balance hídrico diario simplificado, considerando precipitación y evapotranspiración del cultivo de referencia, cuyo objetivo fue obtener la cantidad de agua excedente que se encuentra disponible para que recargue los acuíferos y escurra superficialmente. Por último, se estimó la recarga potencial anual afectando este excedente hídrico por la aptitud por la recarga.

Los resultados indican que existen excedentes disponibles para la recarga, mayormente en invierno, no detectable con balances mensuales pero visibles a escala diaria. En el área de estudio se genera un excedente hídrico medio de 103 mm anuales que generan una recarga potencial ponderada de 50 mm, equivalentes a 153 hm³ anuales. El fenómeno de recarga se produce principalmente sobre el Dorso de los Chihuidos, que representa una extensa área, que posee una superficie de 4664 km² donde la recarga media se estimó en 40,7 mm o 190 hm³ anuales. En las sedimentitas aflorantes del Gpo. Neuquén (Fm. Candeleros y Huincul) y Fm. Rayoso se estimó que se infiltraría en promedio unos 89,66 hm³ anuales. En el área de estudio existe, por otra parte, otra zona de recarga ubicada en el Complejo Volcánico Auca Mahuida en el Basalto Huarco, donde se infiltrarían 58,6 hm³ anuales.

Palabras clave: Zonas aptas para la recarga – Balance hídrico diario – Recarga hídrica - Grupo Neuquén – Formación Rayoso

ABSTRACT

The study area covers the Dorso de los Chihuidos anticline and is located in the north central region of the province of Neuquén with a total area of 10,229 km². It is characterized by having arid and semi-arid climatic conditions, where annual rainfall does not exceed 200 mm and potential evapotranspiration is greater than 1,000 mm. This zone is of interest in the hydric recharge of the confined aquifers of the province of Neuquén.

The objective of this work is to characterize the spatial distribution of aquifer recharge in the Dorso de los Chihuidos area since, on the one hand, there are populations that are supplied with groundwater and, on the other, the area represents one of the points with the greatest current development of the hydrocarbon industry.

The work methodology consisted of estimating the annual water recharge through a Geographic Information System (GIS). The first step was to define the areas suitable for recharge taking into account the factors involved in runoff: slope, type of soil, permanent vegetation cover, lithology and land use. Then, a simplified daily water balance was made, considering precipitation and potential evapotranspiration, which obtained the target amount of water that is available to recharge the aquifers and run off on the surface. Finally, the potential annual recharge of this water surplus was estimated by the aptitude for recharge.

The results indicate that there are surpluses available for recharging, mostly in winter, not detectable with monthly balances but visible on a daily scale. In the study area, an average water surplus of 103 mm per year is generated, which generates a potential weighted recharge of 50 mm, equivalent to 153 hm³ per year. The recharge phenomenon occurs mainly on the Dorso de los Chihuidos, which represents an extensive area, which has a surface of 4664 km² where the average recharge is estimated at 40.7 mm or 190 hm³ per year. In the outcropping sediments of Gpo. Neuquén (Fm. Candeleros and Huincul) and Fm. It was estimated that Rayoso would infiltrate an average of 89.66 hm³ per year. In the study area there is, on the other hand, another recharge zone located in the Auca Mahuida Volcanic Complex in the Huarco Basalt, where 58.6 hm³ per year would infiltrate.

Keywords: Suitable areas for recharging – Daily water balance – Water recharge - Grupo Neuquén – Formación Rayoso – GIS

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Comahue por su formación de calidad y por permitirme lograr mi sueño de ser profesional.

A la Facultad de Ingeniería por ser mi segunda casa durante todos estos años.

A mi directora y a mi co-director de tesis, Cecilia y José, por ser referentes para mí durante el desarrollo de mi carrera y por haber aceptado transitar este camino final conmigo, por toda la ayuda y el acompañamiento que me brindaron y por sobre todo, su paciencia y tiempo. Sin ellos este trabajo no hubiese sido posible.

A la Autoridad Interjurisdiccional de las Cuencas de los ríos Limay, Neuquén y Negro, al Comité Interjurisdiccional del Río Colorado y a la empresa VISTA Energy por brindarme los datos meteorológicos para la realización de este trabajo.

Al jurado asignado por aceptar evaluar mi trabajo: Dra. Fátima Becher Quinodoz, Dra. Gabriela Polla y Lic. Nasib Neme Rodríguez.

A todos/as los/as grandes profesionales que forman parte de la carrera, a quienes admiro y respeto profundamente. Les agradezco por brindar sus conocimientos, su pasión por la geología y por formarme tanto profesional como personalmente.

A mis geoamigas/os por compartir las cursadas, juntadas, viajes, salidas, anécdotas y recuerdos. Gracias a ellas/os, la facultad fue una de las etapas más lindas de mi vida. Quiero agradecer especialmente a mis primeros amigos de carrera, quienes estuvieron siempre para acompañarme: Milay y Julián.

A mis amigas de toda la vida, Irene y Florencia, por su apoyo, amistad y amor durante todos estos años.

A mis abuelos, tías/os y primos/as, que me desearon siempre lo mejor, que festejaron conmigo cada acierto y que me alentaron en cada desacierto. Gracias especialmente a mis abuelos Silvia y Edgardo, quienes hoy no están físicamente pero que me acompañaron siempre.

A mi novio, Lautaro, por acompañarme en este recorrido, por festejar conmigo cada logro como propio y confiar siempre en mí. Sin su amor y compañía no hubiese sido lo mismo.

Y finalmente, quiero agradecerles y dedicarles este trabajo a las personas más importantes de mi vida: a mis papás, Alan y Daniela, y a mi hermana Luchi. Gracias por su amor y apoyo incondicional de siempre, por estar presentes y motivarme en todos los aspectos de mi vida, por ser mi sostén y nunca dejarme bajar los brazos. Absolutamente nada sería lo mismo sin ustedes. Este logro es por y gracias a ustedes. Los amo con el alma.

A todos/as, muchas gracias!

ÍNDICE

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos	2
2. ANTECEDENTES	3
3. MARCO TEÓRICO	4
3.1 Ciclo del agua	4
3.1.1 Precipitación	4
3.1.2 Evapotranspiración	5
3.1.3 Escorrentía	6
3.1.4 Infiltración	6
3.1.5 Intercepción	8
3.2 Agua subterránea	8
3.2.1 Acuíferos	8
3.3 Recarga hídrica	9
3.3.1 Métodos para estimar la recarga.....	10
3.3.2 Factores que afectan la recarga.....	12
3.4 Sistemas de Información Geográfica	14
4. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	16
4.1 Ubicación geográfica	16
4.2 Clima.....	16
4.2.1 Temperatura.....	18
4.2.2 Precipitación	20
4.2.3 Humedad relativa.....	26
4.2.4 Viento	26
4.2.5 Evapotranspiración	27
4.3 Suelo	28
4.4 Vegetación	29
4.5 Geología.....	29
4.5.1 Unidades litoestratigráficas con interés hidrogeológico.....	32

4.6	Geomorfología	34
4.7	Provincias geológicas	35
4.8	Hidrogeología	36
5.	METODOLOGÍA	39
5.1	Zonas Aptas para la Recarga	41
5.1.1	Pendiente	42
5.1.2	Tipo de suelo	43
5.1.3	Tipo de roca	44
5.1.4	Cobertura vegetal permanente	45
5.1.5	Uso del suelo	46
5.2	Excedente hídrico	47
5.2.1	Precipitación	47
5.2.2	Temperatura.....	48
5.2.3	Evapotranspiración del cultivo de referencia	49
5.3	Recarga potencial.....	50
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	51
6.1	Zonas Aptas para la Recarga	51
6.2	Evapotranspiración del cultivo de referencia medio mensual	53
6.3	Excedente hídrico	57
6.3.1	Relación Precipitación vs Evapotranspiración del cultivo de referencia medio diaria.....	57
6.3.2	Excedente hídrico diario.....	59
6.3.3	Distribución espacial del excedente hídrico anual medio	62
6.4	Recarga potencial.....	64
6.4.1	Recarga potencial de las provincias geológicas	64
6.4.2	Recarga Potencial de las unidades geológicas aflorantes.....	66
6.4.3	Comparación y validación con estudios previos	71
6.5	Modelo conceptual de recarga	72
7.	CONCLUSIONES	75
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	77
	ANEXOS	1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo hidrológico (Sánchez San Román, 2014).....	4
Figura 2. Ubicación del área de estudio	16
Figura 3. Ubicación de las estaciones hidrometeorológicas utilizadas	17

Figura 4. Régimen anual de temperatura máxima, media y mínima mensual de las distintas estaciones	19
Figura 5. Distribución espacial de temperaturas medias en el área de estudio	20
Figura 6. Régimen anual de lluvias. Precipitación media mensual y frecuencia promedio de días con lluvia en Bajada del Agrio (1999-2022)	21
Figura 7. Comportamiento de las precipitaciones diarias promedio de la estación Bajada del Agrio (1999-2022)	21
Figura 8. Régimen anual de lluvias. Precipitación media mensual y frecuencia promedio de días con lluvia en Balsa Huitrín (2008 – 2022)	21
Figura 9. Comportamiento de precipitaciones diarias promedio de la estación Balsa Huitrín (2008 – 2022)	22
Figura 10. Régimen anual de lluvias. Precipitación media mensual y frecuencia promedio de días con lluvia en La Higuera (1999-2022).....	22
Figura 11. Comportamiento de las precipitaciones anuales de la estación La Higuera (1999-2022)	22
Figura 12. Régimen anual de lluvias. Precipitación media mensual y frecuencia promedio de días con lluvia en Los Maitenes (2009-2022)	23
Figura 13. Comportamiento de las precipitaciones diarias promedio de la estación Los Maitenes (2009 – 2022)	23
Figura 14. Régimen anual de lluvias. Precipitación media anual y frecuencia promedio de días con lluvia en Buta Ranquil (2015 - 2022)	24
Figura 15. Comportamiento de las precipitaciones diarias promedio de la estación Buta Ranquil (2015-2022).....	24
Figura 16. Régimen anual de lluvias. Precipitación media mensual y frecuencia promedio de días con lluvia en Yacimiento Entre Lomas (2015 – 2022)	24
Figura 17. Comportamiento de las precipitaciones diarias promedio de la estación Yacimiento Entre Lomas (2015-2022)	25
Figura 18. Régimen anual de lluvias. Precipitación media mensual y frecuencia promedio de días con lluvia en Borde Montuoso (2016-2022).....	25
Figura 19. Comportamiento de las precipitaciones diarias promedio de la estación Borde Montuoso (2016-2022).....	26
Figura 20. Humedad relativa media mensual. BR: Buta Ranquil, YEL: Yacimiento Entre Lomas, BM: Borde Montuoso.....	26
Figura 21. Comportamiento del viento. BR: Buta Ranquil, YEL: Yacimiento Entre Lomas, BM: Borde Montuoso	27
Figura 22. Tipos de suelo en el área de estudio (Irisarri, 2006)	28
Figura 23. Estructuras fisonómicas de la vegetación (Movía et al., 2007)	29
Figura 24. Unidades litoestratigráficas (Leanza et al., 2001; Rodríguez et al., 2007; Ramos, 1981; Holmberg, 1964)	30
Figura 25. Unidades geológicas según su periodo de depositación (Leanza et al., 2001; Rodríguez et al., 2007; Ramos, 1981; Holmberg, 1964).....	31
Figura 26. Esquema estratigráfico propuesto para la Fm. Rayoso por diversos autores (Zavala y Ponce, 2011).....	32
Figura 27. Esquema litoestratigráfico propuesto para el Gpo. Neuquén (Garrido, 2011).....	33
Figura 28. (A) Pendientes del área de estudio (%). (B) Elevación del terreno (msnm)	34
Figura 29. Mapa de provincias geológicas en el área de estudio (Modificado de Ramos et al., 2011)	35
Figura 30. (A). Hidrología superficial de la provincia de Neuquén con sus distintas cuencas hidrológicas. (B) Hidrología superficial y cuencas hidrológicas del área de estudio. (Dufilho et al., 2002).....	36

Figura 31. Esquema metodológico para la estimación de la recarga potencial en el área de estudio	41
Figura 32. Distribución espacial de las Zonas Aptas para la Recarga según provincias geológicas en el área de estudio, utilizando la metodología de Matus Silva (2007) modificada por Gatica (2017)	51
Figura 33. Comportamiento de la evapotranspiración del cultivo de referencia media mensual en Bajada del Agrio (1999-2022).....	53
Figura 34. Comportamiento de la evapotranspiración del cultivo de referencia media mensual en Balsa Huitrín (1999-2022)	53
Figura 35. Comportamiento de la evapotranspiración del cultivo de referencia media mensual en La Higuera (1999-2022).....	54
Figura 36. Comportamiento de la evapotranspiración del cultivo de referencia media mensual en Los Maitenes (2009-2022)	54
Figura 37. Comportamiento de la evapotranspiración del cultivo de referencia media mensual en Buta Ranquil (2015-2022).....	55
Figura 38. Comportamiento de la evapotranspiración del cultivo de referencia media mensual en Yacimiento Entre Lomas (2015-2022).....	55
Figura 39. Comportamiento de la evapotranspiración del cultivo de referencia media mensual en Borde Montuoso (2016-2022).....	56
Figura 40. Distribución espacial de la evapotranspiración del cultivo de referencia anual en el área de estudio.....	56
Figura 41. Comportamiento medio diario de la evapotranspiración del cultivo de referencia vs. la precipitación en Bajada del Agrio (1999 – 2022)	57
Figura 42. Comportamiento medio diarios de evapotranspiración del cultivo de referencia vs. la precipitación en Balsa Huitrín (2008-2022).....	57
Figura 43. Comportamiento medio diario de evapotranspiración del cultivo de referencia vs. la precipitación en La Higuera (1999-2022)	58
Figura 44. Comportamiento medio diario de evapotranspiración del cultivo de referencia vs. la precipitación en Los Maitenes (2009-2022).....	58
Figura 45. Comportamiento medio diario de evapotranspiración del cultivo de referencia vs. la precipitación en Buta Ranquil (2015-2022)	58
Figura 46. Comportamiento medio diario de la evapotranspiración del cultivo de referencia vs. la precipitación en Yacimiento Entre Lomas (2015 – 2022).....	59
Figura 47. Comportamiento medio diario de la evapotranspiración del cultivo de referencia vs. la precipitación en Borde Montuoso (2016-2022)	59
Figura 48. Excedente hídrico diario en Bajada del Agrio (1999-2022)	60
Figura 49. Excedente hídrico diario en Balsa Huitrín (2008-2022)	60
Figura 50. Excedente hídrico diario en La Higuera (1999-2022)	60
Figura 51. Excedente hídrico diario en Los Maitenes (2009-2022).....	61
Figura 52. Excedente hídrico en Buta Ranquil (2015-2022).....	61
Figura 53. Excedente hídrico en Yacimiento Entre Lomas (2015-2022).....	62
Figura 54. Excedente hídrico en Borde Montuoso (2016-2022).....	62
Figura 55. Distribución espacial del excedente hídrico	63
Figura 56. Distribución espacial de la recarga potencial según provincias geológicas.....	64
Figura 57. Recarga potencial media anual (mm) y recarga potencial volumétrica (hm ³) según las provincias geológicas en el área de estudio.....	65
Figura 58. Distribución espacial de la recarga potencial anual según las unidades geológicas aflorantes	66
Figura 59. Recarga potencial media anual (mm) vs recarga potencial volumétrica anual (hm ³) de las unidades geológicas aflorantes	71

Figura 60. Recarga potencial media anual (mm) vs recarga potencial volumétrica anual (hm ³) de las unidades geológicas aflorantes	71
Figura 61. Modelo conceptual de la recarga en el Dorso de los Chihuidos	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores estimados de porosidad (%). Sanders (1998).....	13
Tabla 2. Estaciones hidrometeorológicas que se utilizaron.....	17
Tabla 3. Resumen del régimen térmico de las distintas estaciones.....	18
Tabla 4. Caracterización de viento.....	27
Tabla 5. Valores acumulados anuales de precipitación vs. evapotranspiración del cultivo de referencia de las distintas estaciones.....	27
Tabla 6. Clasificación de la posibilidad de recarga hídrica (ZARm) para el área de estudio	41
Tabla 7. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica de acuerdo al tipo de pendiente. Fuente FAO (2009)	42
Tabla 8. Clasificación de suelos según la aptitud de recarga desarrollada por Matus Silva (2007) y adaptado por Gatica (2017) para los tipos de suelo de la provincia de Neuquén.....	43
Tabla 9. Clasificación de rocas según su aptitud para la recarga desarrollada por Matus Silva (2007) y modificada por Gatica (2017) para rocas de la provincia de Neuquén.....	44
Tabla 10. Clasificación de la cobertura vegetal según su aptitud para la recarga desarrollada por Matus Silva (2007) y modificada para el tipo de vegetación de la provincia de Neuquén de Movía et al. (2007).....	45
Tabla 11. Clasificación del uso del suelo según su aptitud para la recarga desarrollada por Matus Silva (2007) y modificada para el tipo uso del suelo de la provincia de Neuquén, utilizando la información disponible del IGN, la Subsecretaría de Energía, Minería.....	46
Tabla 12. Zonas aptas para la recarga hídrica según las provincias geológicas en el área de estudio (los valores son adimensionales)	51
Tabla 13. Excedente hídrico anual medio según la estación.....	63
Tabla 14. Valores de precipitaciones anuales, excedentes anuales y recarga potencial anual de las distintas provincias geológicas	64
Tabla 15. Recarga potencial anual (mm) y recarga potencial (hm ³) según las unidades geológicas aflorantes.....	67
Tabla 16. Comparación con los resultados de recarga potencial obtenidos por Gatica (2017) para el área de estudio.....	72

1. INTRODUCCIÓN

Considerando el agua en el planeta, se calcula que cerca del 96,5% se encuentra en los océanos, el 1,7% en hielos polares, el 1,7% en aguas subterráneas y solamente el 0,1% en sistemas de aguas superficial y atmosférica. Sólo el 2,5% del agua total en el mundo corresponde a agua dulce. Además, cerca de las dos terceras partes del agua dulce de la Tierra corresponden a hielo polar y la mayoría de la restante es agua subterránea, de la cual el 0,76% está formado por agua dulce y 0,93% es salada (Chow *et al.*, 1988).

El agua subterránea es un recurso natural muy valioso y es un componente esencial del Ciclo Hidrológico. Por un lado, su importancia radica, principalmente, en que se la utiliza tanto para consumo de la sociedad como para generar y mantener el crecimiento económico, con actividades como el desarrollo urbano, la agricultura, producción de energía, las industrias, entre otras. Por otro lado, es preocupante su manejo con respecto a las cantidades de aguas subterráneas en el mundo. Se cree que esta situación puede generar que este recurso se vea afectado de manera negativa, tanto en su cantidad como en su calidad, pudiendo derivar en graves problemas de orden económico político, social y ambiental (González, 2004).

La recarga de acuíferos es la cantidad de agua que entra en la zona saturada y que comienza a formar parte de las reservas subterráneas. Se estima que las precipitaciones son la fuente principal, casi exclusiva, del agua subterránea dulce (E.N.O.H.Sa, 2001). Custodio y Llamas (1986) la definieron como el proceso natural o artificial por el cual un volumen de agua entra a un acuífero durante un período de tiempo.

Se supone que en Argentina más del 70% de la superficie posee climas áridos y semiáridos (Carriaca *et al.*, 2012), la cual tiene una seria limitación vinculada con la disponibilidad de recursos hídricos para su desarrollo. Dentro de ese panorama surge claramente la relevancia que adquieren las aguas subterráneas como soporte del crecimiento socioeconómico (Hernández *et al.*, 2010)

Específicamente, la región centro norte de la provincia de Neuquén se encuentra bajo la influencia de clima árido y semiárido, con una relación de precipitación media anual y evapotranspiración del cultivo de referencia inferior a 0,65 (UNEP, 1997), lo que indica un marcado déficit hídrico, ya que existe una enorme descompensación entre la cantidad de agua que potencialmente puede pasar a la atmósfera por evapotranspiración y la cantidad de agua que realmente reciben estas zonas. Por esta razón solo una pequeña porción del agua subterránea forma parte del componente subterráneo del ciclo hidrológico (Fernández Gálvez, 2010).

En las regiones con climas áridos y semiáridos, los acuíferos constituyen la principal o única fuente de suministro de agua, por lo cual el estudio de la recarga requiere mayor detenimiento. Su evaluación es de fundamental importancia para determinar la posibilidad de desarrollo económico-social de estas regiones dado que su cuantificación constituye uno de los aspectos técnicos esenciales de la gestión de un acuífero (Carrica, 2005). En este marco, una gestión precaria del recurso hídrico y la deficiente aplicación de políticas ambientales puede acelerar el deterioro de las áreas de recarga hídrica. Por otra parte, las zonas de recarga de acuíferos son especialmente vulnerables, ya que la difusión de contaminantes es mucho más rápida en ellas. Asimismo, no siempre se tiene la información de dónde se encuentran las fuentes de agua subterránea, cuál es su disponibilidad y muy frecuentemente se tiene información de que estas también se están contaminando (Matus Silva, 2007).

En este contexto, se eligió la zona del Dorso de los Chihuidos, considerada por Gatica (2017) como una de las zonas de interés de recarga en la provincia de Neuquén. En esta región, donde la precipitación anual no supera los 200 mm, se producen dos situaciones: por un lado, existen poblaciones que se abastecen de agua subterránea y, por

otro lado, es uno de los puntos con mayor desarrollo de la industria hidrocarburífera en la provincia. A pesar de esto, el conocimiento sobre las características y el comportamiento de las unidades acuíferas es escaso (Alonso *et al.*, 2016), por lo que surge la necesidad del entendimiento de la recarga a partir de las precipitaciones locales diarias.

En el presente Trabajo Final de Licenciatura la metodología consiste en estimar la recarga potencial utilizando parámetros derivados de sensores remotos satelitales y datos hidrogeológicos, climatológicos, geomorfológicos entre otros, que fueron procesados mediante el uso de Sistema de Información Geográfica (SIG) en el Dorso de los Chihuidos, provincia de Neuquén.

1.1 Objetivo general

Caracterizar la distribución espacial de la recarga de acuíferos en la zona del Dorso de los Chihuidos con el propósito de contribuir a la evaluación de los recursos hídricos de la provincia de Neuquén.

1.2 Objetivos específicos

- Identificar los factores geohidrológicos que intervienen en el proceso de infiltración y de recarga de los acuíferos en el Dorso de los Chihuidos.
- Determinar el modelo conceptual de la recarga del sistema acuífero Grupo Neuquén-Rayoso en el Dorso de los Chihuidos.
- Diseñar una base de datos SIG para cartografiar los factores y analizar la recarga mediante método de estimación.
- Comparar y validar los resultados obtenidos en estudios previos a diferente escala de análisis.
- Generar mapas temáticos hidrogeológicos utilizando SIG.

2. ANTECEDENTES

Diversos autores han estimado la recarga con diferentes métodos. Meinzer (1923), Sloto (1990) y Rutledge (1998) lo hicieron por medio de modelos de precipitación y escorrentía en Estados Unidos. Samper (1997) aplicó modelos por medio de balances de humedad en recarga de acuíferos en zonas semi áridas de España. Shaban *et al.* (2006) estudiaron la recarga en el Líbano considerando como los principales factores contribuyentes al proceso de recarga a la litología, la densidad de drenaje, la densidad de lineamientos, la ubicación de dominios kársticos y la cobertura vegetal y uso de la tierra. Matus Silva (2007) elaboró una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en Nicaragua utilizando factores que están directamente relacionados con la recarga. Yeh *et al.* (2016) analizaron la recarga de aguas subterráneas mediante SIG según diferentes factores que intervienen en el proceso de recarga en Taiwan.

Álvarez *et al.* (2013) estimaron la recarga en zonas áridas según distintos métodos (balance hídrico de paso diario, fluctuación de niveles y balance del ión cloruro) en el sur de la Península de Valdés. Varni y Custodio (2013) estimaron la recarga en la cuenca del arroyo de Azul en la provincia de Buenos Aires comparando los resultados del balance hídrico en el suelo con el balance de la deposición de cloruro atmosférico. Hernández *et al.* (2013) aproximaron los volúmenes de agua subterránea disponibles para riego en las cuencas de los ríos Areco y Arrecifes (provincia de Buenos Aires) a través de un balance hídrico para aproximar la infiltración potencial probable. Rodríguez *et al.* (2006) plantearon un análisis crítico de las metodologías disponibles para determinar la recarga en la zona fisurada de la Formación (Fm.) Serra Geral en Argentina mediante modelos de balance, métodos hidrogeoquímicos, análisis estructural y modelación numérica.

En la provincia de Neuquén, Holmberg (1964) y Susic (1978) describieron las aguadas permanentes como elementos de gran interés como fuente de abastecimiento. La mayor parte de ellas se encuentran al pie de las planicies basálticas, surgiendo de las areniscas designadas por Digregorio (Uliana y Dellapé, 1981) como Gpo. Neuquén. Sticco (2014 y 2015) realizó informes con ensayos de bombeo, niveles, calidad química y litología de diferentes pozos de agua ubicados en el área del Dorso de los Chihuidos. De acuerdo a los ensayos realizados, los niveles acuíferos corresponden a las areniscas del Gpo. Neuquén y a la sección superior de la Fm. Rayoso. Alonso *et al.* (2016) definieron que dentro de las rocas sedimentarias de la Cuenca Neuquina, la Fm. Rayoso y la sección inferior del Gpo. Neuquén, presentan los niveles estratigráficos con mayor potencial hidrogeológico en el sector centro norte de la provincia de Neuquén. Adicionalmente, Gatica (2017) determinó que unos 3900 hm³ anuales se recargarían en promedio en la región extra-andina de la provincia. Debido a esta recarga, unos 842 hm³ estarían disponibles anualmente para ser captados en los acuíferos de la Fm. Rayoso y del Gpo. Neuquén. Además, definió que el Dorso de los Chihuidos es una extensa zona de importancia para la recarga de acuíferos confinados con una aptitud moderada a baja, la cual no supera los 75 mm anuales. Por otro lado, Maddio (2019) estimó que la Fm. La Bardita (Zapala) tiene una recarga potencial anual de 74 hm³/año, representando un 61% de la precipitación estimada en 118 hm³/año. Por último, Del Prete (2019) estudió las características hidrogeoquímicas e isotópicas del sistema Acuífero Gpo. Neuquén y Fm. Rayoso en el Dorso de Los Chihuidos reconociendo la aptitud de esta zona para la recarga.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Ciclo del agua

Se denomina Ciclo Hidrológico al movimiento general del agua. Es ascendente por evaporación y descendente, primero por las precipitaciones y después en forma de escorrentía superficial y subterránea (Sánchez San Román, 2014) (Figura 1). Este ciclo describe el almacenamiento y movimiento del agua en el planeta y tiene como motor la energía solar y la gravedad.

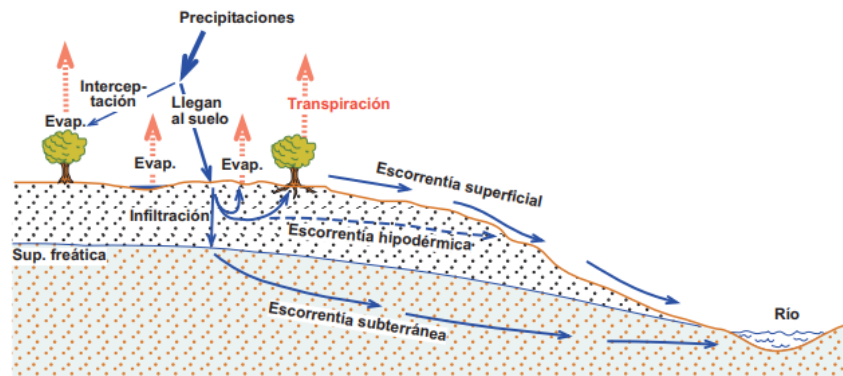


Figura 1. Ciclo hidrológico (Sánchez San Román, 2014)

Como se trata de un ciclo, se puede considerar como inicio a cualquiera de sus fases. El agua se evapora desde los océanos y desde la superficie terrestre para volver a ser parte de la atmósfera; el vapor de agua se transporta y se eleva en la atmósfera hasta que se condensa y precipita sobre la superficie terrestre o los océanos; el agua precipitada puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el suelo, infiltrarse en él, correr a través del suelo como flujo subsuperficial y descargar en los ríos como escorrentía superficial. La mayor parte del agua interceptada y de escorrentía superficial regresa a la atmósfera mediante la evaporación. El agua infiltrada puede percolar profundamente para recargar el agua subterránea de donde emerge en manantiales o se desliza hacia ríos para formar la escorrentía superficial, y finalmente, fluye hacia el mar o se evapora en la atmósfera a medida que el ciclo hidrológico continúa (Chow *et al.*, 1988).

3.1.1 Precipitación

La precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre y sus mediciones y análisis forman el punto de partida de la mayor parte de los estudios concernientes al uso y control del agua (Aparicio, 1997). Custodio y Llamas (1983) definen este concepto como el agua que llega en estado líquido o sólido a la superficie de la tierra. En estado líquido se puede presentar en forma de lluvia, niebla o rocío mientras que en estado sólido, en forma de nieve, granizo o escarcha. La formación de precipitación requiere la elevación de una masa de agua en la atmósfera de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense (Chow *et al.*, 1988).

Según Custodio y Llamas (1983) las precipitaciones se pueden dividir en tres, dependiendo de los fenómenos meteorológicos que las originan:

- a) *Precipitación convectiva*: se origina por el calentamiento de las masas de aire próximas a la superficie de un suelo que ha recibido una fuerte insolación. Suelen ser tormentas locales propias de la estación cálida o también, son llamadas tormentas de verano.

- b) *Precipitación frontal o ciclónica*: con origen en las superficies de contacto de masas de aire con temperatura y humedad diferentes. Pueden ser de frente cálido o frío, o bien estar originadas por oclusión de un frente. Generan precipitaciones moderadas y continuas sobre áreas extensas. Por lo general, son la mayor parte del volumen de precipitación recogido en una cuenca.
- c) *Precipitación orográfica o lluvia de relieve*: propias de zonas montañosas, por el enfriamiento y consiguiente condensación de vapor de agua en las masas de aire que al tropezar con una ladera, ascienden por ella.

Por otro lado, la FAO (1978) introduce el término de precipitación efectiva, que es aquella fracción de la precipitación total que es aprovechada por las plantas, y que depende de múltiples factores como la intensidad de precipitación, aridez del clima, inclinación del terreno, contenido de humedad del suelo, velocidad de infiltración, entre otros. Además, este tipo de precipitación puede alcanzar estratos más profundos como los acuíferos.

3.1.2 *Evapotranspiración*

La evapotranspiración es la combinación de la evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación. La evaporación comprende la evaporación directa desde la superficie del suelo y desde la superficie de la vegetación e incluye el fenómeno físico en el que el agua pasa de líquido a vapor. En cambio, la transpiración es el fenómeno biológico por el que las plantas pierden agua a la atmósfera y se da a partir de las hojas (Chow *et al.*, 1988).

El concepto de evapotranspiración potencial fue introducido por Thornthwaite (1948) y se refiere a la evapotranspiración que se produciría si la humedad del suelo y la cobertura vegetal estuvieran en condiciones óptimas (Sánchez San Román, 2014). La evapotranspiración potencial es un límite superior de la cantidad de agua que realmente vuelve a la atmósfera por evaporación y transpiración (Custodio y Llamas, 1983). Por el contrario, la evapotranspiración real es la que se produce verdaderamente en las condiciones existentes en cada caso (Sánchez San Román, 2014).

Por otro lado, FAO (2006) incluye en el concepto de evapotranspiración tres diferentes definiciones: evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}). ET_0 es un parámetro relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera. ET_c se refiere a la evapotranspiración en condiciones óptimas presentes en parcelas con un excelente manejo y adecuado aporte de agua y que logra la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas. ET_c requiere generalmente una corrección, cuando no existe un manejo óptimo y se presentan limitantes ambientales que afectan el crecimiento del cultivo y que restringen la evapotranspiración, es decir, bajo condiciones no estándar de cultivo.

No es simple medirla. Debido a esta dificultad, se la calcula comúnmente con datos meteorológicos. Una gran cantidad de ecuaciones empíricas o semi-empíricas se han desarrollado para determinar la evapotranspiración del cultivo o de referencia utilizando datos meteorológicos (FAO, 2006).

Según FAO (2006) existen diversos factores meteorológicos y atmosféricos que determinan la evapotranspiración:

- **Radiación solar**: el proceso de la evapotranspiración está determinado por la cantidad de energía disponible para evaporar el agua. La radiación solar es la más importante fuente de energía en el planeta y puede cambiar grandes cantidades de

agua líquida en vapor de agua. La cantidad potencial de radiación que puede llegar a la superficie evaporante viene determinada por su localización y época del año.

- Temperatura del aire: la radiación solar absorbida por la atmósfera y el calor emitido por la tierra elevan la temperatura del aire. El calor sensible del aire circundante transfiere energía al cultivo y ejerce un cierto control en la tasa de evapotranspiración. En un día soleado y cálido, la pérdida de agua por evapotranspiración será mayor que en un día nublado y fresco.
- Humedad del aire: mientras que el aporte de energía del sol y del aire circundante es la fuerza impulsora principal para la evaporación del agua, la diferencia entre la presión de vapor de agua en la superficie evapotranspirante y el aire circundante es el factor determinante para la remoción de vapor.
- Velocidad del viento: el proceso de remoción de vapor depende en alto grado del viento y de la turbulencia del aire, los cuales transfieren grandes cantidades de aire hacia la superficie evaporante. Con la evaporación del agua, el aire sobre la superficie evaporante se satura gradualmente con vapor. Si este aire no se substituye continuamente por un aire más seco, disminuye la intensidad de remoción de vapor de agua y la tasa de evapotranspiración disminuye.
- Presión atmosférica: la presión atmosférica es la presión ejercida por el peso de la atmósfera terrestre. La evaporación en altitudes elevadas ocurre en parte gracias a la baja presión atmosférica que se expresa con la constante psicométrica.
- Calor latente de vaporización: el calor latente de vaporización expresa la energía requerida para cambiar una masa de unidad de agua líquida a vapor de agua bajo presión y temperatura constantes. El valor del calor latente de vaporización varía en función de la temperatura. Cuanto más elevada sea la temperatura, menos energía será requerida.

3.1.3 Escorrentía

La escorrentía es la cantidad de agua de lluvia que excede la capacidad de infiltración del suelo. Cuando el exceso de lluvia supera la capacidad de almacenamiento del suelo, el agua fluye en sentido longitudinal de la pendiente. El exceso de agua escurre hacia los arroyos, ríos, lagos y océanos (Núñez, 2001).

Según el camino que sigue el agua hasta alcanzar la red de drenaje, Martínez de Azagra y Navarro Hevia (1996) distinguen tres tipos:

- a) *Escorrentía superficial*: corresponde al agua que no se infiltra en ningún momento, producto de una mayor intensidad de precipitación con respecto a la capacidad de infiltración del suelo, y que alcanza la red de drenaje moviéndose por la superficie del terreno bajo la acción de la gravedad.
- b) *Escorrentía subsuperficial*: se debe a la saturación de los horizontes edáficos inferiores y corresponde a la fracción de la precipitación que penetra en el suelo y se mueve lateralmente por los horizontes superiores.
- c) *Escorrentía subterránea*: es la fracción de la precipitación que se infiltra hasta alcanzar la capa freática. Esta circula en régimen laminar a través de los acuíferos.

3.1.4 Infiltración

La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra en el suelo a través de la superficie de la tierra y queda retenida por él o alcanza un nivel acuífero. El agua desciende por la acción conjunta de las fuerzas capilares y de gravedad (Custodio y Llamas, 1983). Según Núñez (2001) la infiltración es influenciada por las propiedades físicas del suelo como la textura, estructura, contenido de materia orgánica, grado de

humedad inicial, entre otros. Faustino (2006) agrega otros factores influyentes como la conductividad hidráulica, la porosidad del suelo, la capa vegetal y la condición de la superficie del suelo.

Horton (1933) llama capacidad de infiltración de un suelo a la máxima cantidad de agua de lluvia que puede absorber en una unidad de tiempo y en condiciones definidas previamente. La relación entre la intensidad de la lluvia y la capacidad de infiltración será la que determine la cantidad de agua que penetrará en el suelo y la que, por escorrentía directa, alimentará los cauces de las corrientes superficiales.

Martínez de Azagra y Navarro Hevia (1996) mencionan que la infiltración se puede ver afectada por distintos factores como:

- Precipitación: influye en cuanto a su duración e intensidad. Cuando la intensidad de la precipitación es menor que la capacidad de infiltración, toda el agua que cae se introduce en el suelo mientras que, si es superior, el terreno no es capaz de absorber toda el agua que cae, produciéndose el encharcamiento y la escorrentía superficial. Para una misma intensidad de precipitación, un aguacero de larga duración puede terminar por encharcar el suelo, mientras que uno corto no.
- Estado de la superficie del suelo: la infiltración se puede ver afectada negativamente por la compactación y con la pendiente del terreno. En cuanto a la primera, se ve influenciada por el efecto de las gotas de lluvia, por las pisadas del ganado o por el movimiento de máquinas. En cuanto a la pendiente, a mayor pendiente el agua tiene menos tiempo para poder infiltrarse porque permanece en contacto con la superficie un intervalo menor. Por otro lado, las labores en cultivos (como por ejemplo el alzado) favorecen a la infiltración, ya que permiten la penetración del agua.
- Vegetación: la implantación de vegetación en un terreno desnudo aumenta la infiltración. Los efectos principales de la cubierta vegetal son que disminuye la velocidad de la escorrentía superficial y, consecuentemente, aumenta el tiempo de oportunidad de infiltración, reduce y elimina el impacto de las gotas de lluvia, aumenta la porosidad del suelo por los canalillos que crean las raíces y mejora la estructura del suelo gracias al incremento de materia orgánica.
- Contenido de humedad y permeabilidad: en cuanto a la permeabilidad, está condicionada por los macroporos. A través de ellos el agua se mueve por la acción de la gravedad. A nivel macroscópico la textura, la estructura y estabilidad estructural, la materia orgánica y la actividad de la flora y de la fauna edáfica son los factores que afectan a la permeabilidad. En cuanto al contenido de humedad, al aumentarlo se reduce el espacio del que dispone el suelo para almacenar agua y si la permeabilidad es baja, una vez que los horizontes se han saturado, la capacidad de infiltración es muy pequeña y en un suelo seco la infiltración es más rápida ya que actúan las fuerzas capilares.
- Características del agua: el agua influye a través de la turbidez, conductividad y temperatura. La turbidez afecta principalmente por la materia en suspensión transportada. El contenido de sales produce en ocasiones la formación de flóculos con los coloides del suelo y reduce la intensidad de infiltración. La temperatura afecta a la viscosidad y, en consecuencia, a la facilidad con la que atravesará el perfil edáfico.

En las regiones áridas, Hernández *et al.* (2002) determinaron que se puede producir infiltración rápida por tres razones fundamentales: la generalmente alta permeabilidad de los materiales porosos o existencia de fisuras en los rocosos, la baja a nula retención específica de los suelos y la superficie freática profunda.

3.1.5 Intercepción

Martínez de Azagra y Navarro Hevia (1996) definen al proceso de intercepción como parte de las precipitaciones, lluvias o nieves, que son interceptadas por la vegetación. Una fracción de las mismas es retenida en las ramas, ramillas y hojas para ser posteriormente evaporada. Otra fracción de la precipitación simplemente sufre un retraso en su caída al suelo pasando a integrar posteriormente la fracción infiltrada en el terreno o bien la fracción escurrida. Se denomina precipitación neta a la lluvia que alcanza el suelo.

La intercepción disminuye la precipitación real que llega al suelo en una cuenca. Puede pensarse que la vegetación disminuye los recursos hidráulicos de la cuenca, sobre todo en las zonas áridas, al interceptar parte de las precipitaciones incidentes y al consumir esa agua posteriormente.

Hoy por hoy, el fenómeno de la intercepción es cuantificado como pérdida del sistema, es decir, es el conjunto de agua precipitada que no se convierte en escorrentía de tormenta (Mintegui Aguirre y Lopez Unzu, 1990).

3.2 Agua subterránea

El agua subterránea es aquella parte del agua existente bajo la superficie terrestre que puede ser colectada mediante perforaciones, túneles o galerías de drenaje o la que fluye naturalmente hacia la superficie a través de manantiales o filtraciones a los cursos fluviales (E.N.O.H.Sa, 2001).

Las aguas subterráneas son de gran importancia, especialmente para aquellos lugares secos, donde el escurrimiento se reduce mucho en algunas épocas del año. Esta agua proviene de la infiltración directa en el terreno de las lluvias o nieves, o indirectas de los ríos o lagos (Villón, 2004). Las aguas subterráneas ocupan un rol fundamental en el desarrollo productivo y en la vida de las personas ya que, por lo general, es el único sustento que tienen para su uso humano/doméstico, ganadero, en la industria hidrocarburífera, entre otros (Ploil *et al.*, 2013).

3.2.1 Acuíferos

Se denomina acuífero a aquel estrato o formación geológica que, permitiendo la circulación del agua por sus poros o grietas, hace que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para subvenir a sus necesidades (Custodio Llamas, 1998). Ejemplos de acuíferos son las arenas y gravas, granito u otra roca compacta con una fracturación importante.

En función de la capacidad de recibir, alojar y transmitir agua de los distintos materiales geológicos, se denomina acuícludo a una formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable y que no permite que el agua circule a través de ella, como por ejemplo limos y arcillas. Acuitardo es una formación geológica que contiene agua en cantidad pero circula a través de ella con dificultad, como por ejemplo arenas arcillosas, areniscas, rocas compactas con alteración y/o fracturación moderadas. Por último, acuífugo hace referencia a una formación geológica que no contiene agua porque no permite que circule a través de ella, como por ejemplo granito o esquisto inalterados y no fracturados (Sánchez Román, 2014).

Además, a los acuíferos se los puede clasificar en:

- a. Acuíferos libres: son aquellos cuyo límite superior está a presión atmosférica. Si se extrae agua, descenderá la superficie freática (Sánchez Román, 2014). Liberan agua por la desaturación, es decir, el agua que ceden es la procedente del drenaje de sus poros (Ordoñez Gálvez, 2011).

- b. Acuíferos confinados: son aquellos cuyo límite superior se encuentra a presión superior que la atmosférica; es una capa impermeable. Si se extrae agua de ellos, ningún poro se vacía. La extracción procede de la descompresión del agua y en menor medida de la compresión de la matriz sólida. En este tipo de acuífero el espesor de la formación geológica es fijo. La superficie virtual formada por los puntos que alcanzaría el agua si se hicieran infinitas perforaciones en el acuífero, se denomina superficie piezométrica (Sánchez Román, 2014).
- c. Acuíferos semiconfinados: son aquellos acuíferos a presión en los que alguna de las capas confinantes son semipermeables, es decir, acuitardos, y a través de ellas le llegan filtraciones (Sánchez Román, 2014).

3.3 Recarga hídrica

La recarga es el volumen de agua que entra en un embalse subterráneo durante un período de tiempo, a causa de la infiltración de las precipitaciones o de un curso de agua (Custodio Llamas, 1998). También se puede definir como la entrada de agua dentro de la zona saturada donde comienza a formar parte de las reservas subterráneas. Esta entrada puede darse de dos maneras, por un movimiento descendente del agua debido a las fuerzas de la gravedad, y por el movimiento horizontal del flujo debido a las diferentes condiciones hidráulicas de las capas que constituyen el perfil del suelo (Vélez Otálvaro y Vázquez Ariza, 2004). Son varias las procedencias de esa recarga, desde la infiltración de la lluvia (en general, la más importante) y de las aguas superficiales (importantes en climas poco lluviosos), hasta la transferencia de agua desde otro acuífero (Custodio, 1998). El área o zona donde ocurre la recarga se llama zona de recarga y son sitios donde la capacidad de infiltración es alta.

Los acuíferos recargan en cualquier área en que exista suelo o roca permeable en superficie, esté en comunicación hidráulica con los acuíferos, y que esté temporalmente en contacto con agua. Todos estos factores que definen la recarga ocurren en diferentes grados relativos en las capas que sobreyacen a los acuíferos. Para conocer y delimitar las principales zonas de recarga de un acuífero y su mecánica de funcionamiento se necesitan muy variados y específicos estudios hidrogeológicos (Losilla, 1986).

Es por ello que el entendimiento del proceso de recarga en los sistemas acuíferos es de gran importancia, ya que es una reguladora de la magnitud de agua que puede llegar a formar parte de la reserva subterránea. El interés de proteger y entender áreas de recarga hídrica radica en el conocimiento de las disponibilidades del recurso hídrico que puede ser utilizado de forma sustentable. Es evidente que no se podrá obtener del subsuelo mayor cantidad de agua de la que se haya infiltrado a partir de las precipitaciones atmosféricas (Gatica, 2017).

La recarga hídrica depende del régimen de precipitación, de la escorrentía superficial y del caudal de los ríos, así como de la permeabilidad de los suelos, de su contenido de humedad, de la duración e intensidad de la lluvia y del patrón de drenaje de la cuenca. También la pendiente de la superficie constituye un factor importante, puesto que los terrenos muy inclinados favorecen la escorrentía superficial. Por el contrario, los terrenos con poca pendiente retienen por más tiempo el agua, lo que favorece la infiltración (INAB, 2003).

Según Hernández (2005) los procesos de recarga en las regiones áridas y semiáridas, donde se manifiesta un déficit hídrico, pueden explicarse a partir de seis mecanismos principales que, habitualmente, se producen sincrónicamente:

- a) Reducción real de las pérdidas consuntivas: el clima de la región es árido y consecuentemente, la vegetación es de tipo xerófita. Estas especies están preparadas para obtener únicamente agua para subsistencia, sin generar

evapotranspiración real, ya que su adaptación especializada hizo que carezcan de estomas y presenten adaptaciones especiales como lo son las espinas, cutículas, succulencias, flores efímeras, etc., minimizando toda posibilidad de evapotranspiración. El agua infiltrada de las precipitaciones es en parte absorbida por las plantas aunque en su mínima expresión, pasando el resto al dominio de las aguas subterráneas.

- b) Infiltración rápida: este proceso es habitual ante la presencia de suelos generalmente de alta permeabilidad, la baja o nula retención de los suelos, y la superficie freática profunda.
- c) Concentración rápida: las zonas elevadas permiten un rápido escurrimiento, favorecido por el tipo de litología rocosa y por las pendientes con drenaje encausado, conduciendo el flujo hacia sectores deprimidos (valles aluviales, lagunas, bajos endorreicos). Si bien las precipitaciones suelen ser escasas, la concentración localizada en áreas con permeabilidad permite un incremento en la infiltración hasta de un orden de magnitud respecto a la altura equivalente.
- d) Recarga diferida: este proceso incluye los aportes de agua infiltrada por nieve, heladas y suelos congelados, durante la estación invernal y habitualmente hasta fines de primavera en coincidencia con las mayores temperaturas y los deshielos. Este atributo es muy significativo, ya que ocupa amplias extensiones y suele ocurrir en forma lenta pero constante, alejada de los efectos consuntivos. En otros casos el volumen precipitado durante el invierno en forma de nieve o hielo se derrite, provocando una alta acumulación temporal de agua que favorece los efectos de infiltración.
- e) Influencia de cursos perdedores: como sucede en la gran mayoría de los ríos y arroyos de regiones áridas, los cursos son perdedores. Suelen ser interesantes los acuíferos generados a partir de cursos perennes ante el constante aporte, y su buena calidad. También pueden existir lagos y ríos permanentes, transitorios y efímeros, escurriendo agua únicamente durante o posterior a una tormenta en cortos períodos. Considerando las características del substrato (litología de permeabilidad media a elevada) en que escurren los cursos y los caudales elevados comprometidos, es de esperarse un aporte significativo.
- f) Mecanismos concurrentes: los mecanismos ya mencionados suelen ocurrir en forma coalescente y complementaria, potenciándose así la posibilidad de la recarga a tal punto que permite el desarrollo de áreas con diversos objetivos sean ellos ganaderos, mineros, agropecuarios, poblacionales u otros.

3.3.1 Métodos para estimar la recarga

Los métodos para estimar la recarga son de variada naturaleza, entre los que se destacan los balances hidrológicos, el seguimiento de trazadores ambientales o artificiales (químicos e isotópicos), las mediciones directas en piezómetros, la cuantificación del flujo subterráneo y las fórmulas empíricas entre los más comunes. Los resultados son inespecíficos debido a la incertidumbre de los componentes considerados en las ecuaciones, la naturaleza empírica o semiempírica de las fórmulas utilizadas, la simplificación de las variables y de los procesos y los errores en las mediciones de calibración (Carrica y Lexow, 2004).

Según Vélez Otálvaro y Vásquez Ariza (2019) la recarga puede determinarse por varios métodos y clasificarlos en cinco grupos:

1. Métodos directos: la recarga se mide directamente mediante la construcción de lisímetros. Un lisímetro es un bloque de suelo dotado de dispositivos que permiten

medir el flujo que drena hasta el acuífero. Las medidas directas tienen la ventaja de un balance de masa implícito (Lerner *et al.*, 1990); sin embargo, los métodos de medición directa son costosos y proporcionan únicamente medidas puntuales.

2. Balance hídrico: se determinan los flujos de entrada y de salida de un sistema, y la recarga al acuífero constituye el residuo de la ecuación de balance. Forman parte de este grupo los balances de humedad del suelo, de agua en canales, el método de fluctuaciones del nivel freático, y el que iguala la descarga a la recarga.

Hay diferentes expresiones para calcular la recarga a partir de un balance hídrico según el volumen de control escogido y según las subdivisiones que se hagan a las entradas, salidas o cambios en el almacenamiento. La expresión más sencilla puede ser (1):

$$1. R = P - E_s - ET - \Delta S$$

Siendo:

R = recarga

P = precipitación

E_s = escorrentía

ET = evapotranspiración

ΔS = cambio en el almacenamiento

Esta ecuación es válida si se asume que la recarga es igual al flujo subterráneo o descarga y si se toma la precipitación como única entrada al sistema, luego de asumir que la divisoria de la cuenca coincide con la divisoria de aguas subterráneas y por lo tanto no hay entrada de flujo desde acuíferos vecinos (Freeze y Cherry, 1979).

Los balances hídricos se pueden aplicar a cualquier escala temporal: diaria, mensual, anual, etc. Sin embargo, en zonas áridas y semiáridas la recarga suele concentrarse durante unos pocos eventos individuales extremos de corta duración (Touhami *et al.*, 2013) por lo que los balances mensuales dan estimaciones menos precisas que los diarios (Gatica, 2017).

3. Trazadores: los trazadores son sustancias que se encuentran en el agua y se pueden detectar por medios visuales o analíticos (López Rodríguez, 1997). Sirven para definir caminos preferenciales de flujo (Hendrickx y Walter, 1997), identificar mecanismos responsables de generación de flujo, identificar fuentes de solutos y sistemas de contaminación, calcular el ciclo biológico de nutrientes dentro de un ecosistema, determinar fuentes de recarga, etc. (Kendall y Caldwell, 1998). Los trazadores pueden utilizarse para determinar las fuentes que originan la recarga, donde hacen el papel de señalizadores, o para determinar la cantidad de flujo que alcanza las reservas subterráneas.

La técnica de señalizadores consiste en inyectar un trazador y luego rastrearlo en un área determinada (Lerner *et al.*, 1990). El principio general del método de trazadores es el balance de masa del trazador, en el cual se asume que el agua y el trazador son transportados a la misma tasa. Los principales trazadores son los isótopos, nitratos, bromuros, colorantes, etc.

4. Aproximaciones de Darcy: la estimación de la recarga con la técnica de Darcy consiste en encontrar valores de cargas hidráulicas a partir de las ecuaciones de Richards, en la zona no saturada, y Boussinesq, en la zona saturada, contando con datos de conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y contenido de humedad, y mediante el uso de técnicas analíticas o modelos numéricos, según la simplicidad de las condiciones de campo o la cantidad de simplificaciones asumidas.

Con las cargas hidráulicas se determina la velocidad de filtración o el flujo de agua. Teniendo este valor se halla el caudal y con este último se realiza un balance de

masa con el que se conoce el volumen de agua que entra y sale del sistema y se estima el volumen de agua que queda almacenado en él, el cual equivale a la recarga.

5. Métodos empíricos: Las técnicas empíricas correlacionan la recarga con otras variables hidrológicas que se pueden medir como precipitación, temperatura, elevación, flujo en canales, etc. Esta relación se usa para extrapolar los registros de recarga en el tiempo y transponer los estimativos a otras áreas de recarga de características similares. Este tipo de métodos tiene un grado de validez bastante limitado, ya que expresiones para una cuenca se pueden aplicar a otra solo si hay una gran similitud entre ellas (Samper, 1997).

3.3.2 Factores que afectan la recarga

Hay factores que afectan la recarga hídrica según el INAB (2003):

- a) Clima: los factores que afectan la recarga hídrica son la evapotranspiración, debido a las pérdidas de agua por la transpiración de las plantas y la evaporación del agua y la precipitación.
- b) Suelo: los suelos capturan el agua que proviene de las precipitaciones y las dirige hacia las zonas saturadas. Por ejemplo, los suelos impermeables o compactos impiden o dificultan la infiltración o recarga hídrica, mientras que suelos permeables facilitan la recarga en los acuíferos.

Las características intrínsecas del suelo que influyen en la recarga son:

- i) Porosidad: indica el volumen de huecos (poros) disponibles para el flujo de agua. Existen dos tipos de porosidades: primaria y secundaria. Se denomina primaria a la que resulta al originarse la formación geológica y depende exclusivamente de la heterometría, forma y disposición de los granos, la compactación, cementación y recristalización. En contraste, la porosidad secundaria será cualquier abertura que se produzca posteriormente y, por lo general, son fisuras o fracturas producidas por esfuerzos tectónicos, enfriamiento, planos de descompresión o discontinuidades, etc. (Sánchez San Román, 2014).
 - ii) Textura: está determinada por el tamaño granulométrico de los elementos que integran el suelo, es decir, arena, limo y arcilla. La textura del suelo controla varios comportamientos como la influencia en la fuerza o succión con la que es retenida el agua, el grado de aireación del suelo, la velocidad con la que el agua penetra en el suelo, etc. La infiltración con la que el agua penetra en la superficie terrestre siempre es mayor en los suelos de textura gruesa que en los suelos de textura fina (Núñez, 1981).
 - iii) Estructura: define la forma en la que se unen las partículas minerales y orgánicas que componen el suelo. Estas se unen para constituir agregados elementales dejando espacios vacíos en el suelo que influyen en el grado de aireación, en la capacidad de retención de agua, en la velocidad de infiltración, etc.
 - iv) Profundidad: esta característica condiciona el desarrollo de raíces de las plantas y el volumen de agua que puede almacenar el suelo y poner a disposición de la cubierta vegetal, como así también el volumen de escorrentía superficial.
- c) Topografía o relieve: es la configuración física de la superficie terrestre y es la consecuencia de los procesos geológicos y de meteorización actuantes sobre los materiales geológicos (Matus Silva, 2007). Una de las características más importantes del relieve es la pendiente y modifica el drenaje, la infiltración, profundidad, la susceptibilidad a la erosión, el tiempo de contacto del agua con la superficie, entre otros. Las pendientes fuertes favorecen la escorrentía superficial, disminuyen el tiempo de contacto del agua con la superficie y reducen la infiltración

del agua o recarga de los acuíferos. En las pendientes bajas, aumenta el tiempo de contacto, posibilitando la infiltración de agua.

- d) Geología: según Gatica (2017) la naturaleza y distribución de la recarga de acuíferos en los sistemas geológicos son controlados por la litología, estratigrafía y estructuras de los depósitos de las formaciones geológicas aflorantes. La litología imprime la principal característica física en función del tamaño de grano, el empaquetamiento de los granos de los sedimentos y rocas que componen los sistemas geológicos. Sin embargo la litología, estratigrafía y estructura conducen a la distribución de los acuíferos.

Las rocas son agregados naturales que están formadas por minerales que en su estado sólido presentan un patrón atómico y/o molecular ordenado y tridimensional (Matus Silva, 2007). Las rocas se pueden clasificar según su origen en:

- Sedimentarias: se originan a partir de la erosión, remoción y deposición de fragmentos de rocas ígneas y metamórficas a través de procesos diagenéticos. Además, existen las rocas químicas (carbonáticas) que se originan por la cristalización de sales disueltas.

Dentro de este grupo se encuentran las arenas y las gravas que son las mayores proveedoras de agua ya que poseen una porosidad de entre 30-50%. Las areniscas, arcillas, limos, lutitas y calizas presentan porcentajes de porosidades menores (Tabla 1).

- Ígneas: se originan por la solidificación del magma, fragmentado o compacto, sobre o en el interior de la tierra. Estas pueden ser plutónicas o volcánicas.
- Metamórficas: se originan a partir de rocas ígneas y sedimentarias preexistentes como consecuencia de altas presiones y temperaturas.

Por lo general, tanto las rocas ígneas como metamórficas poseen una porosidad primaria que raramente supera el 2% y, por consiguiente, baja permeabilidad. En el caso de que estas mismas rocas se encuentren en afloramientos, pueden presentar fracturas y fisuras, provocando una porosidad secundaria que permite la infiltración de agua.

	total	eficaz
Arcillas	40 a 60	0 a 5
Limos	35 a 50	3 a 19
Arenas finas, arenas limosas	20 a 50	10 a 28
Arena gruesa o bien clasificada	21 a 50	22 a 35
Grava	25 a 40	13 a 26
Shale intacta	1 a 10	0,5 a 5
Shale fraturada/alterada	30 a 50	
Arenisca	5 a 35	0,5 a 10
Calizas, dolomías NO carstificadas	0,1 a 25	0,1 a 5
Calizas, dolomías carstificadas	5 a 50	5 a 40
Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar	0,01 a 1	0,0005
Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	1 a 10	0,00005 a 0,01

Tabla 1. Valores estimados de porosidad (%). Sanders (1998)

Las rocas ígneas volcánicas pueden presentar vesículas, generando espacios porales que permiten una porosidad primaria. Un ejemplo de este tipo de roca son los basaltos.

- e) Cobertura vegetal: esta disminuye la escorrentía superficial, permitiendo mayor contacto del agua con la superficie y facilitando el proceso de infiltración del agua. Por otro lado, gran parte de la lluvia que cae es depositada en la cobertura vegetal como intercepción y el agua retorna a la atmósfera en forma de vapor por medio del proceso de evapotranspiración. Gatica (2017) indica que la vegetación en las regiones áridas está adaptada al estrés hídrico y ha desarrollado estrategias específicas para la utilización del agua. A pesar del escaso recubrimiento de

vegetación en los ecosistemas áridos, la cubierta vegetal juega un papel importante a la hora de cuantificar la cantidad de agua que llega al subsuelo (Chirino, 2003).

3.4 Sistemas de Información Geográfica

Según Olaya (2020) un SIG es un elemento que permite analizar, presentar e interpretar hechos relativos a la superficie terrestre. Un SIG es un conjunto de *software* y *hardware* diseñado específicamente para la adquisición, mantenimiento y uso de datos cartográficos. El autor también lo define como un sistema de información diseñado para trabajar con datos referenciados mediante coordenadas espaciales o geográficas.

Ha de permitir la realización de las siguientes operaciones:

- Lectura, edición, almacenamiento y, en términos generales, gestión de datos espaciales.
- Análisis de dichos datos. Esto puede incluir desde consultas sencillas a la elaboración de complejos modelos, y puede llevarse a cabo tanto sobre la componente espacial de los datos (la localización de cada valor o elemento) como sobre el componente temático (el valor o el elemento en sí).
- Generación de resultados tales como mapas, información, gráficos, etc.

Los SIG están compuestos por cinco elementos principales que se contemplan tradicionalmente en este aspecto: datos (son la materia prima necesaria para el trabajo y los que contienen la información geográfica vital para la propia existencia de los SIG), métodos (conjunto de formulaciones y metodologías a aplicar sobre los datos), *software* (es necesaria una aplicación informática que pueda trabajar con los datos e implemente los métodos anteriores), *hardware* (equipo necesario para ejecutar el software) y personas (son las encargadas de diseñar y utilizar el *software*, siendo el motor del sistema SIG).

Los modelos geográficos ofrecen una concepción particular del espacio geográfico y sus atributos. Para ello, se emplean los modelos de representación, también denominados modelos de dato. Para un mismo tipo de información existen diversas alternativas en cuanto a la forma de materializar la realidad y plasmar el modelo geográfico concreto. Estas formas se pueden clasificar en dos grupos principales: modelo de representación ráster y modelo de representación vectorial.

En el modelo ráster, la zona de estudio se divide en forma sistemática en una serie de unidades mínimas, denominadas celdas, y para cada una de estas se recoge la información pertinente que la describe. Cada una de las celdas tiene un único valor. La división del espacio en unidades mínimas se lleva a cabo de forma sistemática de acuerdo con algún patrón, de tal modo que existe una relación implícita entre las celdas, ya que estas son contiguas entre sí, cubren todo el espacio y no se solapan. Los dos elementos principales que resultan necesarios para una definición completa de una capa ráster son:

- Una localización geográfica exacta de alguna celda y una distancia entre las celdas para, en base a ellas y en virtud de la regularidad de la malla, conocer las coordenadas para las restantes.
- Un conjunto de valores correspondientes a las celdas.

El otro parámetro necesario junto con la orientación de la malla y la situación geográfica de una de sus celdas es el denominado tamaño de celda o tamaño de píxel, también conocido como resolución, pues, en efecto, su magnitud define la resolución de la capa. Un tamaño de celda mayor implica una menor resolución, y viceversa.

En el modelo vectorial se recoge la variabilidad y las características de la zona de interés mediante entidades geométricas. La forma de estas entidades se codifica de modo explícito. Utilizando puntos, líneas o polígonos, puede modelizarse el espacio geográfico si se asocia una serie de valores definitorios a estas geometrías. La componente espacial

de la información queda así en la propia primitiva (recoge la forma, posición y otras propiedades espaciales), y la componente temática queda en dichos valores asociados.

Los SIG son utilizados por disciplinas relacionadas con el manejo de información espacial, dentro de ella la hidrología. Su mayor potencial radica en la representación de la variabilidad de parámetros espaciales complejos y la realización de operaciones entre ellos facilitando la observación de sus relaciones espaciales, patrones y tendencias (Gatica, 2017).

4. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1 Ubicación geográfica

El área de estudio de este trabajo abarca principalmente al Dorso de los Chihuidos. Sin embargo, el área no solo abarca a esta estructura, sino que también se extiende hacia sus márgenes, tomando parte de las provincias geológicas del Flanco Oriental, la Faja Plegada y Corrida del Agrio y el Engolfamiento Neuquino.

El Dorso de los Chihuidos se encuentra ubicado fundamentalmente en el centro norte, dentro del departamento de Añelo en la provincia de Neuquén, República Argentina. No obstante, el área de estudio también se desarrolla en los departamentos de Pehuenches al norte, Loncopué y Picunches al oeste, Zapala al sur y Confluencia al este (Figura 2).

El área de estudio se desarrolla entre los meridianos 70°0' y 69°10' O y los paralelos 37° y 39° S y cuenta con una superficie total de 10.229 km².

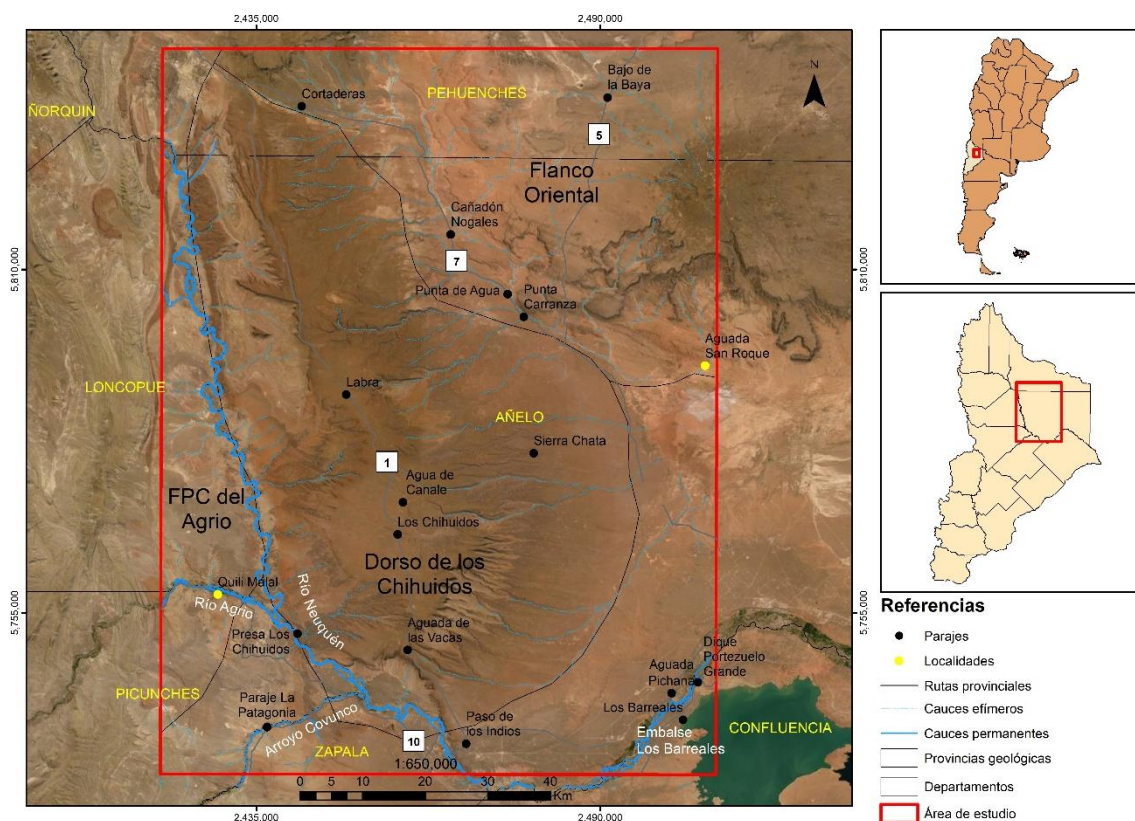


Figura 2. Ubicación del área de estudio

4.2 Clima

Para realizar la caracterización climática del área de estudio se utilizaron distintas estaciones meteorológicas que pertenecen a la Autoridad Interjurisdiccional de las Cuencas de los ríos Limay, Neuquén y Negro (AIC), al Comité Interjurisdiccional del Río Colorado (COIRCO) y a VISTA Energy (Tabla 2) (Figura 3).

Las estaciones de la AIC son Los Maitenes, Balsa Huitrín, Bajada del Agrio y La Higuera y cuentan con datos de precipitación y temperaturas diarias. Las de COIRCO son Yacimiento Entre Lomas y Buta Ranquil. La información brindada por estas estaciones oficiales se encuentra de manera pública en su página web y cuenta con datos de precipitación, temperaturas, humedad relativa, presión y velocidad del viento. La estación perteneciente a VISTA es Borde Montuoso y cuenta con datos de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, dirección del viento, radiación, precipitación y presión barométrica.

Estación	Latitud	Longitud	Fuente	Período
Los Maitenes	37° 19' 8.80" S	70° 16' 43.10" O	AIC	01/01/2009 – 30/04/2022
Balsa Huitrín	37° 40' 3.12" S	69° 58' 39.20" O	AIC	01/05/2008– 30/04/2022
Bajada del Agrio	38° 27' 14.47" S	70° 5' 10.04" O	AIC	01/01/1999 – 30/04/2022
La Higuera	38° 35' 13.27" S	69° 21' 46.69" O	AIC	01/01/1999 – 30/04/2022
Yacimiento Entre Lomas	38° 10' 13" S	68° 3' 6" O	COIRCO	01/06/2015 – 30/04/2022
Buta Ranquil	37° 04' 14" S	69° 45' 16" O	COIRCO	01/05/2015 – 30/04/2022
Borde Montuoso	38° 13' 18" S	68° 31' 3,36" O	VISTA Energy	12/04/2016 – 04/05/2022

Tabla 2. Estaciones hidrometeorológicas que se utilizaron

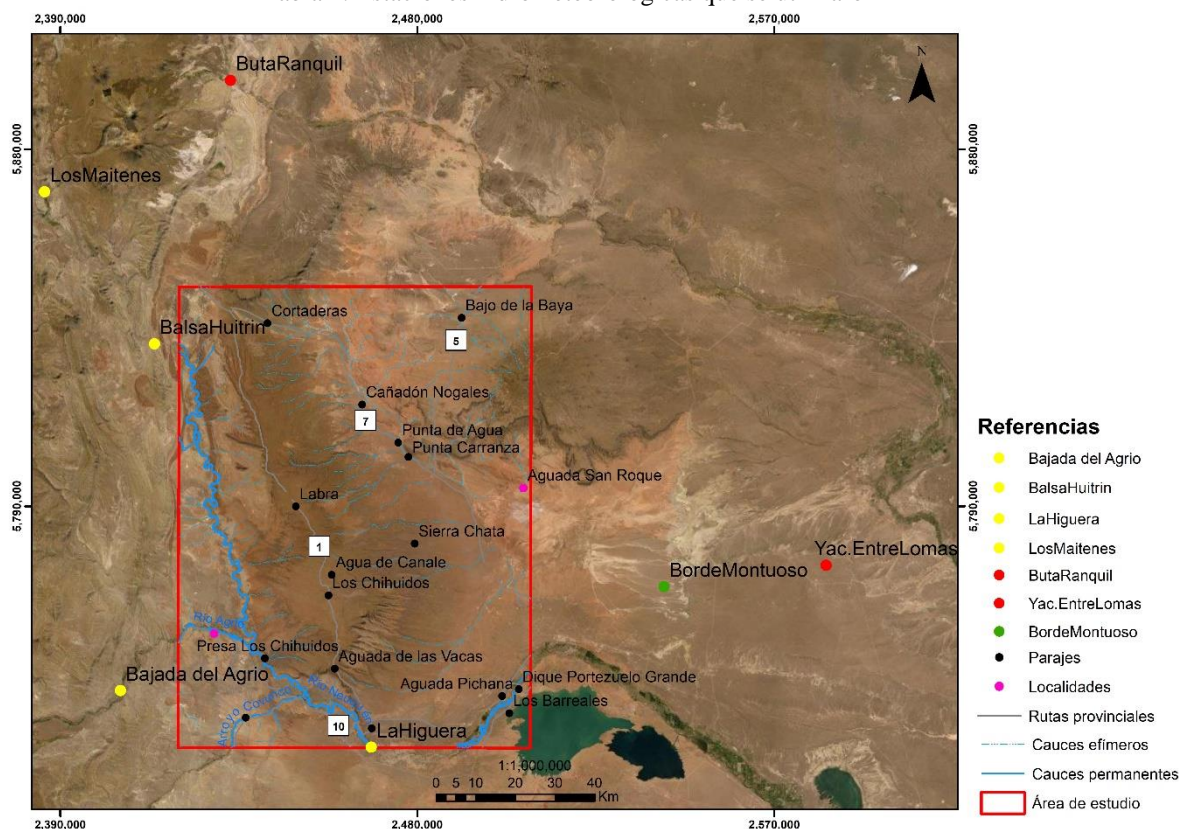


Figura 3. Ubicación de las estaciones hidrometeorológicas utilizadas

En la caracterización climática, y luego de la recarga, se han incluido todas las estaciones disponibles. Puede observarse que las series no coinciden en extensión ni en el período de medición. Sin embargo, bajo el supuesto que los cambios climáticos recientes no han modificado aun significativamente las variables climáticas que afectan la recarga, se espera que las series se repitan cíclicamente a lo largo del tiempo.

El supuesto del comportamiento cíclico de las series de datos se fundamenta con trabajos antecedentes. Por un lado, Paruelo *et al.*, (1998) mencionan que, en la Patagonia, la información climática disponible es escasa y se encuentra en distintas escalas espaciales. Asimismo, no se detecta ninguna tendencia temporal en las tasas anuales de precipitación para el periodo de 1961 – 1996 en la Patagonia. Además, el coeficiente de correlación entre la precipitación media anual y los años de registro, muestran una correlación significativa de los datos.

Por otro lado, Griesser *et al.*, (2006) indican que el *software* New LocClim de FAO es un interpolador que utiliza series climáticas de todo el planeta para estimar

variables climática a partir de series climáticas de diferente longitud de tiempo. Mapas interpolados con este programa fueron utilizados por Gatica (2017) con buenos resultados.

De esta manera se ha utilizado toda la información disponible independientemente de su fecha de medición.

4.2.1 Temperatura

Con los registros de temperatura de las estaciones meteorológicas se realizó una caracterización del régimen térmico de cada una de ellas. La Tabla 3 muestra las temperaturas medias de cada estación como así también los valores mínimos que se registran durante los meses de junio, julio y agosto, y los máximos, durante los meses de diciembre, enero y febrero. Por otro lado, en la Figura 4 se representa el régimen anual de temperatura máxima, media y mínima mensual de cada estación.

Estación meteorológica	Serie de datos	Temperaturas		
		Min. (°C)	Máx. (°C)	Media (°C)
Bajada del Agrio	1999 - 2022	-8,3	31,8	15,3
Balsa Huitrín	2008 – 2022	-10,29	40,3	15,32
La Higuera	1999 – 2022	-9,34	42,07	15,6
Los Maitenes	2009 – 2022	-10,66	39,8	14,1
Buta Ranquil	2015 – 2022	-11,8	50	13,8
Yac. Entre Lomas	2015 – 2022	-7,4	39,1	14,3
Borde Montuoso	2016 - 2022	-6,6	40,9	16,03

Tabla 3. Resumen del régimen térmico de las distintas estaciones



Figura 4. Régimen anual de temperatura máxima, media y mínima mensual de las distintas estaciones

La distribución espacial de temperaturas medias no presenta grandes diferencias en los valores medios anuales (Figura 5). Se observa un incremento de temperaturas de este a oeste, con su pico máximo de temperatura registrado en Borde Montuoso con una isoterma 15,9 °C. Las temperaturas descenden hacia el sudoeste y hacia el noroeste con

la isoterma de 14 °C registrada en las estaciones de Bajada del Agrio y Buta Ranquil, respectivamente.

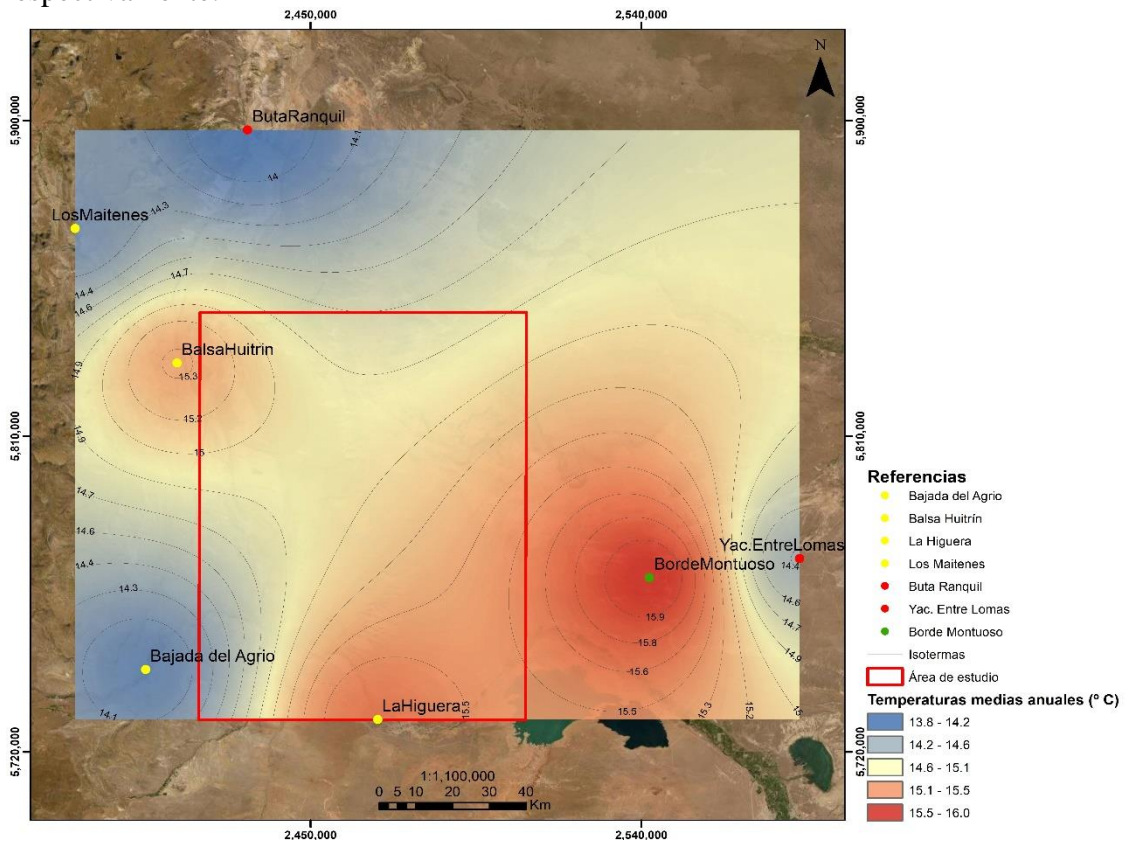


Figura 5. Distribución espacial de temperaturas medias en el área de estudio

4.2.2 Precipitación

En primer lugar, se representaron los datos pluviométricos de cada estación de manera anual con el fin de caracterizar el comportamiento de las precipitaciones medias mensuales. Luego, se representaron de forma diaria con el fin de analizar la variabilidad en el comportamiento de las precipitaciones diarias promedio, mostrando la versatilidad en la distribución de las precipitaciones en regiones áridas, donde un efecto de tormenta puede alterar marcadamente el valor diario esperado.

4.2.2.1 Bajada del Agrio

En la estación Bajada del Agrio, el régimen de precipitación media mensual muestra que la mayor concentración de lluvias ocurre en los meses abril, mayo, junio, julio y agosto con lluvias primaverales durante el mes de octubre. La mayor frecuencia de días con lluvia se registró durante el mes de mayo con un valor de 5 días (Figura 6).

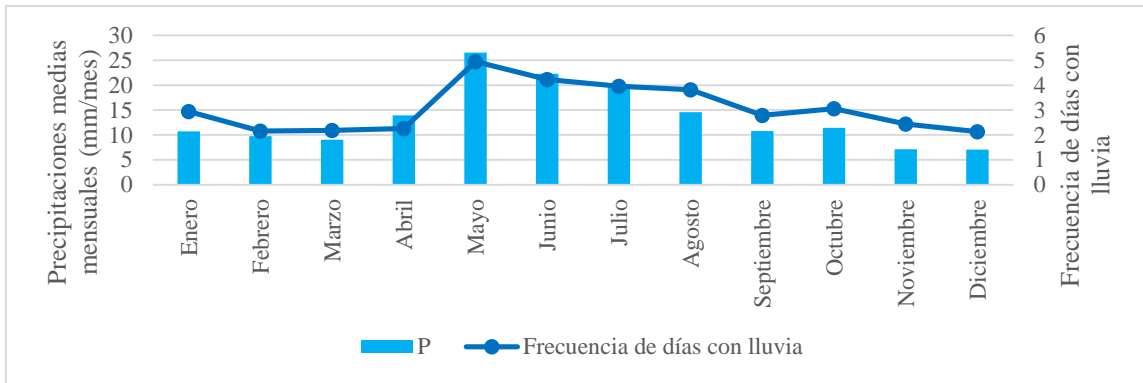


Figura 6. Régimen anual de lluvias. Precipitación media mensual y frecuencia promedio de días con lluvia en Bajada del Agrio (1999-2022)

La mayor parte de los valores de precipitación diarios promedios se posicionan en el rango de 0 a 3 mm/día (Figura 7). En la figura se puede observar que hay una gran variabilidad en el comportamiento de las precipitaciones diarias. El valor medio anual de precipitación es de 162,9 mm con una frecuencia de 29 días con lluvia con un promedio medio diario de 0,44 mm.

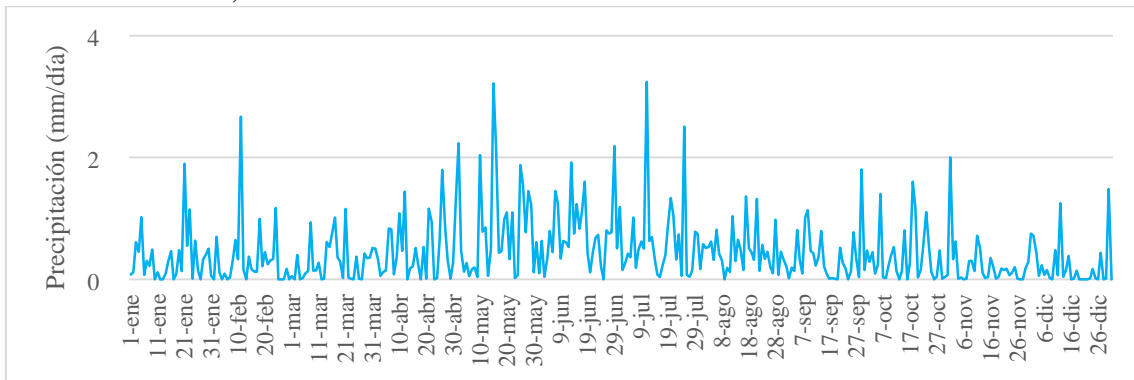


Figura 7. Comportamiento de las precipitaciones diarias promedio de la estación Bajada del Agrio (1999-2022)

4.2.2.2 Balsa Huitrín

En cuanto al análisis del régimen de precipitación media mensual, en la estación Balsa Huitrín las mayores concentraciones de lluvias se observan dentro del mes otoñal de mayo y en los meses invernales de junio, julio y agosto. La mayor frecuencia de días con lluvia se registró durante los meses de junio y julio con un valor máximo de 6 días (Figura 8).

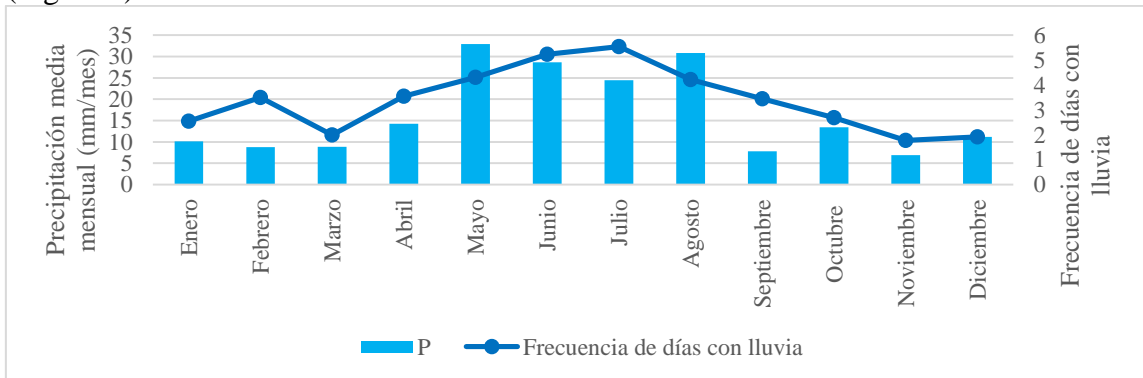


Figura 8. Régimen anual de lluvias. Precipitación media mensual y frecuencia promedio de días con lluvia en Balsa Huitrín (2008 – 2022)

Según la Figura 9 se puede observar que la mayor parte de los valores se posiciona en el rango de 0 a 2 mm/día. El valor medio anual de precipitación es de 198,9 mm con una frecuencia de 31,26 días con lluvia. El promedio medio diario es de 0,54mm.

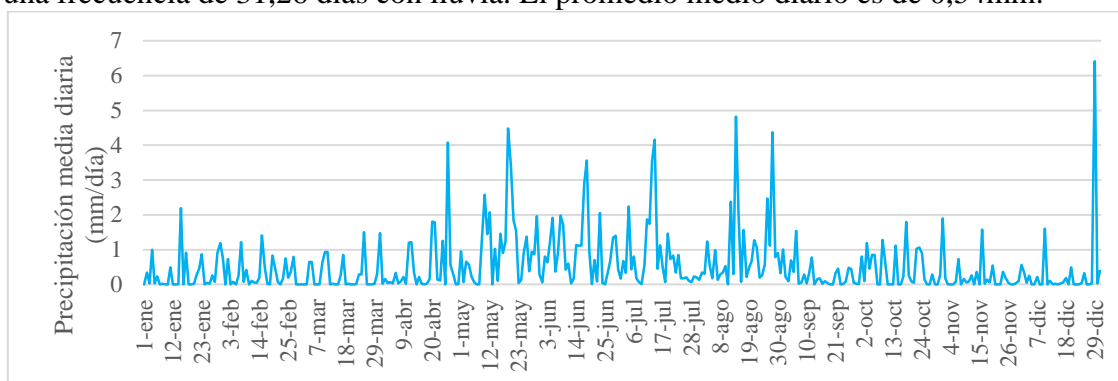


Figura 9. Comportamiento de precipitaciones diarias promedio de la estación Balsa Huitrín (2008 – 2022)

4.2.2.3 La Higuera

En la estación La Higuera se puede observar que la precipitación media mensual posee una mayor concentración de lluvias en los meses de abril, mayo, junio, julio con lluvias primaverales durante septiembre y octubre. La mayor frecuencia de días con lluvia se da en el mes de mayo y en septiembre con un valor máximo de 5 días de lluvia mensuales (Figura 10).

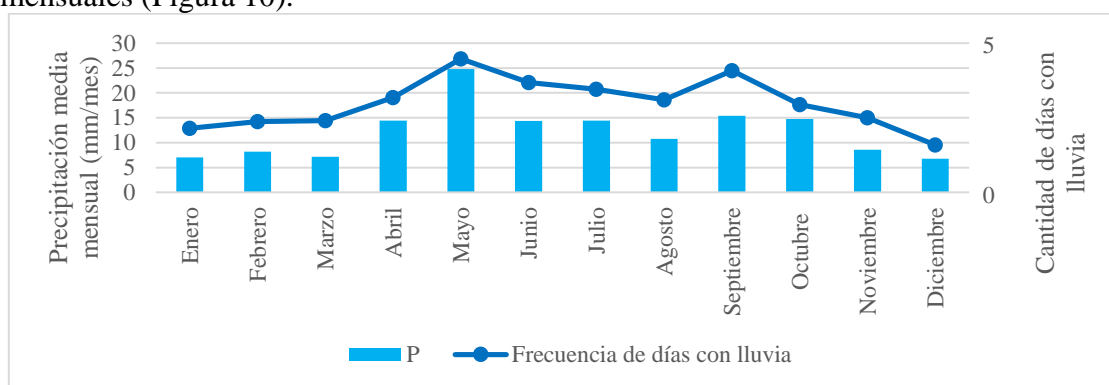


Figura 10. Régimen anual de lluvias. Precipitación media mensual y frecuencia promedio de días con lluvia en La Higuera (1999-2022)

La mayor parte de los valores se posiciona en el rango de 0 a 1 mm/día. El valor medio anual de precipitaciones es de 146,59 mm con una frecuencia de 29 días de lluvia, mientras que el promedio medio diario es de 0,40 mm (Figura 11).

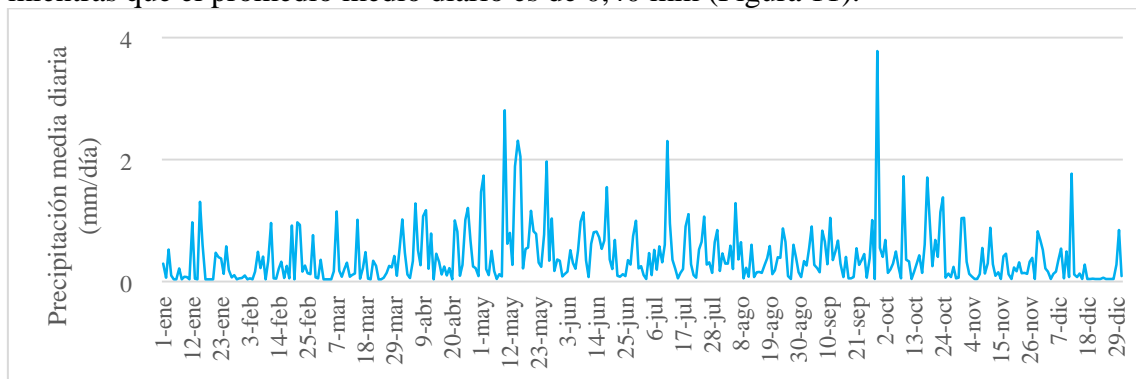


Figura 11. Comportamiento de las precipitaciones anuales de la estación La Higuera (1999-2022)

4.2.2.4 Los Maitenes

En la estación Los Maitenes se puede observar que en el régimen de precipitación media mensual los meses con mayor cantidad concentración de precipitación son mayo, junio, julio y agosto. La mayor frecuencia de días con lluvia se da en el mes de junio y en septiembre con un valor máximo de 6 días (Figura 12).

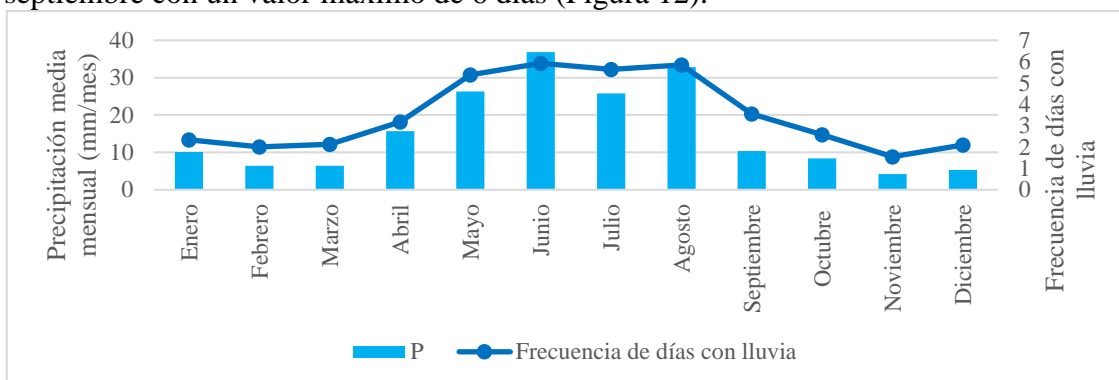


Figura 12. Régimen anual de lluvias. Precipitación media mensual y frecuencia promedio de días con lluvia en Los Maitenes (2009-2022)

La mayor parte de los valores se posiciona en el rango de 0 a 2 mm/día (Figura 13). El valor medio anual de precipitación acumulada es de 188,6 mm con una frecuencia de 35 días con lluvia. El promedio medio diario de precipitación es de 0,51 mm.

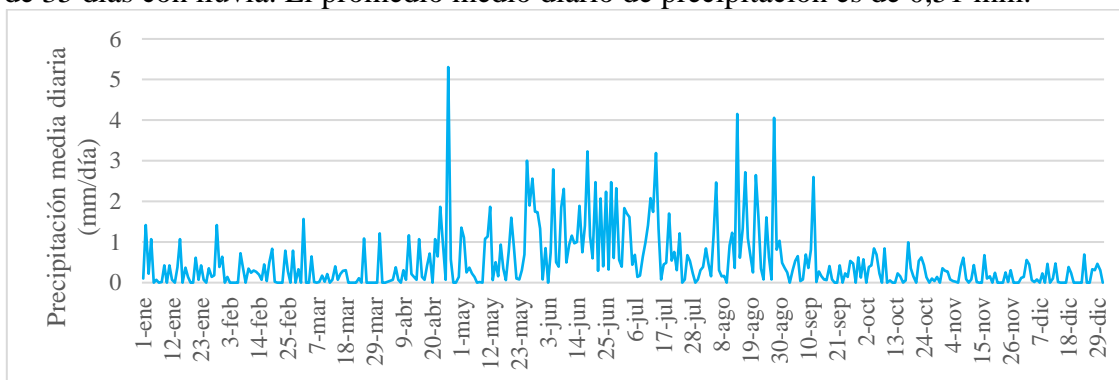


Figura 13. Comportamiento de las precipitaciones diarias promedio de la estación Los Maitenes (2009 - 2022)

4.2.2.5 Buta Ranquil

En la estación Buta Ranquil, los meses con mayor concentración de lluvias son julio y agosto, con lluvias primaverales en octubre y estivales en enero. Sin embargo, el pico de la mayor frecuencia de días con lluvia se da en el mes de marzo y luego, picos menos marcados ocurren en los meses de mayo y octubre (Figura 14).

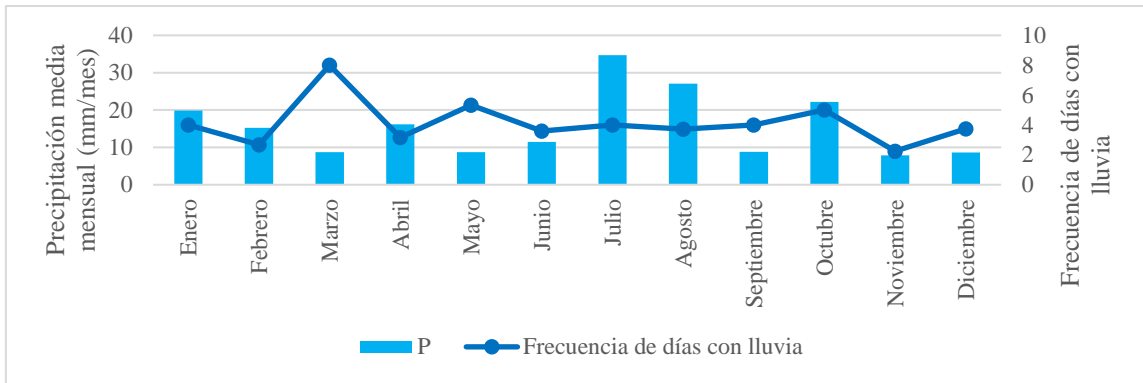


Figura 14. Régimen anual de lluvias. Precipitación media anual y frecuencia promedio de días con lluvia en Buta Ranquil (2015 - 2022)

La mayor parte de los valores se posiciona en el rango de 0 a 3 mm/día (Figura 15). El valor medio anual de precipitación es de 189,5 mm con una frecuencia de 27 días con lluvia, mientras que el promedio medio diario es de 0,51 mm.

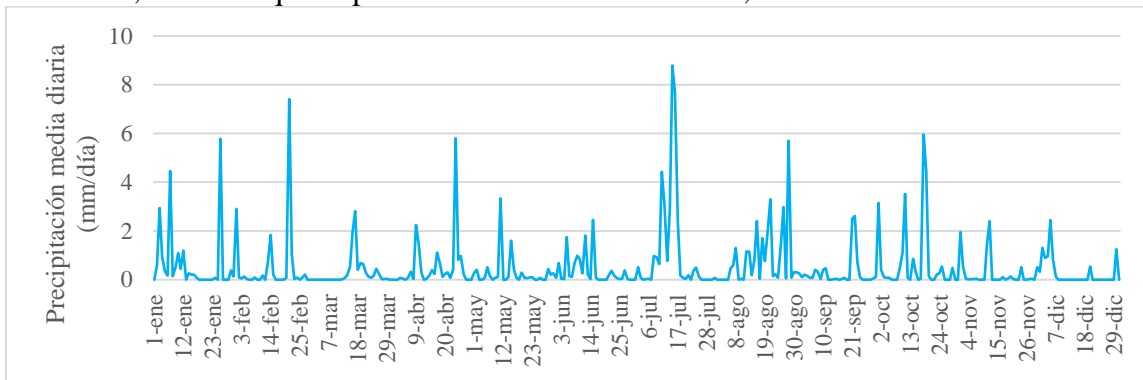


Figura 15. Comportamiento de las precipitaciones diarias promedio de la estación Buta Ranquil (2015-2022)

4.2.2.6 Yacimiento Entre Lomas

En cuanto al régimen de precipitación media mensual de la estación Yacimiento Entre Lomas, se puede observar que la mayor concentración de lluvias se da en los meses de mayo, junio, julio, octubre y enero. El pico de la mayor frecuencia de días con lluvia coincide con la mayor cantidad de precipitación y se da en el mes de mayo, mientras que también hay frecuencia alta en los meses de junio, julio, octubre y enero (Figura 16).

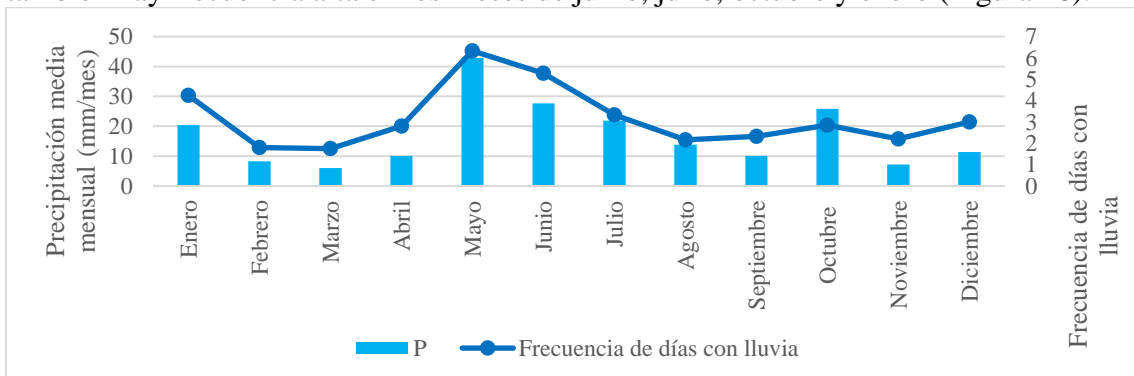


Figura 16. Régimen anual de lluvias. Precipitación media mensual y frecuencia promedio de días con lluvia en Yacimiento Entre Lomas (2015 - 2022)

La mayor parte de los valores se posiciona en el rango de 0 a 3 mm/día (Figura 17). El valor medio anual de precipitación es de 205,2 mm con una frecuencia de 30 días de lluvia, mientras que el promedio medio diario es de 0,56 mm.

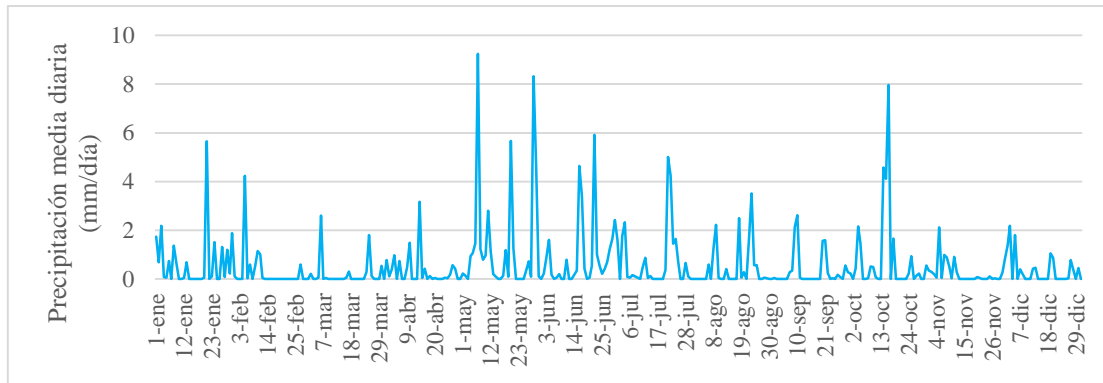


Figura 17. Comportamiento de las precipitaciones diarias promedio de la estación Yacimiento Entre Lomas (2015-2022)

4.2.2.7 Borde Montuoso

El régimen de precipitación de la estación Borde Montuoso muestra que la mayor concentración de lluvias ocurre en febrero, marzo y agosto. Sin embargo, el pico de la mayor frecuencia de días con lluvia no es coincidente con la mayor cantidad de precipitación y se da en el mes de agosto, mientras que también hay frecuencia alta en los meses de marzo y abril (Figura 18).

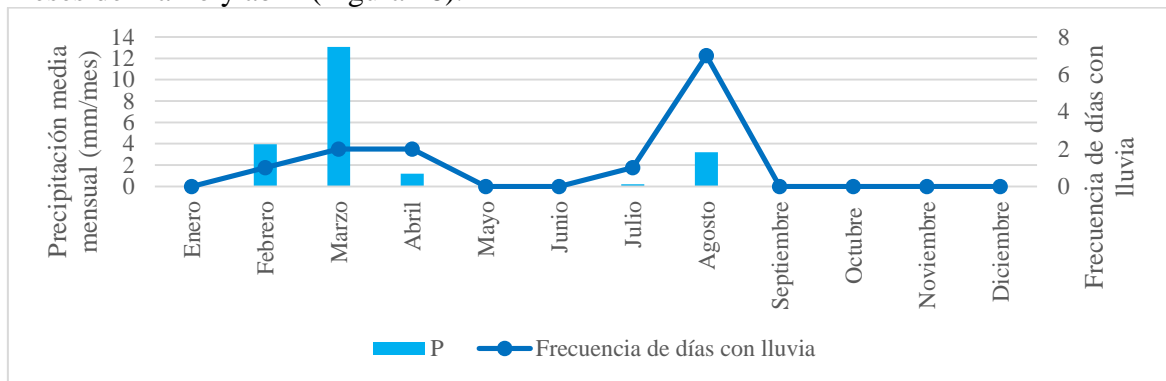


Figura 18. Régimen anual de lluvias. Precipitación media mensual y frecuencia promedio de días con lluvia en Borde Montuoso (2016-2022)

La mayor parte de los valores se posiciona en el rango de 0 a 1 mm/día. Sin embargo, se puede observar que en esta estación, a diferencia de las otras, existen valores muy bajos de precipitación y solo algunos picos, siendo el mayor durante el mes de febrero. Los picos restantes, con valores mucho menores, ocurren durante los meses de abril, julio y agosto (Figura 19). El valor medio anual de precipitación es de 21,67 mm con una frecuencia de 4 días de lluvia, mientras que el promedio medio diario es de 0,05 mm.

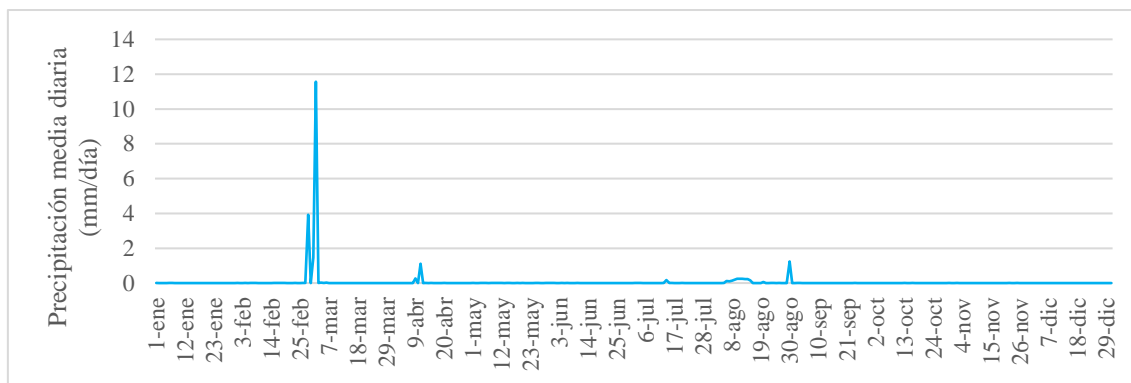


Figura 19. Comportamiento de las precipitaciones diarias promedio de la estación Borde Montuoso (2016-2022)

4.2.3 Humedad relativa

Para analizar la humedad relativa del área de estudio hay que destacar que sólo las estaciones que cuentan con este dato son Buta Ranquil, Yacimiento Entre Lomas y Borde Montuoso.

El comportamiento de los valores medios mensuales de humedad relativa se pueden observar en la Figura 20. En términos generales, las estaciones Yacimiento Entre Lomas y Borde Montuoso tienen un comportamiento similar, con un mayor porcentaje de humedad relativa en los meses invernales, lo cual se correlaciona con la mayor frecuencia de días con lluvia. En el caso del comportamiento de la estación Buta Ranquil, es distinto. En este caso se puede observar que el pico máximo de humedad relativa se da en el mes de abril, el cual coincide también con los picos de máxima precipitación.

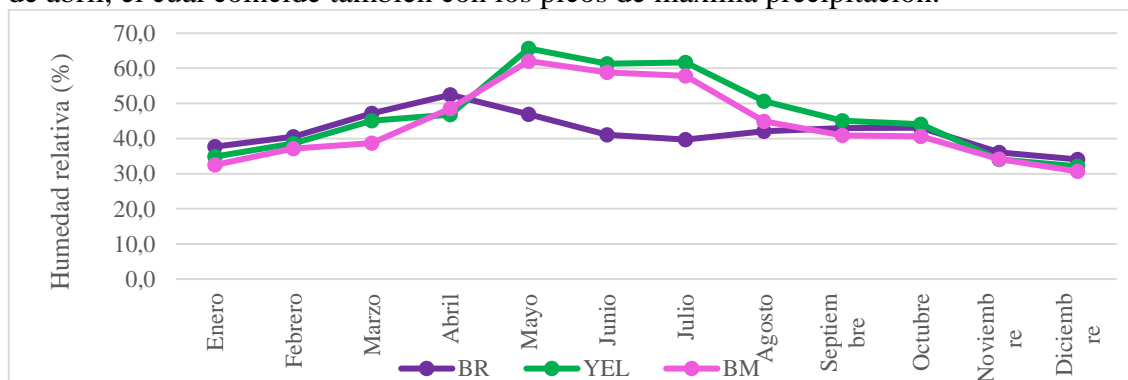


Figura 20. Humedad relativa media mensual. BR: Buta Ranquil, YEL: Yacimiento Entre Lomas, BM: Borde Montuoso

4.2.4 Viento

Para el caso de los vientos en el área de estudio se cuenta con los datos de las estaciones Buta Ranquil, Yacimiento Entre Lomas y Borde Montuoso.

En la provincia de Neuquén el viento es un factor meteorológico de gran importancia y su presencia se da durante todo el año. Beaufort clasifica a los vientos de acuerdo a los rangos de velocidad:

- Suaves: 6,1-18 km/h
- Moderados: 18,1-35 km/h
- Fuertes: 35,1-54 km/h
- Temporal: más de 55 km/h

Teniendo en cuenta esta clasificación, se puede decir que la estación Buta Ranquil tiene una velocidad media suave, Yacimiento Entre Lomas posee velocidades moderadas y Borde Montuoso velocidades suaves (Tabla 4).

Estaciones meteorológicas	Viento	
	Ráfaga máx. (km/h)	Velocidad media (km/h)
Buta Ranquil	150	16,6
Yacimiento Entre Lomas	82,6	32,2
Borde Montuoso	45,0	15,0

Tabla 4. Caracterización de viento

A grandes rasgos, se puede interpretar que las velocidades mayores ocurren de agosto a enero y las menores en los meses de marzo a junio (Figura 21).

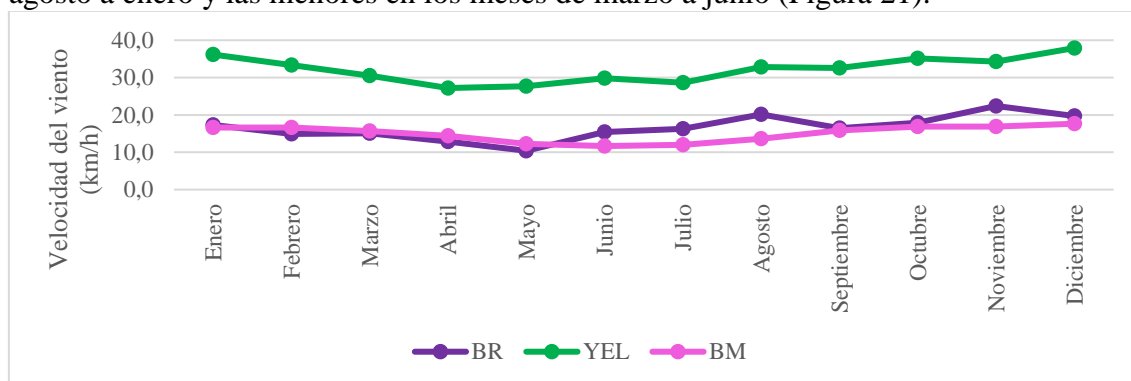


Figura 21. Comportamiento del viento. BR: Buta Ranquil, YEL: Yacimiento Entre Lomas, BM: Borde Montuoso

4.2.5 Evapotranspiración

Como se puede observar en la Tabla 5, los valores de precipitaciones y de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) en el área de estudio, presentan un marcado déficit hídrico anual. Sin embargo, Gatica (2017) indica que la distribución de las precipitaciones no es homogénea, sino que las mayores láminas se producen durante los meses de otoño e invierno, cuando la evapotranspiración del cultivo de referencia es baja, permitiendo así intervalos de excedentes hídricos, que podrían recargar los acuíferos en períodos más cortos.

Estaciones meteorológicas	Precipitación (mm)	Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm)
Bajada del Agrio	162,94	1344,45
Balsa Huitrín	198,18	1290,48
La Higuera	146,59	1298,93
Los Maitenes	188,61	1368,99
Buta Ranquil	189,52	1075,67
Yacimiento Entre Lomas	205,28	2213,68
Borde Montuoso	21,67	1482,77

Tabla 5. Valores acumulados anuales de precipitación vs. evapotranspiración del cultivo de referencia de las distintas estaciones

Cabe destacar que los valores de evapotranspiración de la Tabla 5 fueron calculados en el apartado 5.2.3. En las estaciones de Bajada del Agrio, Balsa Huitrín, La Higuera, Los Maitenes y Buta Ranquil se utilizó el método de estimación de Hargreaves y en las estaciones de Yacimiento Entre Lomas y Borde Montuoso el método de Penman-Monteith.

4.3 Suelo

En la provincia de Neuquén se han reconocido suelos pertenecientes a 8 Órdenes. De ellos, los 4 dominantes son Entisol, Aridisol, Molisol y Andisol. Los 4 restantes, subordinados a los primeros, son Inceptisol, Alfisol, Histosol y Vertisol. Asimismo, los Entisoles son los que revisten mayor importancia areal en la provincia, ocupando aproximadamente el 35 % de su superficie (Pereyra *et al.*, 2011).

En el área de estudio se han distinguido los órdenes de suelos Entisol y Aridisol y, por otro lado, afloramientos rocosos (Figura 22).

Los suelos Entisoles se ubican en regiones áridas y son de escaso a nulo grado de desarrollo pedogenético, carentes de horizontes diagnósticos, con perfiles muy simples (A/C) y abundantes rasgos heredados de los materiales parentales. Aparecen en zonas de taludes, pendientes controladas por remoción en masa, terrazas fluviales recientes, planicies aluviales y en abanicos aluviales que conforman el piedemonte de los sistemas serranos precordilleranos. Poseen alta susceptibilidad a la erosión hídrica. En general, son suelos profundos y muy permeables, pobres en materia orgánica con baja retención hídrica.

Los Aridisoles ocupan el segundo lugar en extensión en la provincia de Neuquén. Son suelos de regiones áridas con condiciones climáticas imperantes. Dado que se encuentran bajo condiciones de déficit hídrico la mayor parte o totalidad del año, es frecuente que estos suelos presenten acumulaciones salinas, calcáreas o bien yesosas cerca de la superficie y se caracterizan por un horizonte superficial claro y pobre en materia orgánica.

En cuanto a los afloramientos rocosos, FAO (2009) los define como la exposición de roca madre y dependen del porcentaje de cobertura en la superficie y del tamaño, espaciamiento y dureza de la roca.

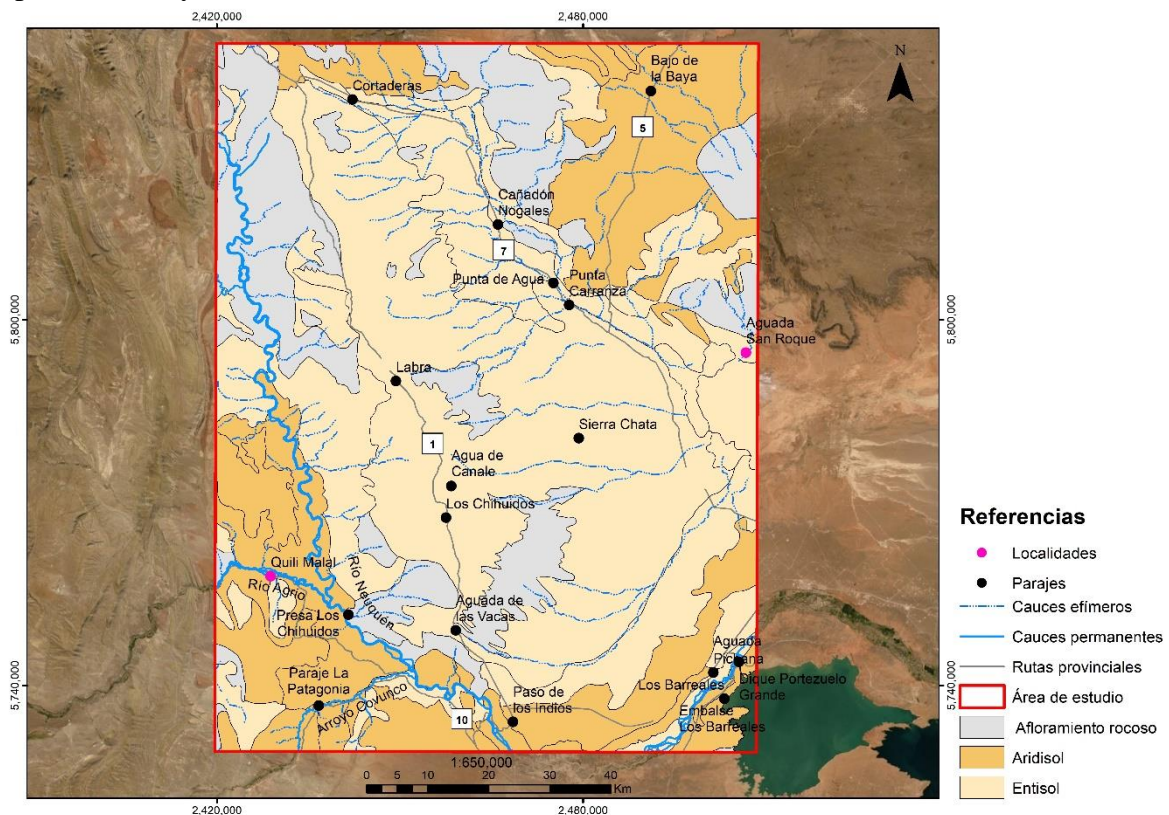


Figura 22. Tipos de suelo en el área de estudio (Irisarri, 2006)

4.4 Vegetación

Movía *et al.* (2007) definen que en la provincia de Neuquén se distinguen tres tipos de formaciones vegetales: bosques, estepa arbustiva herbácea y estepa arbustiva.

Dentro del área de estudio se pudieron identificar tres tipos de formaciones vegetales: estepa arbustiva y estepa herbácea arbustiva y mosaicos (Figura 23).

La estepa arbustiva se desarrolla en suelos poco desarrollados y con precipitaciones menores a los 200 mm anuales. En esta se pueden encontrar arbustos bajos distribuidos de manera tal que dejan una gran porción de suelo desnudo. Las especies que se encuentran pueden ser *Larrea divaricata* (jarilla hembra), *Larrea cuneifolia* (jarilla macho) y *Larrea nítida* (jarilla crespá), *Atriplex lampa* (zampa), *Colliguajaintegerrima*, *Verbena glauca* y vegetación de huayquerías y bardas.

En cuanto a la estepa herbácea arbustiva, se encuentra en la zona más elevada del Dorso de los Chihuidos, donde las precipitaciones se encuentran entre los 500 a 200 mm anuales, con especies como *Mulinum spinosum* (neneo), *Stipassp* (estopa), *Grindeliachiloensis*, *Acantholippiaseriphoides*, *Findelia*, *Fragaria chiloensis*, *Cassia Kurtz*, entre otros.

Por último, se encuentran las zonas mosaicos que se ubican en las cárceles y cuenta con vegetación de bardas con *Larrea divaricata* y vegetación de llano aluvial de grandes ríos y arroyos.

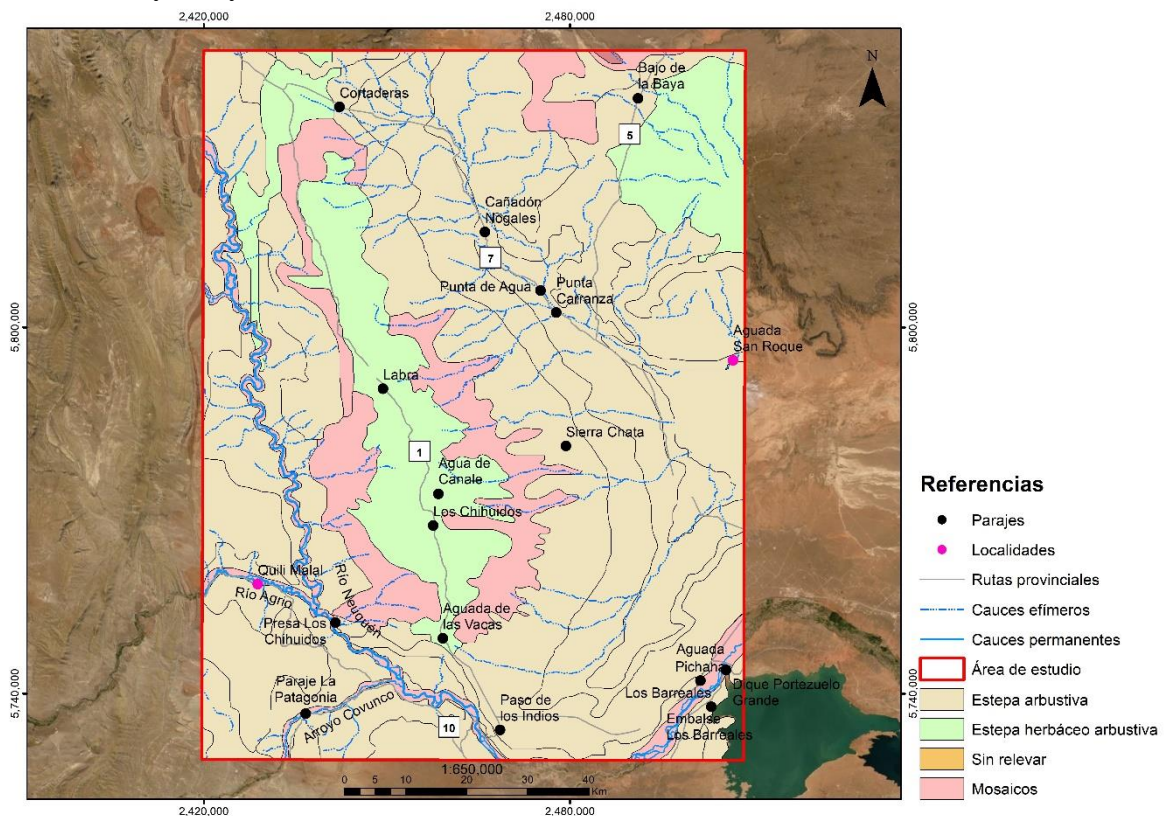


Figura 23. Estructuras fisiográficas de la vegetación (Movía *et al.*, 2007)

4.5 Geología

Leanza y otros (2001) definieron al Dorso de los Chihuidos como una gran estructura positiva (15 a 20 km de ancho) dentro del ámbito de la Cuenca Neuquina. Esta ha sido interpretada como un gran anticlinorio en superficie, reconociéndose como la estructura más conspicua en el sector abarcado por el anticlinal del cerro Mangrullo y al anticlinal de Los Chihuidos Sur. Mientras que su flanco occidental es empinado, su flanco oriental se caracteriza por resolverse en una configuración en terrazas. El eje de las

terrazas se localiza por una disminución de la suave pendiente de sus flancos (2 a 3 grados), horizontalizándose para retomar una suave inclinación hacia el este. Estas pequeñas variaciones en la inclinación han favorecido la exhumación de la Formación Rayoso subyacente.

El origen de esta estructura se daría tentativamente a través del control del basamento por el proceso de inversión tectónica, el cual se estima estuvo favorecido por la existencia de posibles anisotropías previas.

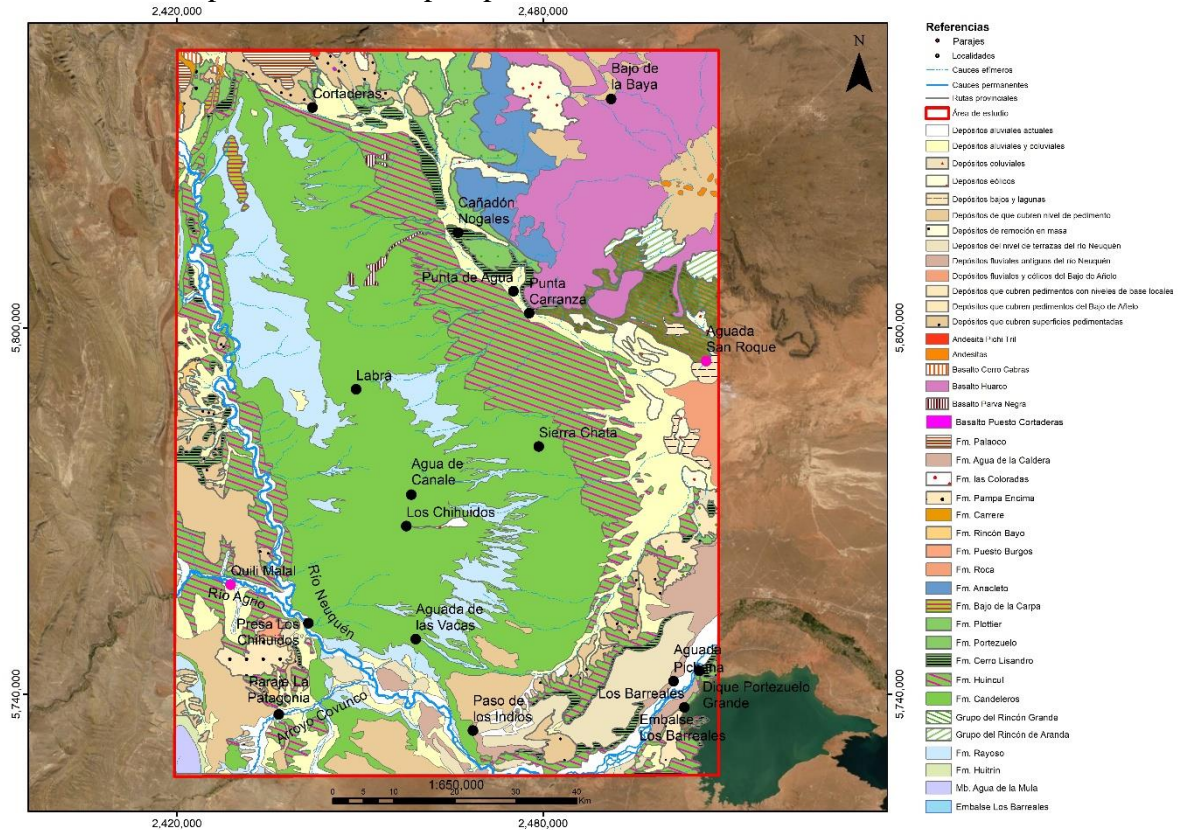


Figura 24. Unidades litoestratigráficas (Leanza *et al.*, 2001; Rodríguez *et al.*, 2007; Ramos, 1981; Holmberg, 1964)

En el área de estudio afloran unidades litoestratigráficas con edades que van desde el Cretácico Inferior hasta el Holoceno (Figura 24). La columna estratigráfica comienza con el Miembro (Mb.) Agua de la Mula de la Formación (Fm.) Agrio de edad Barremiano inferior, conformada por pelitas marinas en un ambiente de *off-shore*. Estas son cubiertas paraconcordantemente por las calizas y dolomías regresivas de la Fm. Huitrín. Por encima, se encuentra la Fm. Rayoso, que está conformada por intercalaciones de areniscas, fangolitas y evaporitas continentales con influencia periódica del medio marino. Esta unidad se encuentra aflorando en las zonas de las cárceles del Dorso de los Chihuidos.

Durante el Cretácico Superior se deposita el Grupo (Gpo.) Neuquén en el área de estudio. Mediante la Discordancia Miránica Principal se deposita la Fm. Candeleros por sobre la Fm. Rayoso. La Fm. Candeleros aflora en la región central del Dorso de los Chihuidos y está conformada por conglomerados, areniscas y fangolitas de ambientes fluviales. Esta se distingue morfológicamente por estar constituida por potentes bancos duros que sobresalen en los faldeos determinando paisajes escalonados. Durante el Cenomaniano superior se depositan las areniscas y fangolitas amarillentas de la Fm. Huincul. Sobre esta se deposita la Fm. Cerro Lisandro, que se caracteriza por fangolitas y arcilitas de color rojo oscuro asociadas a un ambiente de planicie fangosa. Luego, se observa el SubGpo. Río Neuquén con sus Fms. Portezuelo y Plottier, las cuales son

conglomerados, areniscas y fangolitas de ambiente fluvial con río anastomosados. El SubGpo. Río Colorado, depositado durante el Santoniano-Campaniano inferior y caracterizado por areniscas y fangolitas, aflora con las Fms. Bajo de la Carpa, al oeste, y Anacleto, al este.

Durante el Cenozoico, particularmente en el Paleógeno, se deposita la Fm. Puesto Burgos, cuya litología son tobas, tufitas y arcilitas, depositadas en un ambiente lacustre y, simultáneamente, un hábitat de caída de cenizas volcánicas. Discordantemente, se encuentra la Fm. Rincón Bayo de edad Mioceno, caracterizada por sedimentitas de naturaleza epi y piroclásticas. Por encima, se puede encontrar la Fm. Carrere (o Fm. Carrancul) en el oeste del área de estudio, formada por andesitas, tobas y aglomerados volcánicos de ambiente efusivos y productos piroclásticos de edad Plioceno. Por encima, se pueden encontrar las manifestaciones basálticas del Basalto Cerro Cabras en la región noroeste. Por otro lado, se depositan los conglomerados y areniscas gruesas de la Fm. Pampa Encima de edad Neógena. Durante el Pleistoceno se deposita la Fm. Las Coloradas, que se compone por conglomerados, areniscas y fangolitas de ambientes de *out wash plains*. Por encima, se deposita la Fm. Agua de la Caldera que son conglomerados, areniscas y tufitas de ambiente fluvial. Además, se pueden encontrar mantos basálticos como el Basalto Huarco, que corresponde a vulcanitas de una extensa meseta basáltica que corresponde al volcán Auca Mahuida y que se encuentra en el extremo noreste del área de estudio. Asimismo, sobre el Dorso de los Chihuidos, se observan los derrames basálticos de un conjunto de aparatos volcánicos que corresponden al Basalto Parva Negra.

Por encima, se encuentran los depósitos de conglomerados, gravas y arenas, con mayor o menor proporción de limos, como los Depósitos del nivel de terrazas del río Neuquén, Depósitos que cubren el nivel de pedimentos, Depósitos de remoción en masa, Depósitos fluviales antiguos, entre otros y depósitos de gravas, arenas y limos como los Depósitos fluviales y eólicos, coluviales y aluviales actuales.

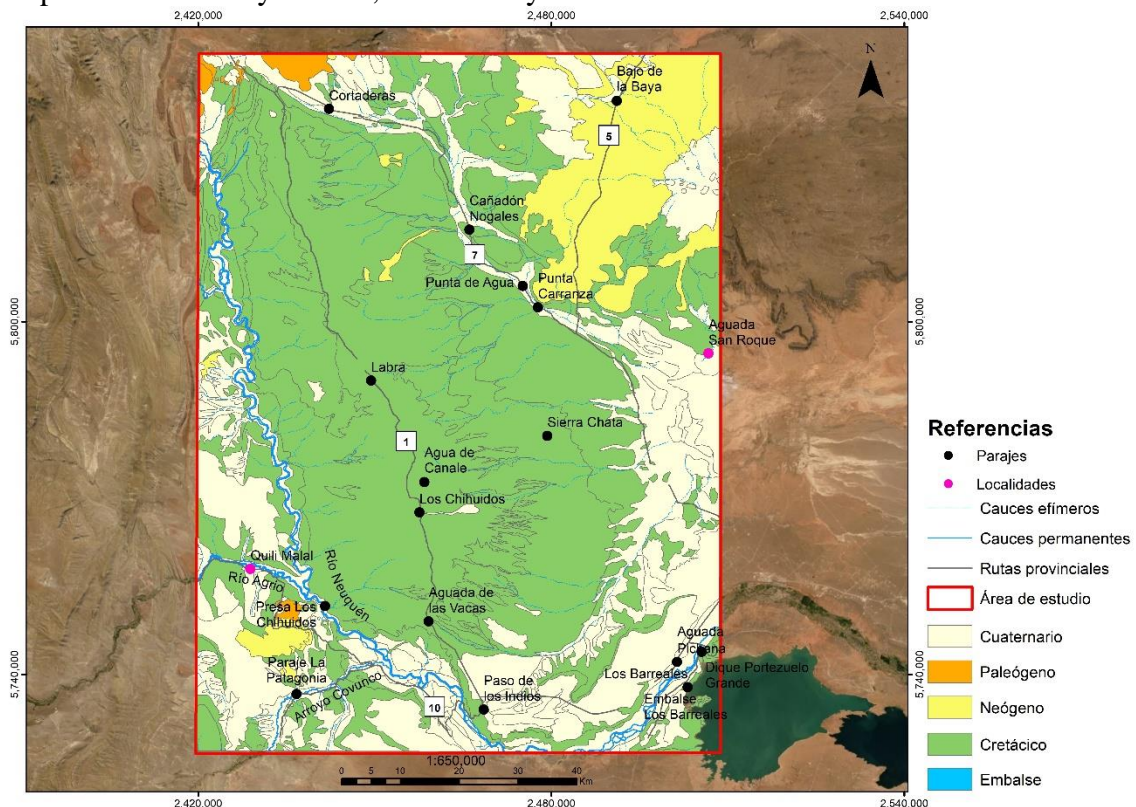


Figura 25. Unidades geológicas según su periodo de deposición (Leanza *et al.*, 2001; Rodríguez *et al.*, 2007; Ramos, 1981; Holmberg, 1964)

Sin embargo, a efectos de aplicar el método de Matus Silva (2007) para estimar la recarga hídrica, la geología del área de estudio se caracterizará en cuanto a los períodos de cada unidad litoestratigráfica (Figura 25). Las unidades más antiguas del área de estudio, se encuentran en la región central y son de edad Cretácica, que corresponden a las Fms. Rayoso y Candeleros. Por otro lado, en la región noreste se encuentran los afloramientos neógenos con algunos asomos en la región central y suroeste que corresponden a derrames basálticos. Además, en el noroeste se observan algunos asomos de unidades de edad Neógeno. Por último, al oeste y al este afloran unidades de edades cuaternarias que corresponden a los depósitos actuales.

4.5.1 Unidades litoestratigráficas con interés hidrogeológico

Las unidades que tienen interés hidrogeológico y que se definirán en este trabajo son la Fm. Rayoso del Cretácico Inferior y el Gpo. Neuquén del Cretácico Superior.

La Fm. Rayoso fue definida por primera vez por Herrero Ducloux (1946) como todo el conjunto de capas que siguen en concordancia sobre el Yeso de Transición y que hacia arriba están limitadas por la Discordancia Intersenoniana. Esta formación cubre en paraconcordancia al Miembro Salina de la Formación Huitrín. A su vez, es cubierta por la Fm. Candeleros, mediando entre ambas unidades la Discordancia Miránica Principal (Intercretácica o Intersenoniana de previos autores). Asimismo, es una unidad clástico-evaporítica, compuesta por areniscas finas, limonitas, carbonatos y evaporitas, de hasta 1200 m de espesor y de 15.000 km² de distribución.

Zavala y Ponce (2011) la definieron como una espesa unidad estratigráfica acumulada en amplios sectores del centro-oeste de la Cuenca Neuquina. Esta unidad se compone por una sucesión de hasta 1200 m de areniscas finas, pelitas rojas, carbonatos y evaporitas, acumuladas en un medio predominantemente continental, el cual marca la desconexión definitiva de la Cuenca Neuquina con el paleo-océano Pacífico. Además, estos autores determinaron que la Fm. Rayoso se habría acumulado en un lago somero perenne de salinidad variable. Los cuerpos arenosos principales de la unidad habrían sido transferidos hacia el interior de cuenca por flujos hiperpícnicos de larga duración, originados por descargas fluviales extraordinarias.

Leanza (2003) define que la Fm. Rayoso contiene cuatro miembros: Rincón, Quili Malal, Pichi Neuquén y Cañadón de la Zorra (Figura 26). El primero, está representado por una sucesión alternante de psamitas y fangolitas con intrecalaciones de limonitas calcáreas. El segundo, se distingue por sus niveles fangolíticos con intercalaciones de yeso. El Mb. Pichi Neuquén son areniscas castaño rojizas. El último miembro está constituido por areniscas y fangolitas con intercalaciones de niveles yesíferos.

Groeber (1946)		Herrero Ducloux (1946)		Uliana, Dellapé y Pando (1975)		Legarreta & Boll (1982)		Leanza (2003)		Zavala et al. (2006), este trabajo.									
Neuqueniano		Formación del Neuquén		Grupo Neuquén		Grupo Neuquén		Grupo Neuquén		Grupo Neuquén									
Diamantiano		Formación Rayoso		Grupo Rayoso Fm. Huitrín		Formación Rayoso sección clástica sección evaporítica		Grupo Bajada del Agrio Formación Rayoso		Formación Rayoso		Secuencia R3							
												Secuencia R2							
Rinconense		"Yeso de transición"		Fm. Huitrín		Formación Rayoso		Formación Huitrín		Grupo Bajada del Agrio Formación Rayoso		Secuencia R1							
Salinense												Secuencia R1							
Toscuense												Miembro La Tosca		Miembro La Tosca		Miembro La Tosca		Miembro La Tosca	
Troncosenense												Miembro Troncoso		Miembro Troncoso		Miembro Troncoso		Miembro Troncoso	
Chorreadense		Fm. AGRIO		Formación Agrio		Fm. Huitrín		Formación Agrio		Formación Agrio		Miembro Troncoso							
Agrioense												Formación Agrio		Formación Agrio		Formación Agrio		Formación Agrio	

Figura 26. Esquema estratigráfico propuesto para la Fm. Rayoso por diversos autores (Zavala y Ponce, 2011)

El Gpo. Neuquén fue definido como tal por Stipanovic *et al.* (1968), sin embargo, diversos autores ya habían reconocido y estudiado estas sedimentitas continentales a las cuales llamaron “Fm. Areniscas Rojas” (Roth, 1899), “Estratos con Dinosaurios” (Keidel, 1917), “*Neuquén Formation*” (Weaver, 1931), entre otros.

Garrido (2010) define al Gpo. Neuquén como una sucesión de depósitos continentales de origen fluvial, eólico y lacustre somero, entre el Cenomaniano Inferior y el Campaniano Medio. Esta sucesión alcanza un espesor máximo de 1.200 m, encontrándose limitada en base y techo por las discordancias Patagonídica y Huantráiquica respectivamente. Asimismo, este grupo está compuesto litoestratigráficamente por tres subgrupos y nueve formaciones (Figura 27). El Subgrupo Río Limay comprende a las Fms. Candeleros y Huincul, representando a depósitos de canales de baja sinuosidad desarrolladas bajo un control tectónico y climático subordinado. El Subgrupo Río Neuquén comprende a las Fms. Cerro Lisandro, Portezuelo, Los Bastos, Sierra Barrosa y Plottier, conformando una sucesión alternante de unidades psamíticas y pelíticas de origen fluvial, desarrolladas principalmente bajo control climático. Finalmente el Subgrupo Río Colorado está integrado por las Fms. Bajo de la Carpa y Anacleto y comprende a depósitos fluviales desarrollados bajo un nuevo control tectónico dominante.

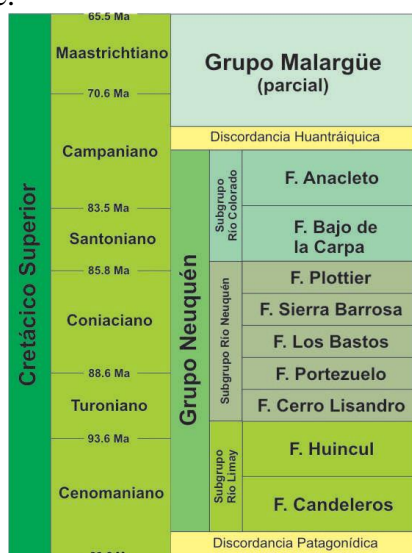


Figura 27. Esquema litoestratigráfico propuesto para el Gpo. Neuquén (Garrido, 2011)

Tunik *et al.* (2010) vincularon a este grupo a un estadio de desarrollo de una fase de antepaís en la Cuenca Neuquina, generado como consecuencia del inicio de una tectónica compresional sobre el margen andino acaecido a fines del Cretácico Inferior. Producto de esta fase compresional se produce la inversión de las antiguas estructuras extensionales con la consiguiente generación de un frente de deformación occidental (faja plegada y corrida) y la migración hacia el este de los depocentros sedimentarios (Ramos y Folguera, 2005; Howell *et al.*, 2005). Los efectos de esta deformación quedan evidenciados en la base del Gpo. Neuquén a partir de una marcada discordancia angular y erosiva que define a la discordancia Patagonídica (Keidel, 1917, 1925; Leanza, 2009).

Según Garrido (2010), el Subgrupo (Subgpo.) Río Limay corresponde a los depósitos basales del Gpo. Neuquén y queda definido por las Fms. Candeleros y Huincul, cuyos depósitos se componen mayormente de areniscas cuarzolíticas de granulometría variada, con alternancia de fangolitas y escasos horizontes conglomerádicos. El Subgpo. Río Neuquén incluye a las Fms. Cerro Lisandro, Portezuelo, Los Bastos, Sierra Barrosa y Plottier que, litológicamente, está caracterizado por una sucesión alternante y porcentualmente variable de depósitos fangolíticos y arenosos, cuyo predominio de la

fracción pelítica o psamítica para un intervalo determinado dentro de la secuencia, define a cada unidad formacional. Por último, el Subgpo. Río Colorado agrupa a las Fms. Bajo de la Carpa y Anacleto, que son alternancias en porcentajes variables de fangolitas, areniscas cuarzolíticas y conglomerados polimícticos.

4.6 Geomorfología

Movía *et al.* (2007) definieron al Dorso de los Chuhuidos como un paisaje estructural suavemente convexo desarrollado sobre sedimentos de Fm. Rayoso entre los cuales son comunes los bancos de yeso y las areniscas de fuerte coloración roja y amarillenta. Sobre el amplio dorso aparecen tres pequeños relieves puntiagudos, denominados los Chihuidos, que le dan un aspecto muy peculiar y que son claramente visibles desde lejos. La altura del domo oscila entre los 1.000 y los 1.300 m.s.n.m, siendo su punto más alto 1600 m.s.n.m. (Figura 28 B).

El flanco occidental es más abrupto y empinado que el oriental. La pendiente de este último es suave (4-10%) apareciendo los bancos de arenisca en forma de sobre techos, mientras que hacia el río Neuquén integran grandes escarpas casi verticales (Figura 28 A). Sin embargo, la mayor cantidad de pendientes adquieren pendientes menores de 8%, es decir, relieves planos a moderadamente ondulados, lo que favorece la infiltración del agua de las lluvias.

Por otro lado, existe una geofoma dentro de este paisaje que se denomina regionalmente “cárcel”, identificando profundas depresiones muy recortadas, con paredes verticales y de fondo plano, cubierto por arenales. Estas depresiones llegan a tener pendientes mayores a 25°. Su forma parece estar en relación con la erosión diferencial de los distintos estratos de la formación subyacente y con bancos de yeso. Las “cárceles” bordean, como una corona, toda la cumbre de la sierra y se encuentran dispuestas radialmente hacia el Bajo de Añelo y hacia el río Neuquén.

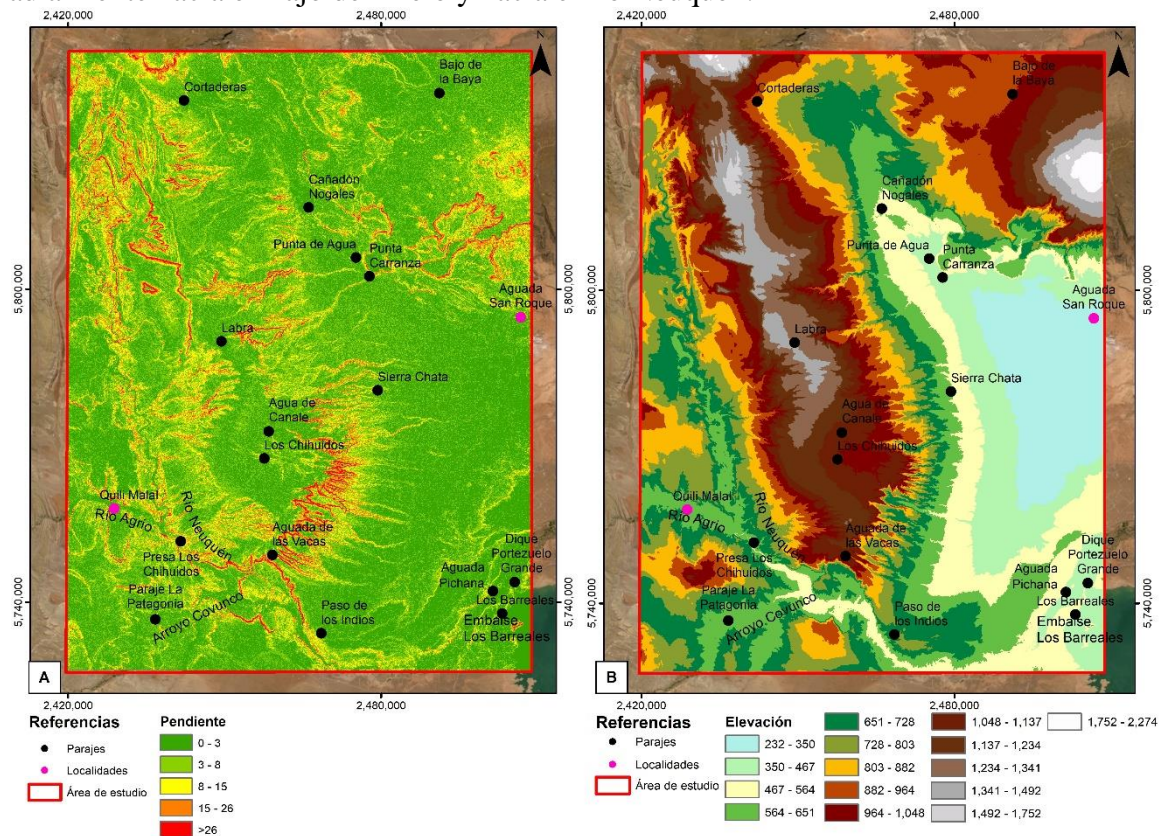


Figura 28. (A) Pendientes del área de estudio (%). (B) Elevación del terreno (msnm)

4.7 Provincias geológicas

En el área de estudio se observan cuatro provincias geológicas: Engolfamiento Neuquino, Dorso de los Chihuidos, Faja plegada y corrida del Agrio y Flanco Oriental (Figura 29). Roller (1976) define como provincia geológica a una región caracterizada por una determinada sucesión estratigráfica, un estilo estructural propio y rasgos geomórficos peculiares, siendo el conjunto una expresión de una particular historia geológica.

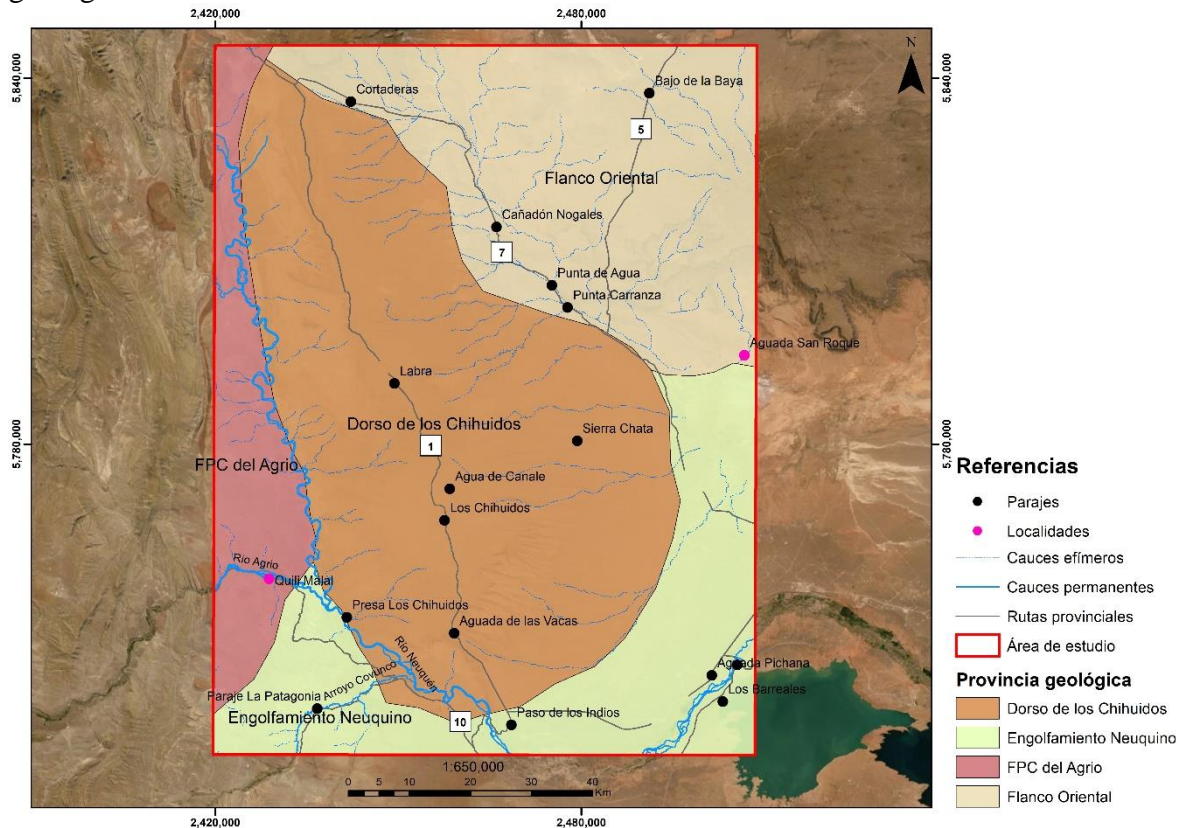


Figura 29. Mapa de provincias geológicas en el área de estudio (Modificado de Ramos *et al.*, 2011)

El Engolfamiento Neuquino fue definido por Braccacini (1970), comprende a la región extrandina del Neuquén y está caracterizada por un plegamiento de las secuencias mesozoicas y terciarias.

La Faja plegada y corrida del Agrio (FPC del Agrio) fue identificada por Braccacini (1970) e interpretada por Ramos (1978) como una deformación compresiva de retroarco al este del arco volcánico activo y asociada a pliegues y fallas inversas.

El Flanco Oriental está conformado por una plataforma estable en el extremo oriental del Engolfamiento Neuquino. Esta plataforma está segmentada por una serie de fracturas de basamento de rumbo noroeste y está formada por una serie de suaves plegamientos.

Leanza y otros (2001) interpretaron al Dorso de los Chihuidos como un gran anticlinorio, cuyo origen se debería al control del basamento por el proceso de inversión tectónica, el cual se estima que estuvo favorecido por la existencia de posibles anisotropías previas, es decir, un antiguo sistema de fallas normales responsables del proceso de extensión previo que experimentó la región y que dio lugar a la generación de la cuenca. Estas pequeñas variaciones en la inclinación han favorecido en los altos topográficos la exhumación de la Fm. Rayoso subyacente, generando otra unidad geomórfica la cual es descrita en forma independiente. Se desarrolla en sectores profundamente erodados del Dorso de los Chihuidos, aflorando la Fm. Rayoso, donde

dominan cuevas y crestas escalonadas. Esta depresión constituye la mayor parte de la vertiente occidental del Dorso de Los Chihuidos y debe su origen a un proceso de inversión de relieve en el que las sedimentitas más erodables de la Fm. Rayoso, en relación con las más resistentes de la Fm. Candeleros, favorecen la rápida exondación una vez completada la erosión de la unidad citada en el último. En la parte oriental se reconocen estrechos y empinados cañadones como Las Cárceles, Rincón del Soldado, de las Yeguas, del Rodeo, del León, de las Quirquinchas y Cárcel de los Toros, entre otros. Al norte de las Cárceles, el flanco oriental del anticlinorio que conforma el Dorso de Los Chihuidos, se caracteriza por una gran planicie estructural suavemente inclinada hacia el este, que desciende suavemente al bajo de Añelo.

4.8 Hidrogeología

La provincia de Neuquén cuenta con 5 cuencas hidrográficas: Cuenca del Limay, Cuenca del Neuquén, Cuenca del Lácar, Cuenca del Colorado y Cuenca de Añelo (Figura 30 A). El área de estudio se encuentra dentro de la Cuenca del Río Neuquén, al sur, y la Cuenca del Bajo de Añelo, al este.

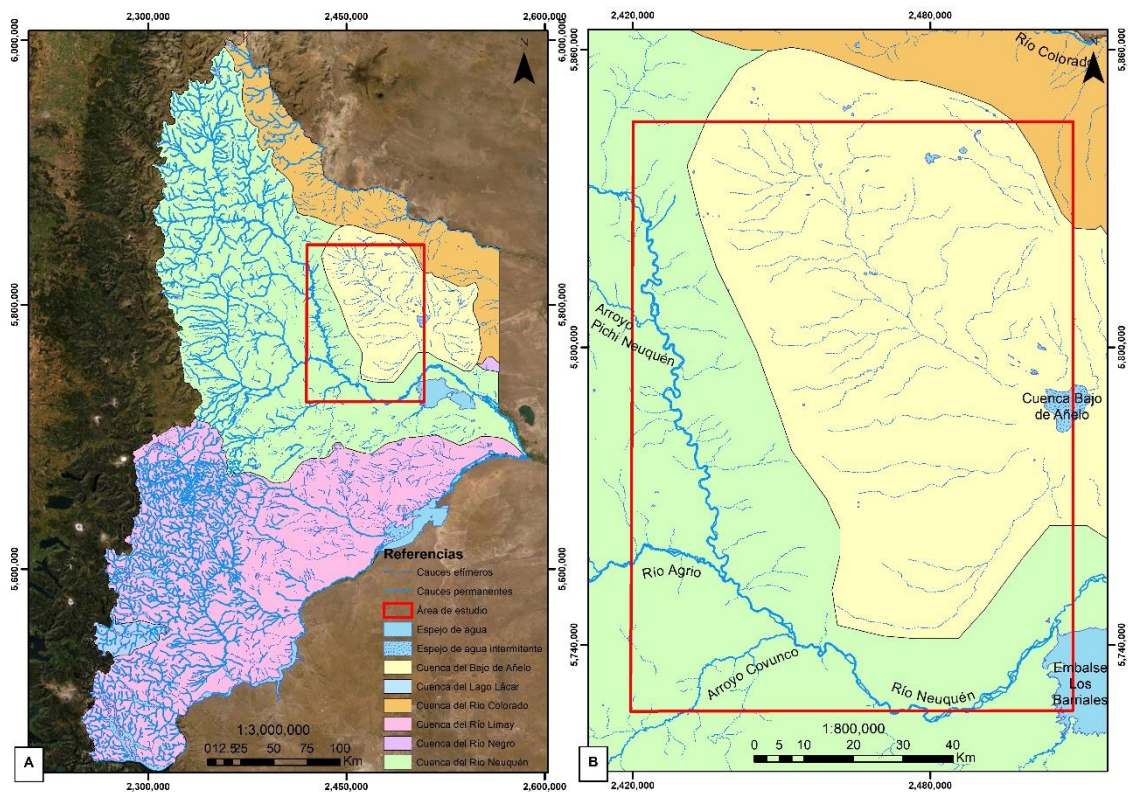


Figura 30. (A). Hidrología superficial de la provincia de Neuquén con sus distintas cuencas hidrológicas. (B) Hidrología superficial y cuencas hidrológicas del área de estudio. (Dufilho *et al.*, 2002)

La hidrogeología superficial del área de estudio se caracteriza por la presencia del río Neuquén, que se ubica al oeste y sur del El Dorso Los Chihuidos, que nace en el Cajón de los Chenques y recibe al río Varvarco, y recorre una distancia de 540 km desde sus nacientes hasta la confluencia con el río Limay. Posee un régimen hidrológico natural de tipo pluvio-nival, un caudal medio de 280 m³/s, presentando oscilaciones muy dispares según años secos o húmedos. Asimismo, se caracteriza por tener una doble onda de crecida: la primera ocurre en época invernal (mayo a julio), cuando se produce del 80 al 90% del total de las precipitaciones en forma de lluvia, y la segunda se produce hacia

fines de la primavera (octubre a diciembre) en forma de deshielo y, por lo general, es más moderada.

El río Agrio posee su cabecera en la depresión del lago homónimo, recoge los caudales de los lagos Las Mellizas y Trolope, para luego convertirse en afluente del río Neuquén. Otro afluente es el arroyo Covunco que tiene sus nacientes en el Cerro Atravesada. A partir de esta confluencia, el río Neuquén toma rumbo al este para escurrir hacia la confluencia con el del río Limay. Previamente pasa por Barda del Medio conectado con la depresión natural de los lagos Los Barreales y Mari Menuco, que controlan las crecidas del río Neuquén. Por último desagua en el lago Pellegrini creado para el mismo fin, y sigue hasta confluir con el Limay para convertirse en el río Negro (CFI, 1962).

El área de estudio cuenta con muchos cauces efímeros, los cuales están únicamente activos durante fuertes precipitaciones. Por un lado, se encuentran los que drenan al este del dorso y que desembocan en el Bajo de Añelo (Figura 30 B). En cambio, aquellos que drenan al oeste, se unen al cauce del Río Neuquén, el cual podría interpretarse como un área de recarga para el acuífero de Fm. Rayoso en la zona sur, donde el río atraviesa la formación (Del Prete, 2019).

Dentro de las rocas sedimentarias de la Cuenca Neuquina, la Fm. Rayoso y la sección inferior del Gpo. Neuquén presentan los niveles estratigráficos con mayor potencial hidrogeológico en el sector centro norte de la provincia de Neuquén (Alonso *et al.*, 2016). Estas son el principal recurso hídrico subterráneo de la cuenca, luego de los acuíferos de las llanuras aluviales de los ríos Neuquén, Limay y Colorado y del acuífero de la Fm. La Bardita en Zapala.

Meconi (2016) define que el Sistema Acuífero Gpo. Neuquén y Fm. Rayoso es un extenso complejo regional de areniscas y conglomerados interconectados, irregularmente separados por acuitardos y acuícludos. Asimismo, este autor definió que el Dorso de los Chihuidos representa un área de recarga, mientras que la descarga principal se produce en el Bajo de Añelo, donde el nivel piezométrico intersecciona con la superficie y genera una surgencia. Además, asegura que también hay recarga que corresponde al aporte de agua alóctona (por el deshielo de los Andes) de los ríos Neuquén y Colorado.

Alonso *et al.* (2016) definen que el espesor de la Fm. Rayoso disminuye de oeste a este y sólo aflora en la región del Dorso de los Chihuidos donde alcanza un espesor de 450 m, mientras que en el Bajo de Añelo, el espesor varía entre 400 y 350 m. En cuanto al Gpo. Neuquén, se determina que aflora en el dorso y en el Bajo de Añelo con espesores que varían de 100 a 700 m respectivamente. Por otro lado, también definieron que en el Dorso de los Chihuidos, los acuíferos detectados se encuentran entre los 200 y 500 metros bajo boca de pozo (mbbp) y se desarrollan en la Fm. Rayoso, mientras que los potenciales niveles acuíferos en el Bajo de Añelo según los registros eléctricos están entre los 40 y 650 mbbp. Si bien esta formación tiene buena continuidad hacia el este en el Bajo de Añelo, disminuye su importancia relativa como portadora de agua, debido a que el Gpo. Neuquén contiene mayor cantidad de intervalos potencialmente acuíferos a una profundidad de hasta 500 mbbp.

Según los resultados obtenidos por Alonso *et al.* (2018), la Fm. Rayoso posee su máximo espesor (700 m) en el Dorso Los Chihuidos y el Gpo. Neuquén se extiende en todo el subsuelo de la zona extraandina y en el centro este de la provincia alcanza más de 1000 m de espesor. Tanto la Fm. Rayoso como el Gpo. Neuquén alojan múltiples acuíferos confinados de calidad variable. Estos se distribuyen heterogéneamente y se han reconocido patrones regionales que podrían ligarse a variaciones litológicas y de espesor presentes.

Gatica (2017) determinó que las reservas subterráneas profundas más importantes pertenecen a los depósitos clásticos del Cretácico de la cubierta sedimentaria de Cuenca Neuquina, perteneciente a la Fm. Rayoso y el Gpo. Neuquén. Estos dispondrían de una recarga media anual similares, siendo de 86 mm/anuales para el primero y de 71 mm/anuales para el segundo. Bajo estas condiciones y en función del área aflorante de estos depósitos, se estima la recarga volumétrica anual de 740 hm³/anual para el Gpo. Neuquén y 260 hm³/anual para la Fm. Rayoso. Si bien la recarga media es superior en la Fm. Rayoso, el volumen de la recarga en el Gpo. Neuquén es mayor debido a que su cobertura areal es tres veces mayor sobre la región Árida.

5. METODOLOGÍA

Para estimar la recarga hídrica en el área de estudio se utilizó la metodología propuesta por Matus Silva (2007) con el fin de identificar cuáles son las zonas con mayor potencial. Este autor emplea una ecuación empírica para evaluar las Zonas Aptas para la Recarga (ZAR). La ecuación tiene en cuenta fundamentalmente cinco factores: pendiente, tipo de suelo, vegetación, litología y uso del suelo (2)

$$2. ZAR = 0,27 (Pe) + 0,23 (TS) + 0,12 (TR) + 0,25 (CV) + 0,13 (US)$$

Siendo:

Pe = pendiente

TS = tipo de suelo

TR = tipo de roca

CV = cobertura vegetal

US = uso de suelo

Sin embargo, Gatica (2017) adaptó esta ecuación para la provincia de Neuquén, ya que la zona es árida y semi-árida con una escasa, baja y dispersa cobertura vegetal, ocasionando un gran porcentaje de suelo desnudo. Por lo tanto, decidió aumentar el valor ponderado de la geología y disminuir el valor de cobertura vegetal, quedando así definida la ecuación de ZAR modificada (ZARm) (3)

$$3. ZARm = 0,27 (Pe) + 0,23 (TS) + 0,22 (TR) + 0,17 (CV) + 0,13 (US)$$

La suma de los valores obtenidos de la ecuación de ZARm, teniendo en cuenta la evaluación de cada uno de los factores propuestos, da un valor que se ubica dentro de un rango que indica la posibilidad para que ocurra la recarga hídrica en cada sitio evaluado. Cabe destacar que toda la cuenca tiene cierto nivel de recarga hídrica. Sin embargo, es necesario aclarar que esta propuesta metodológica no la estima. Lo que se pretendió fue identificar las zonas con mayor potencial para la recarga hídrica, con base en sus características biofísicas e hidrogeológicas, aun cuando las condiciones climáticas no sean muy favorables (Matus Silva, 2007).

Una vez obtenidas las ZARm, se realizó un balance hídrico diario que se fundamenta en obtener la cantidad de agua que se encuentra disponible para que se infiltre o recargue en los acuíferos (Matus Silva, 2007). Para esto, simplemente se resta de las precipitaciones diarias la evapotranspiración dando como resultado la cantidad de agua que se puede infiltrar en el terreno y recargar los acuíferos. A la proporción de agua que se puede infiltrar también se la denomina excedente hídrico y queda definido por la ecuación (4).

$$4. Exc = P - ET_0$$

Siendo:

Exc = excedente hídrico

P = precipitación diaria

ET₀ = evapotranspiración del cultivo de referencia diario

Este balance simplificado considerando ET₀, maximiza las detracciones que no generarían recarga, dado que en realidad debería considerarse evapotranspiración real. Sin embargo, dado que los excedentes ocurren en invierno, los valores de ET₀ son pequeños y la diferencia con la evapotranspiración real de la vegetación de monte es menor. Por lo tanto, este factor Exc subestima los excedentes disponibles.

En las regiones áridas y semiáridas, cuando se realiza un balance anual, aparentemente no existe la posibilidad de que haya recarga hídrica, porque la evapotranspiración del cultivo de referencia es mayor que la precipitación, provocando un marcado déficit hídrico. Sin embargo, hay meses durante los cuales la disponibilidad de agua es suficiente, siendo mayor la precipitación que la evapotranspiración del cultivo de referencia, generando las condiciones para que exista un excedente y, por lo tanto, una recarga potencial. Es por esto que se sugiere realizar el análisis del balance hídrico con datos mensuales o diarios y, luego, identificar los meses, semanas o días donde efectivamente existe un potencial de recarga hídrica.

Asimismo, autores como Forte Lay y Villagra (1983), Lerner *et al.* (1990), Samper (1997) y Scanlon *et al.* (2002), entre otros, coinciden en que el cálculo de la recarga a través de los modelos de balances hidrológicos debe realizarse a intervalos cortos de tiempo, en lo posible diarios. Además, en zonas áridas y semiáridas la recarga suele concentrarse durante unos pocos eventos individuales extremos de corta duración (Touhami *et al.*, 2013) por lo que se decidió trabajar con datos de precipitación diarios.

En el área de estudio se determinó que en los intervalos de meses de primavera y verano hay un marcado déficit hídrico. No obstante, en los meses de otoño e invierno (específicamente en abril, mayo, junio, julio y agosto), la evapotranspiración del cultivo de referencia desciende y la precipitación es mayor permitiendo que se puedan producir los excedentes hídricos.

Considerando que el sistema se desarrolla en estado estacionario, que la precipitación es la única entrada del sistema y dejando de lado los aportes de aguas subterráneas de acuíferos vecinos y aguas superficiales, la Recarga Potencial (RP) queda definida por la ecuación (5).

$$5. RP = Exc \times ZARm$$

Una vez aplicada la ecuación, se obtuvo como resultado una capa *ráster* que refleja espacialmente el valor de la RP en el área de estudio. Basándose en ese valor, se calculó la recarga potencial volumétrica en el área de estudio.

En la Figura 31 se sintetiza el proceso metodológico utilizado en este trabajo para la estimación de la recarga potencial en el área de estudio.

Para la metodología descripta se empleó el *software* ArcGIS 10.3.1, mediante el cual se llevó a cabo el geoprocésamiento de los datos vectoriales de entrada, relacionados con las variables de base de la recarga, convirtiéndolos en datos *ráster* de salida. Estos últimos, son los que permiten realizar álgebra de mapas para el cálculo de la recarga.

El tamaño de pixel que se utilizó para todas las variables fue de 12,5 x 12,5 m. Además, se trabajó con un sistema de coordenadas planares y bajo el marco de referencia Posiciones Geodésicas Argentinas establecido en el año 1994 (POSGAR 94) en la faja N° 2.

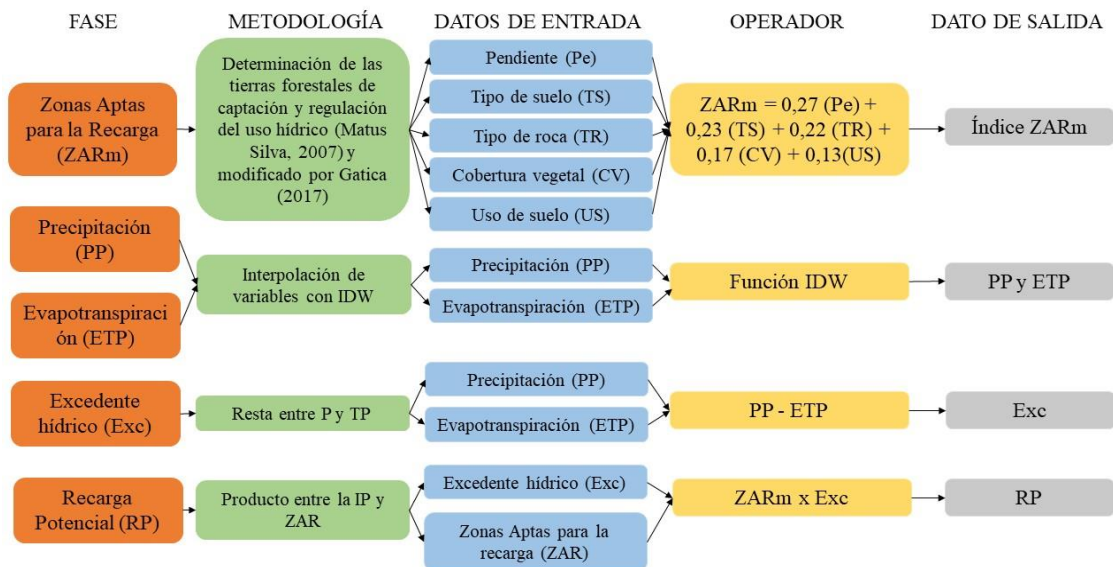


Figura 31. Esquema metodológico para la estimación de la recarga potencial en el área de estudio

5.1 Zonas Aptas para la Recarga

Como se mencionó anteriormente, para obtener las ZARm se realizó una evaluación y ponderación de cada uno de los factores que integran la ecuación descrita en la metodología, es decir, pendiente, tipo de suelo, tipo de roca, cobertura vegetal y uso del suelo.

La ponderación que se utilizó se encuentra entre 1 y 5, con base en las diferentes situaciones que se pueden encontrar dentro de cada elemento evaluado y tratando de homogenizar las categorías de puntuación a implementar. La puntuación más baja de cada elemento es 1 por presentar las características menos favorables y la puntuación más alta dentro de cada elemento es 5 por presentar las características más favorables para la recarga hídrica.

Una vez que se evaluó cada elemento, se realizó la sumatoria de todos los elementos mediante la ecuación 3 y a los resultados se los ubicó dentro de un rango donde se puede definir el potencial o la posibilidad de recarga hídrica de los sitios evaluados. Los resultados se clasificaron en cinco clases con el método de Corte Natural de SIG ArcMap (Tabla 6).

Como resultado de este procedimiento, se obtuvo una única capa ráster, la cual identifica las áreas potenciales de recarga hídrica en el área de estudio.

Posibilidad de recarga	Valor
Muy baja	1,83
Baja	2,68
Moderada	3,06
Alta	3,49
Muy alta	3,94

Tabla 6. Clasificación de la posibilidad de recarga hídrica (ZARm) para el área de estudio

Una vez obtenido el ZARm, se lo multiplicó al excedente hídrico. Es por esto que debe tomar valores entre 0 y 1, dado que si ZARm es mayor a 1 la precipitación será mayor que la medida. Por lo tanto, se realizó una normalización teniendo en cuenta la ecuación 6.

$$6. \text{ ZAR normalizado} = \frac{\text{ZAR} - \text{ZAR m\u00edn.}}{\text{ZAR m\u00e1x.} - \text{ZAR m\u00edn.}}$$

Siendo:

ZAR m\u00edn.= valor m\u00ednimo valor obtenido para la aptitud para la recarga

ZAR m\u00e1x.= valor m\u00e1ximo obtenido para la aptitud para la recarga.

5.1.1 Pendiente

El relieve es la configuraci\u00f3n f\u00edsica de la superficie de la tierra, incluyendo las irregularidades (elevaciones, pendiente y depresiones de la tierra) al considerarlas en conjunto (N\u00fa\u00f1ez, 1981). La pendiente es un criterio muy importante en el an\u00e1lisis e identificaci\u00f3n de las zonas potenciales de recarga h\u00eddrica ya que influye sobre esta al estar directamente relacionada con la escorrent\u00eda superficial. INAB (2003) define que pendientes muy inclinadas favorecen la escorrent\u00eda superficial y las menos fuertes, retienen por m\u00e1s tiempo el agua favoreciendo la infiltraci\u00f3n. Dicho de otra manera, en relieves con elevaciones altas, escarpados y de r\u00e1pido escurrimiento superficial, el proceso de infiltraci\u00f3n/recarga disminuye y se acelera el proceso de erosi\u00f3n de los suelos y/o compactaci\u00f3n. Por el contrario, en lugares con relieves planos, semi planos y c\u00f3ncavos se favorece el proceso de infiltraci\u00f3n/recarga h\u00eddrica al permitir un mayor tiempo de contacto del agua con el suelo.

El an\u00e1lisis y evaluaci\u00f3n de la pendiente y el microrelieve permiten localizar las zonas donde se est\u00e1 favoreciendo el proceso de recarga. Para esto, se utilizaron los valores que se detallan en la Tabla 7.

Pendiente (%)	Posibilidad de recarga	Ponderaci\u00f3n
0 – 2	Muy alta	5
2 – 5	Alta	4
5 – 15	Moderada	3
15 – 40	Baja	2
>40	Muy baja	1

Tabla 7. Ponderaci\u00f3n de la posibilidad de recarga h\u00eddrica de acuerdo al tipo de pendiente. Fuente FAO (2009)

Teniendo en cuenta que la altitud media de la provincia de Neuqu\u00e9n es de 1086 m.s.n.m, sumado a que el \u00e1rea de estudio se encuentra dentro de una zona de mesetas y valles, se opt\u00f3 por utilizar las pendientes establecidas por FAO.

Para adquirir los valores de pendiente se utiliz\u00f3 un Modelo de Elevaci\u00f3n Digital (DEM) con alta resoluci\u00f3n espacial de 12,5 x 12,5 m. Este fue adquirido como producto del sat\u00e9lite ALOS (*Advanced Land Observation Satellite*) con su sensor radar PALSAR que fue lanzado por la Agencia Japonesa de Exploraci\u00f3n Aeroespacial (JAXA), y que recolect\u00f3 im\u00e1genes entre 2006 y 2011. Estos se encuentran disponibles y se pueden descargar desde el portal Vertex de la NASA (<https://search.asf.alaska.edu/#/>).

Para obtener el factor pendiente en SIG se utilizaron distintos Modelos de Elevaci\u00f3n Digital con una resoluci\u00f3n espacial de 12,5 x 12,5 m para poder abarcar el \u00e1rea de estudio. Para esto, se utiliz\u00f3 la herramienta *Mosaic* mediante la cual se combinan distintos r\u00e1ster para crear uno solo. Luego, mediante la herramienta *Extract by Mask* se recort\u00f3 el mosaico generado en el paso anterior seleccionando el \u00e1rea de estudio. Por otro lado, se utiliz\u00f3 la herramienta *Slope* para cada celda, la cual calcula la tasa m\u00e1xima de cambio del valor de esa celda a sus vecinas. Por \u00faltimo, se utiliz\u00f3 la herramienta *Reclassify* para reclasificar las pendientes seg\u00fan los valores de la tabla Tabla 7 de la pendiente seg\u00fan FAO (2009) obteniendo as\u00ed la capa r\u00e1ster del factor pendiente.

5.1.2 Tipo de suelo

El análisis y evaluación del tipo de suelo es un elemento importante en la identificación de las ZAR, porque refleja la textura, porosidad, permeabilidad o compactación de los suelos (Matus Silva, 2007). Maderey (2005) estableció que mientras mayor sea la porosidad, el tamaño de las partículas y el estado de fisuramiento del suelo, mayor será la capacidad de infiltración.

Particularmente, la permeabilidad es una característica muy importante debido a que los suelos con alta permeabilidad son o pueden ser zonas de alta capacidad de infiltración. En suelos con textura gruesa, porosos y, por lo tanto permeables, existe alta posibilidad de recarga hídrica. Por el contrario, en suelos de textura fina, arcillosos, pesados y compactados la impiden.

Núñez (1981) señala que la infiltración o velocidad con que el agua penetra en la superficie del suelo, es siempre mayor en suelos de textura gruesa, como por ejemplo arenosa, franco arenosa, arenosa franca, que en suelos de textura fina o pesados, como los arcillosos. Schosinski y Losilla (2000) señalan que los suelos limo arenosos no muy compactados presentan mayores coeficientes de infiltración que los suelos con combinaciones de limo y arcilla y estos a su vez presentan un mayor coeficiente de infiltración que los suelos de textura arcillosa compactados e impermeables.

Para fines de análisis y evaluación del tipo de suelo de las ZAR se utilizaron los valores que se detallan en la Tabla 8.

Textura	Tipo de suelos	Posibilidad de recarga	Ponderación
Suelos franco arenosos a arenosos, con tamaño de agregados o partículas de gruesos a medios, con rápida capacidad de infiltración.	Aridisol de campos volcánicos, Inceptisol en planicie de lavas, entisol de valles y serranías.	Muy alta	5
Suelos francos, con partes iguales de arena, limo y arcilla, con rápida capacidad de infiltración.	Aridisol de planicie y plano aluvial, Molisol de serranías, Entisol de conos aluvial, Alfisol de pedimento.	Alta	4
Suelos francos limosos, con partículas de tamaño medio a finas, con moderada a moderadamente rápida capacidad de infiltración.	Entisol de crestas y dorsal estructural con asomo rocoso de sedimentitas del Gpo. Neuquén.	Moderada	3
Suelos francos arcillosos, combinación de limo y arcilla, con partículas finas, suelos pesados, con muestras de compactación, con lenta a moderadamente lenta capacidad de infiltración.	Entisol de cuencas endorreicas y valles de cursos efímeros.	Baja	2
Suelos arcillosos, muy pesados, con partículas muy finas, compactados, con muy lenta capacidad de infiltración.	Entisol de cuencas endorreicas.	Muy baja	1

Tabla 8. Clasificación de suelos según la aptitud de recarga desarrollada por Matus Silva (2007) y adaptado por Gatica (2017) para los tipos de suelo de la provincia de Neuquén

Para adquirir los tipos de suelo del área de estudio se utilizó el mapa base de suelos de la provincia de Neuquén de Ferrer *et al.* (2006) con una escala de 1:500.000. Al abarcar toda la provincia, se utilizó la herramienta *Clip* para poder recortar la capa vectorial y obtener solamente los polígonos que corresponden al área de estudio. Luego, se generó un nuevo campo en la tabla de atributos, en el cual se le asignó a cada entidad vectorial la ponderación correspondiente a la recarga según la Tabla 8 de la metodología de Matus Silva (2007) y modificada por Gatica (2017) para el tipo de suelos de la provincia de Neuquén. Luego, para obtener la capa ráster del factor de tipo de suelo, se utilizó la herramienta *Polygon to Raster* y se convirtieron los datos vectoriales a datos ráster teniendo en cuenta el campo de entrada con el valor de ponderación correspondiente.

5.1.3 Tipo de roca

El análisis y evaluación del tipo de roca permite determinar si la recarga es subsuperficial (recarga hídrica) o es una recarga profunda de aguas subterráneas (acuífero) (Matus Silva, 2007). Las características que determinan la recarga son la porosidad y permeabilidad de las rocas: rocas duras con poros finos e impermeables no favorecen la recarga, mientras que rocas suaves, con macroporos, fallas, fracturadas y permeables sí la favorecen. Meléndez y Fuster (1973) señalan que la permeabilidad de las rocas depende directamente de su porosidad.

Según INAB (2003) las rocas ígneas y metamórficas no fracturadas poseen permeabilidades bajas. Las rocas ígneas y metamórficas que sí lo están permiten mejor circulación de agua. Las arenas finas, basaltos y karts poseen una gran cantidad de poros, permitiendo la recarga de acuíferos. Meléndez y Fuster (1973) indicaron que las arenas, las gravas y las calizas fisuradas son rocas muy permeables. Los aluviones, en los que la arena y grava están mezcladas con arcillas y las areniscas, según su grado de cementación son algo menos permeable y las arcillas, las margas, las pizarras y las rocas eruptivas, cuando no están fracturadas, son rocas impermeables.

El proceso de evaluación de las características de la roca se realizará a través de los valores de la Tabla 9.

Roca	Periodo geológico	Tipo de roca	Posibilidad de recarga	Ponderación
Rocas muy permeables, muy suaves, constituidas por cristales o agregados gruesos, con macro poros interconectados entre sí.	Cuaternario, Neógeno y Paleógeno.	Depósitos actuales de arenas y gravas inconsolidados o rocas consolidadas fracturadas como los basaltos, se incluye aquí las rocas piroclásticas inalteradas, pueden tener porosidad y permeabilidad similar a sedimentos pobremente clasificados.	Muy alta	5
Rocas permeables, suaves, constituidas por cristales o agregados medianos, con poros conectados entre sí.	Cuaternario, Neógeno y Paleógeno.	Intrusivos de Stock, diques y filones capas tienen una permeabilidad primaria mínima, son permeables sólo cuando se fracturan por tensiones regionales, dando como resultado una alta permeabilidad secundaria.	Alta	4
Rocas moderadamente permeables, semi suaves, con regular conexión de poros entre sí.	Cretácico Superior y Jurásico.	Areniscas y pelitas de ambientes continentales (Grupo Neuquén), Calizas (Grupo Cuyo), till glaciar no estratificado. Se incluyen en este grupo tobos e ignimbritas con alto grado de alteración (la alteración a minerales de arcilla produce una reducción de la permeabilidad en varios órdenes de magnitud).	Moderada	3
Rocas poco permeables, un poco duras, moderadamente compactadas, constituidas por partículas finas.	Cretácico Inferior y Jurásico.	Areniscas arcillosas intercaladas con bancos de yeso, yeso con intercalaciones de limonitas. Rocas cristalinas donde los espacios entre los cristales de los minerales de las rocas cristalinas son de tamaño microscópico, generalmente sin conexión; por lo tanto, la porosidad es insignificante, se incluye aquí granitos, dioritas y tonalitas (jurásicas).	Baja	2
Rocas impermeables, duras, cementadas, compactadas.	Silúrico, Carbonífero y Permo-triásico.	Rocas con metamorfismo esquistos, gneis, filitas y rocas donde la porosidad raramente supera los 2 %. Los espacios intercristalinos que componen la porosidad son pequeños y no están interconectados.	Muy baja	1

Tabla 9. Clasificación de rocas según su aptitud para la recarga desarrollada por Matus Silva (2007) y modificada por Gatica (2017) para rocas de la provincia de Neuquén

Para obtener el factor tipo de roca en el área de estudio, se digitalizó la geología del área mediante las Hojas Geológicas de escala 1:250.000: 3696-I Zapala (Leanza *et al.*, 2001), 3969-II Neuquén (Rodríguez *et al.*, 2007) y mediante las Hojas Geológicas de escala 1:200.000: 32c Los Chihuidos Norte (Ramos, 1981) y 33d Auca Mahuida (Holmberg, 1964). Para esta digitalización se utilizó, además, la imagen satelital Sentinel 2 para poder definir con mayor precisión los límites de las unidades geológicas aflorantes dentro del área de estudio. Asimismo, se le asignó a cada entidad vectorial la ponderación correspondiente a la recarga según la Tabla 9 de la metodología de Matus Silva (2007) y modificada por Gatica (2017) para rocas de la provincia de Neuquén. Luego, mediante la herramienta *Polygon to Raster* se convirtieron los datos vectoriales a datos ráster teniendo en cuenta el campo de entrada con el valor de ponderación correspondiente.

5.1.4 Cobertura vegetal permanente

La cobertura del suelo es otro elemento considerado en la metodología ya que influye en la infiltración del agua al permitir menor contacto con el suelo, disminuyendo la velocidad de la escorrentía, la erosión, el impacto de la gota de lluvia y la resequeidad producto de los rayos del sol, contribuyendo con todo esto, a conservar las características del suelo que favorecen la recarga hídrica. Es importante considerar que la cobertura vegetal puede facilitar la infiltración del agua aún en los suelos duros y arcillosos (Matus Silva, 2007).

Para el caso de superficies desnudas, el suelo se halla expuesto al impacto directo de las gotas de lluvia, lo que puede dar lugar a una compactación del mismo, con la consiguiente disminución de la infiltración. En cambio, cuando el suelo está cubierto por vegetación, las plantas protegen de la compactación por impacto de la lluvia, retardándose además el recorrido superficial del agua, que está así más tiempo expuesta a su posible infiltración. Por su parte, las raíces de los vegetales abren conductos en el suelo que facilitan la penetración del agua (Segeer y Villotas, 2006).

La vegetación en las regiones áridas está adaptada al estrés hídrico y ha desarrollado estrategias específicas para la utilización del agua (Villagra *et al.*, 2011) como por ejemplo la vegetación de tipo xerófita y/o halófito. A expensas de los escasos aportes pluviales, las xerófitas utilizan el agua fisiológicamente necesaria y la restante continúa el tránsito por la zona no saturada como agua grávida con destino a la zona saturada. Cuando la alcanza, existe cierta recarga efectiva (Hernández *et al.*, 2010).

Muchos modelos de estimación de la recarga dan menos peso a este factor, algunos incluso no lo consideran, sin embargo, estudios previos han demostrado que esta influye en la estimación del balance hídrico de un área, por lo que, es un factor a considerar en la cuantificación de la recarga (Gatica, 2017).

Cobertura vegetal permanente (%)	Tipo de vegetación	Posibilidad de recarga	Ponderación
>80	Bosques de caducifolio o perennifolio, semidenso a abierto. Vegetación del llano aluvial de grandes ríos y arroyos.	Muy alta	5
70 – 80	Estepa Herbácea, con diversas especies de Festuca con Chusquea, Poa y Seneciomicrocephalus con bosquecillos	Alta	4
50 – 70	Vegas de zonas boscosas y estepas gramíneas, y cortaderas.	Moderada	3
30 – 50	Estepa arbustiva de Atriplex y Larrea divaricata. Estepa herbácea arbustiva de Mulinum spinosum.	Baja	2
<30	Vegetación de áreas desérticas de altura, Peladal sobre yeso y huayquerías y bardas.	Muy baja	1

Tabla 10. Clasificación de la cobertura vegetal según su aptitud para la recarga desarrollada por Matus Silva (2007) y modificada para el tipo de vegetación de la provincia de Neuquén de Movía *et al.* (2007)

Para obtener el factor cobertura vegetal permanente del área de estudio se utilizó el mapa base de vegetación de la provincia de Neuquén de Movía *et al.* (2007) en escala 1:500.000. Al abarcar toda la provincia, el primer paso fue utilizar la herramienta *Clip* para poder recortar la capa vectorial y obtener solamente el área de estudio. Luego, se generó un nuevo campo en la tabla de atributos, en el cual se le asignó a cada entidad vectorial la ponderación correspondiente a la recarga según la Tabla 10 de la metodología de Matus Silva (2007) y modificada por Gatica (2017) para la vegetación de la provincia de Neuquén. Luego, mediante la herramienta *Polygon to Raster* se convirtieron los datos vectoriales a datos ráster teniendo en cuenta el campo de entrada con el valor de ponderación correspondiente.

5.1.5 Uso del suelo

El uso del suelo es el elemento más cambiante e influenciado por la actividad antrópica. Esta altera las características de estos importantes y frágiles sitios, especialmente al implementar agricultura intensiva, ganadería extensiva, sobrepastoreo, monocultivos, cambios de uso del suelo diferentes a su capacidad de uso, deforestación, urbanismo, entre otras. Todas ellas pueden causar problemas con la infiltración del agua al compactar el terreno, dejar descubierto el suelo generando una mayor escorrentía superficial y disminuyendo la recarga de los acuíferos, lo que reduce el nivel de las aguas subterráneas y afecta la calidad de las aguas, haciéndolas inadecuadas para consumo humano y otros usos (Matus Silva, 2007).

Las zonas urbanas traen aparejadas la disminución de las posibilidades de infiltración de los excesos de agua. Los movimientos de suelo que realiza la industria hidrocarburífera para sus actividades, generan pérdidas de la cubierta vegetal y compactación del suelo, aumentando el escurrimiento superficial del agua. Las zonas de cultivo afectan las características de suelo, pueden dificultar la infiltración y favorecen la evaporación, mismo efecto genera la agricultura intensiva sin obras de conservación, la ganadería extensiva, la labranza convencional (Gatica, 2017).

Uso del suelo	Posibilidad de recarga	Ponderación
Zona de riego	Muy alta	5
Bosques, mallines y humedales, ganadería y ganadería extensiva	Alta	4
Ganadería muy extensiva 1	Moderada	3
Ganadería muy extensiva 2, praderas y matorrales antrópicos y zonas urbanas	Baja	2
Zonas hidrocarburíferas	Muy baja	1

Tabla 11. Clasificación del uso del suelo según su aptitud para la recarga desarrollada por Matus Silva (2007) y modificada para el tipo uso del suelo de la provincia de Neuquén, utilizando la información disponible del IGN, la Subsecretaría de Energía, Minería

Para obtener el factor de uso de suelos se utilizaron las capas *shapes* de zonas urbanas, caminos y rutas provinciales provistas por Instituto Geográfico Nacional (IGN) (disponible en <https://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG>) y las capas de locaciones, áreas hidrocarburíferas, pozos, gasoductos y minas provistas por la Subsecretaría de Energía, Minería e Hidrocarburos de la provincia de Neuquén (disponible en http://hidrocarburos.energianeuenen.gov.ar/?page_id=1978). A todas estas, se les aplicó la herramienta *Clip* para poder recortar la capa vectorial y obtener únicamente la información del área de estudio. Para las capas de caminos y rutas provinciales se les aplicó la herramienta *Buffer* para generar polígonos a una distancia

determinada. Para el primer caso, se generó un *Buffer* de 4 m, mientras que para las rutas provinciales se generó un *Buffer* de 8 m. Además, se delimitaron todas las zonas de riego dentro del área de estudio. Luego, todas estas capas se unieron en un mismo *shapefile*. Por otro lado, se unió este último *shapefile* al *shapefile* de mapa de uso de suelos de SIG – OTA (Dufilho *et al*, 2002). Por último, se generó un nuevo campo en la tabla de atributos, en el cual se le asignó a cada entidad vectorial la ponderación correspondiente a la recarga según la metodología de Matus Silva (2007) y modificada por Gatica (2017) para el uso de suelos según la Tabla 11. Mediante la herramienta *Polygon to Raster* se convirtieron los datos vectoriales a datos ráster teniendo en cuenta el campo de entrada con el valor de ponderación correspondiente.

5.2 Excedente hídrico

Para obtener el excedente hídrico simplemente se necesita restar de las precipitaciones diarias la evapotranspiración del cultivo de referencia diaria, dando como resultado la cantidad de agua que se puede infiltrar en el terreno y, de ese modo, recargar los acuíferos.

Los datos utilizados fueron los provistos por las estaciones meteorológicas mencionadas en el apartado 4, en la Tabla 2. Cabe destacar que estas estaciones se seleccionaron teniendo en cuenta que estén tanto dentro del área de estudio como por fuera de esta, para poder interpolar los datos.

Primero, se calcularon los excedentes diarios para cada estación mediante la ecuación 4. Luego, se realizó una sumatoria de todos los excedentes diarios obtenidos de cada estación y se dividió ese valor por la cantidad de años de la serie de datos para obtener un valor medio anual de excedente hídrico.

Para realizar el procesamiento del excedente hídrico en SIG se generaron tablas de datos Excel (tanto de precipitaciones como de temperaturas y evapotranspiración del cultivo de referencia) para ingresarlos a SIG. Para esto, lo que se hizo fue, en primer lugar, añadir esta información con sus respectivas coordenadas con el Sistema Geográfico de Coordenadas (WGS 1984) y, luego, se exportó esta misma información en un Sistema de Coordenadas Planas (POSGAR 1994 Argentina Zona 2) para poder interpolar los datos.

Para interpolar los datos y convertirlos a formato ráster se utilizó la herramienta *Inverse Distance Weighted (IDW)*. Se decidió trabajar con este método ya que determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra. Además, presupone que la variable que se quiere representar cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra (Watson y Philip, 1985). También, en algunos casos, se realizó un paso extra que fue utilizar la herramienta *Contour* para fijar un intervalo de las isolíneas.

5.2.1 Precipitación

Los lapsos de tiempo entre las estaciones no son coincidentes ni en cantidad de años de registro ni en periodo cubierto. Además, hay datos faltantes debido a que, a veces, las transmisiones presentan errores o las estaciones dejan de transmitir por fallas en el instrumental.

En cuanto a los faltantes de las series, los Maitenes contiene una serie completa de datos que comienza el 01/01/2009 al 30/04/2022. Balsa Huitrín contiene una serie de datos desde el 01/01/1999 hasta el 30/04/2022 pero se decidió acortarla hasta el 12/05/2008, ya que esos datos no presentaban datos de temperatura. En esta misma estación, hay faltante de datos de precipitación en el período de 01/08/2011 al 31/07/2012. Bajada del Agrío comienza su serie de datos a partir del 01/01/1999 hasta el 30/04/2022

y tiene un faltante de datos en el periodo del 5/12/2012 al 17/12/2012. La Higuera tiene un registro completo a partir del 01/01/1999 hasta el 30/04/2022.

También se contó con información de la COIRCO de las estaciones hidrometeorológicas de: Yacimiento Entre lomas (2015/2022) y Buta Ranquil (2015/2022). En este caso, si bien los lapsos de tiempo entre las estaciones son coincidentes, las series de datos no están completas. La primera tiene un registro a partir del 01/05/2015 hasta el 30/04/2022, con un faltante de datos en los periodos del 17/01/2018 al 20/02/2018, 14/04/2018 al 08/05/2018, 25/02/2019 al 23/06/2019 y durante el año 2020 no hay datos. La estación Yacimiento Entre Lomas contiene un registro de datos a partir del 01/06/2015 al 30/04/2022 con faltante de datos durante el año 2018.

En cuanto a la estación climática Borde Montuoso, perteneciente a la empresa VISTA Energy, posee su información meteorológica cada 15 minutos. Por este motivo, se realizó un promedio de cada uno de los parámetros para poder obtener información diaria. Esta estación cuenta con un registro desde el 12/04/2016 al 10/05/2022. El periodo del 28/02/2017 al 17/04/2017 presentan valores muy elevados, de más de 500 mm de precipitación al día, por lo que, a estos valores, se los tomó como un error en la medición y lo que se hizo fue descartarlos y realizar un promedio de los datos del año anterior y el posterior en ese mismo periodo de tiempo.

Para todos los faltantes de datos que se encontraron, lo que se decidió hacer fue hacer un promedio de los datos del año anterior y el siguiente para el mismo período de tiempo.

5.2.2 Temperatura

La temperatura es una variable importante tanto para la caracterización climática como para el cálculo empírico de la evapotranspiración del cultivo de referencia. Las dos ecuaciones empíricas que se utilizaron para poder obtener la evapotranspiración del cultivo de referencia (método de Penman-Monteith y Hargreaves) utilizan como dato fundamental de entrada la variable térmica.

Si bien la mayor parte de los registros de temperatura son completos en todas las estaciones, existen períodos donde las series de datos son incompletas. Los datos faltantes se deben a que muchas veces las transmisiones presentan errores o las estaciones dejan de transmitir información por fallas en el instrumental. Cabe destacar que la información brindada en las estaciones son las temperaturas máximas como las mínimas.

En cuanto a las estaciones de la AIC, Los Maitenes cuenta con una serie de datos del 01/01/2009 al 30/04/2022. Esta estación no presenta información de temperatura en los períodos del 11/07/2019 al 28/08/2019, 29/09/2019 al 7/10/2019, 1/12/2019 al 18/12/2019 y 27/01/2022 al 03/03/2022. La estación Balsa Huitrín cuenta con registros de precipitación desde el 01/01/1999, sin embargo, los registros de temperatura comienzan el 12/05/2008, por lo que, se decidió acortar la serie de datos a partir de esta fecha. Hay faltantes de datos en los períodos 01/03/2010 al 08/03/2010 y 30/08/2019 al 10/10/2019. La estación Bajada del Agrio cuenta con registro desde el 01/01/1999 pero tiene como faltante los datos de los períodos del 01/01/2000 al 29/05/2000, 12/01/2004 al 16/01/2004, 09/02/2005 al 13/02/2005, 18/05/2012 al 26/05/2012, 06/12/2012 al 10/12/2012 y 14/12/2012 al 17/12/2012. El período que va desde el 08/02/2022 al 18/03/2022 no cuenta con los datos de temperatura mínima. La estación La Higuera cuenta con datos desde el 01/01/1999 y tiene como faltante los datos de temperatura mínima en los intervalos del 3/12/2018 al 10/12/2018, 23/01/2019 al 02/02/2019.

En cuanto a las estaciones pertenecientes a la COIRCO, la estación Yacimiento Entre Lomas comienza sus mediciones a partir del 01/06/2015 hasta el 30/04/2022. Tiene como faltante de registro todos los datos el año 2018 y el período del 18/04/2021 al

30/04/2022. Los registros térmicos de la estación Buta Ranquil abarcan el período del 01/05/2015 al 30/04/2022. Tiene faltantes de datos en el periodo del 20/05/2016 al 31/05/2016, 17/01/2018 al 09/05/2018, 22/03/2019 al 13/05/2019 y 15/06/2019 al 23/06/2019.

En el caso de la estación de Borde Montuoso perteneciente a la empresa VISTA Energy cuenta con la totalidad de datos térmicos desde el 12/04/2016 al 04/05/2022.

5.2.3 Evapotranspiración del cultivo de referencia

En cuanto a la evapotranspiración, no hay registros de mediciones directas de las estaciones, por lo tanto, se la tuvo que estimar a partir de ecuaciones empíricas con datos meteorológicos.

El método de FAO Penman-Monteith (1948) combina el balance energético con el método de transporte de masa y deriva una ecuación para calcular la evaporación de una superficie libre de agua, a partir de registros climatológicos normalizados de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento. Este método se utilizó solamente para las estaciones de Yacimiento Entre Lomas y Borde Montuoso, ya que son las únicas estaciones que cuentan con los datos necesarios requeridos, mediante la ecuación 7.

$$7. ET_0 = (0,408 \Delta (Rn-G) + \gamma 900/(T+273)) \mu_2 (e_s - e_a) / (\Delta + \gamma (1+0,34 \mu_2))$$

Siendo:

ET_0 = evapotranspiración de referencia (mm/día)

Rn = radiación neta en la superficie de cultivo ($MJ m^{-2} día^{-1}$)

Ra = radiación extraterrestre (mm/día)

G = flujo de calor del suelo ($MJ m^{-2} día^{-1}$)

T = temperatura media del aire a 2 m de altura ($^{\circ}C$)

μ_2 = velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)

E_s = presión de vapor de saturación (kPa)

E_a = presión real de vapor (kPa)

$E_s - E_a$ = déficit de presión de vapor (kPa)

Δ = pendiente de la curva de presión de vapor ($kPa/^{\circ}C$)

γ = constante psicrométrica ($kPa/^{\circ}C$)

En cuanto a las estaciones de Los Maitenes, Balsa Huitrín, Bajada del Agrio, La Higuera y Buta Ranquil, se utilizó una ecuación alternativa debido a que no se tiene la disponibilidad de datos meteorológicos de radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento. Por este motivo, se decidió trabajar con un método alternativo de Hargreaves para estimar la evapotranspiración del cultivo de referencia, mediante la ecuación 8.

$$8. ET_0 = 0,0023 * (T_{media} + 17,8) (T_{dmáx} - T_{dmín})^{0,5} * Ra$$

Siendo:

ET_0 = evapotranspiración de referencia (mm/día)

Ra = radiación extraterrestre (mm/día)

T_{media} = temperatura media diaria (mm/mes)

$T_{dmáx}$ y $T_{dmín}$ = temperatura máxima y mínima diaria (mm/día)

Cabe destacar que, dado el mejor comportamiento y consistencia del método FAO Penman-Montith en el ámbito global, este es el único que se recomienda como método estándar de cálculo (FAO, 2006). Lo que se busca con la aplicación de esta ecuación es mejorar la estimación de la ET_0 en las estaciones que cuentan con todos los datos requeridos.

5.3 Recarga potencial

Una vez obtenidas la capa ráster de las ZARm y la capa ráster de Excedente hídrico anual, se llevó a cabo el cálculo de la Recarga Potencial para el área de estudio mediante la ecuación 5. Para esto, se utilizó la herramienta *Raster Calculator* para ejecutar álgebra de mapas y, de ese modo, obtener una única capa con los valores de Recarga Potencial anuales. Por último, se estimó la recarga potencial volumétrica anual en el área de estudio.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Zonas Aptas para la Recarga

La distribución espacial de la aptitud para la recarga obtenida mediante el método de Matus Silva (2007) y modificado por Gatica (2017) para el área de estudio se puede observar en la figura (Figura 32). El valor mínimo de ZAR_m es de 1,83 y el valor máximo es de 5. Cabe señalar que los datos obtenidos para las ZAR_m son valores adimensionales.

La distribución de los valores ZAR_m según las provincias geológicas de Neuquén se presentan en la Tabla 12.

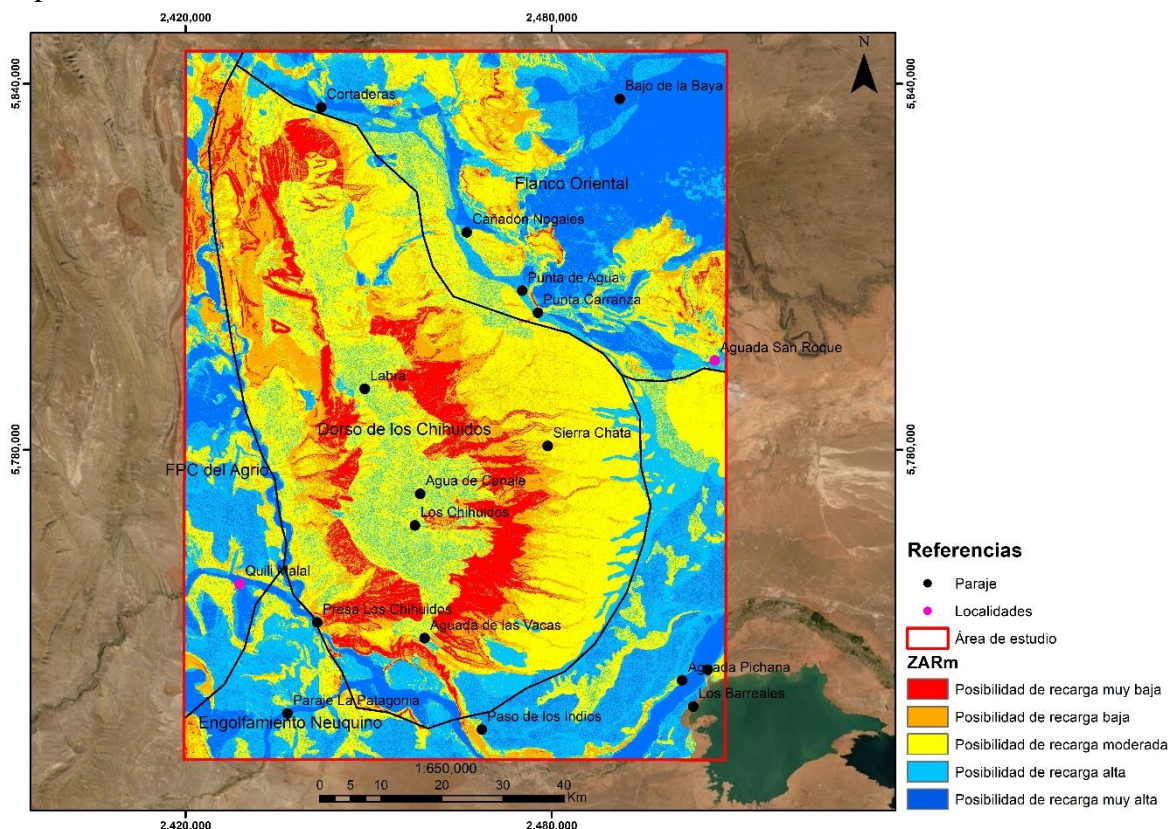


Figura 32. Distribución espacial de las Zonas Aptas para la Recarga según provincias geológicas en el área de estudio, utilizando la metodología de Matus Silva (2007) modificada por Gatica (2017)

Provincia geológica	Área (km ²)	Área (%)	Mín.	Máx.	Medio
Faja Plegada y Corrida del Agrio	966,14	9	2,22	4,84	3,62
Flanco Oriental	2712,23	27	2,35	4,67	3,69
Dorso de los Chihuidos	4664,51	46	1,83	5	3,11
Engolfamiento Neuquino	1886,96	18	2,27	4,87	3,71

Tabla 12. Zonas aptas para la recarga hídrica según las provincias geológicas en el área de estudio (los valores son adimensionales)

La provincia geológica de la FPC del Agrio se ubica en la región oeste del área de estudio y ocupa una superficie de 966,14 km² (9% de la superficie del área de estudio). El valor mínimo de ZAR_m de esta provincia es de 2,22, mientras que el máximo es de 4,84. Su aptitud media para la recarga es de 3,62, categorizado como una Zona Apta para la Recarga alta. Se puede observar que dentro de esta misma, los valores más bajos se ubican hacia el norte donde las unidades litoestratigráficas son más antiguas, hay desarrollo de suelo de tipo entisol, hay estepa arbustiva y las pendientes son mayores, lo

que provoca una posibilidad de recarga baja debido a un rápido escurrimiento. Además, en esas zonas existen afloramientos rocosos con altas pendientes, lo cual también provoca una recarga baja. Por el contrario, los valores más altos se ubican en la región central donde las unidades litoestratigráficas están conformadas por depósitos sedimentarios, que son más recientes, poseen pendientes más bajas y desarrollo de suelos de tipo aridisol, lo que permite que la posibilidad de recarga sea moderada a alta.

La provincia geológica del Flanco Oriental se ubica en las regiones norte y noreste y conforma una plataforma estable, donde se encuentra el campo volcánico Auca Mahuida con su volcán neógeno/cuaternario, sus numerosos conos piroclásticos con sus flujos lávicos (coladas basálticas) y cuerpos extrusivos dómicos con coladas traquíticas características. Esta ocupa una gran área de 2712 km² (27% de la superficie total del área). El valor mínimo de ZARm es de 2,35 y el máximo es de 4,67. Su aptitud media para la recarga es de 3,69, categorizado como una Zona Apta para la Recarga alta. Se observa que los valores más altos dentro de esta provincia se encuentran sobre el basalto Huarco, que forma una extensa meseta basáltica que va desde el Neógeno hasta el Pleistoceno. Esta zona se encuentra caracterizada por poseer pendientes suaves, desarrollo de suelos aridisoles y vegetación de estepa herbácea arbustiva, lo que provoca que la posibilidad de recarga sea de alta a muy alta. Otra zona donde también se observan valores altos de ZARm es en la Sierra Negra con sus afloramientos de coladas basálticas de la Fm. Palaoco hacia el noroeste. Los valores de ZARm disminuyen hacia las inmediaciones del escudo volcánico, donde se encuentran los depósitos sedimentarios más antiguos con suelos de tipo entisoles y donde las pendientes se hacen más escarpadas, provocando que la aptitud para la recarga sea menor.

El Dorso de los Chihuidos está ubicado en la región central del área de estudio con un área de 4664,5 km², constituyendo casi la mitad (46%) de la superficie total. Esta provincia posee el valor mínimo más bajo de ZARm de 1,83 y un máximo de 5. Su aptitud media para la recarga es de 3,11, categorizada como una Zona Apta para la Recarga moderada. Los valores más bajos de ZARm se encuentran en las Cárceles, donde existen paredes verticales y donde aflora la Fm. Rayoso de edad Cretácico Temprano. Además en estas zonas se observan características que disminuyen la posibilidad de recarga, como por ejemplo, el tipo de suelo es entisol de dorsal estructural, la cobertura vegetal es muy escasa y el suelo se utiliza para ganadería muy extensiva. Los valores medios en el Dorso de los Chihuidos se encuentran ubicados en los afloramientos de las Fm. Candeleros y Huincul, donde el tipo de suelo es entisol con asomo rocoso de sedimentitas del Gpo. Neuquén con una posibilidad de recarga moderada. Los valores más altos se ubican en la región sur de esta provincia donde se encuentran los depósitos fluviales actuales del río Neuquén, que se caracterizan por contener conglomerados, gravas y arenas, lo que permite una posibilidad de recarga alta. Asimismo, en estas zonas se observan suelos de tipo aridisol de planicies y plano aluvial.

El Engolfamiento Neuquino se ubica en la región sur – sureste y cuenta con un área de 1886,9 km² (18% de la superficie total del área). El valor mínimo de ZARm es de 2,27 y el máximo 4,87, siendo este el valor más alto que se encuentra en el área de estudio. Su aptitud media para la recarga es de 3,71, categorizada como una Zona Apta para la Recarga alta. Hacia el noreste de esta provincia se observan los valores más bajos de ZARm ubicados en el Bajo de Añelo, una cuenca endorreica donde aflora la Fm. Roca del Cretácico Superior con litologías sedimentarias como calizas y yesos formando suelos salinos y eólicos que poseen una posibilidad de recarga muy baja. Los valores más altos se observan en los depósitos de las planicies aluviales actuales de los cauces permanentes, los cuales están constituidos por afloramientos de gravas y arenas cuaternarias, que

poseen vegetación de llano aluvial de grandes ríos y arroyos y las pendientes son más suaves, lo que permite una alta posibilidad de infiltración.

6.2 Evapotranspiración del cultivo de referencia medio mensual

En este apartado se presenta la evapotranspiración del cultivo de referencia mensual obtenida con las series de las estaciones y aplicando diferentes métodos según se señaló en metodología. Se utilizó método Penman-Monteith para Entre Lomas y Borde Montuoso y Hargreaves para las restantes.

La estimación de la evapotranspiración del cultivo de referencia de la estación Bajada del Agrío, permite interpretar que durante los meses de enero y diciembre la cantidad de milímetros evapotranspirada será mayor con valores máximos de entre 202 y 208 mm mensuales (Figura 33). Los valores mínimos se registran durante el mes invernal de junio con un valor de 32,2 mm/mes. Cabe destacar que este comportamiento se da conforme los aumentos y disminuciones de temperatura. La mayor evapotranspiración del cultivo de referencia se da cuando las temperaturas aumentan y disminuye cuando las temperaturas disminuyen. El promedio anual de evapotranspiración del cultivo de referencia en esta estación según la serie de datos es de 1344 mm anuales, con un promedio diario de evapotranspiración del cultivo de referencia de 3,68 mm.

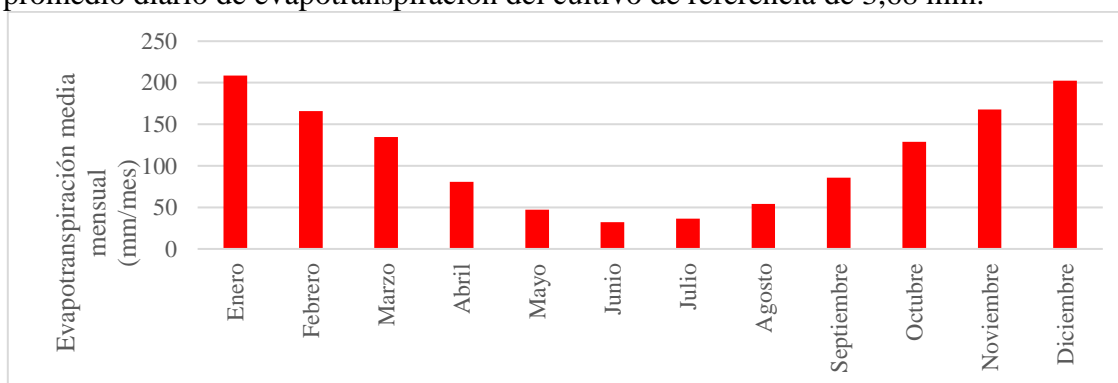


Figura 33. Comportamiento de la evapotranspiración del cultivo de referencia media mensual en Bajada del Agrío (1999-2022)

La evapotranspiración del cultivo de referencia de Balsa Huitrín, se puede interpretar que durante los meses de enero y diciembre la cantidad de milímetros evapotranspirada será mayor con valores máximos de entre 199,1 y 191,5 mm mensuales (Figura 34). Los valores mínimos se registran durante el mes invernal de junio con un valor de 32,3 mm/mes. El promedio anual de evapotranspiración del cultivo de referencia en esta estación según la serie de datos es de 1290,4 mm anuales, con un promedio diario de evapotranspiración del cultivo de referencia de 3,53 mm.

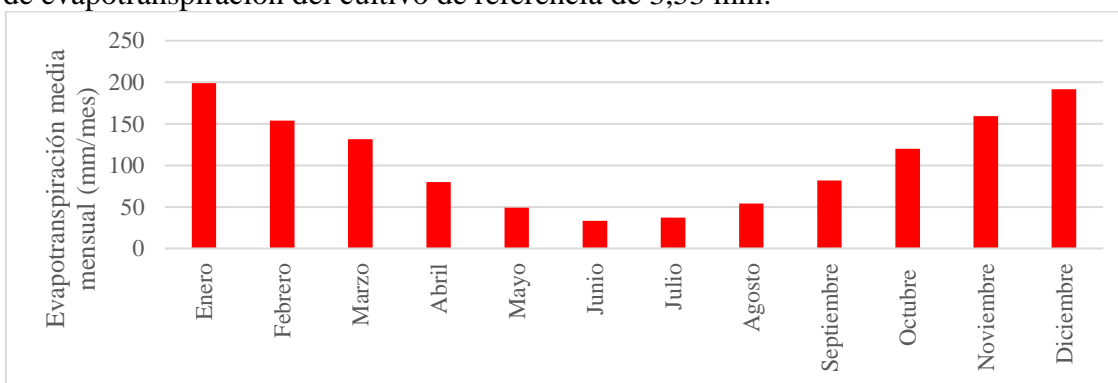


Figura 34. Comportamiento de la evapotranspiración del cultivo de referencia media mensual en Balsa Huitrín (1999-2022)

La mayor evapotranspiración del cultivo de referencia de La Higuera ocurre durante los meses de verano, diciembre y enero con valores medios mensuales de 202,5 y 199,1 mm/mes. Los valores mínimos ocurren durante el mes de junio con un valor medio mensual de 31,5 mm/mes (Figura 35). El promedio anual de evapotranspiración del cultivo de referencia en esta estación es de 1298,9 mm anuales, mientras que el promedio medio diario es de 3,5 mm.

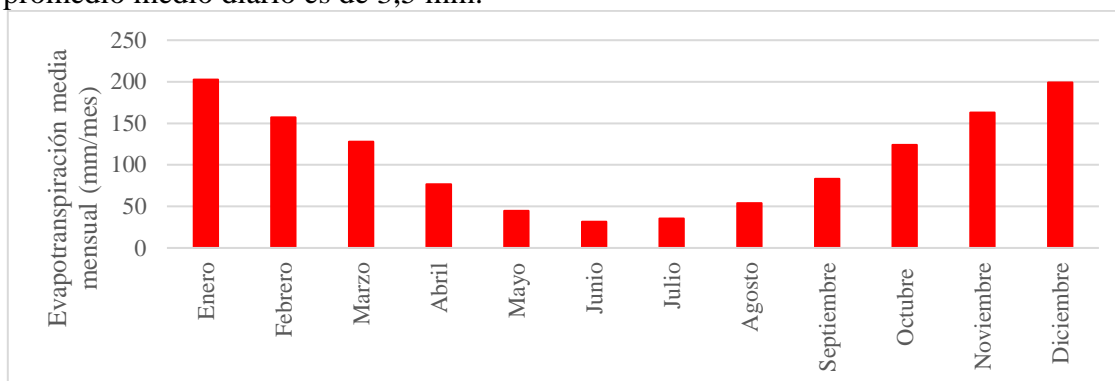


Figura 35. Comportamiento de la evapotranspiración del cultivo de referencia media mensual en La Higuera (1999-2022)

La evapotranspiración del cultivo de referencia de Los Maitenes durante los meses de verano, diciembre y enero, se encuentran los valores de evapotranspiración del cultivo de referencia más altos, con valores medios mensuales de 201,5 y 208,9 mm/mes. Los valores mínimos ocurren durante el mes de junio con un valor medio mensual de 35,7 mm/mes (Figura 36). El promedio medio anual de evapotranspiración del cultivo de referencia en esta estación es de 1368,99 mm anuales, mientras que el promedio medio diario es de 3,7 mm.

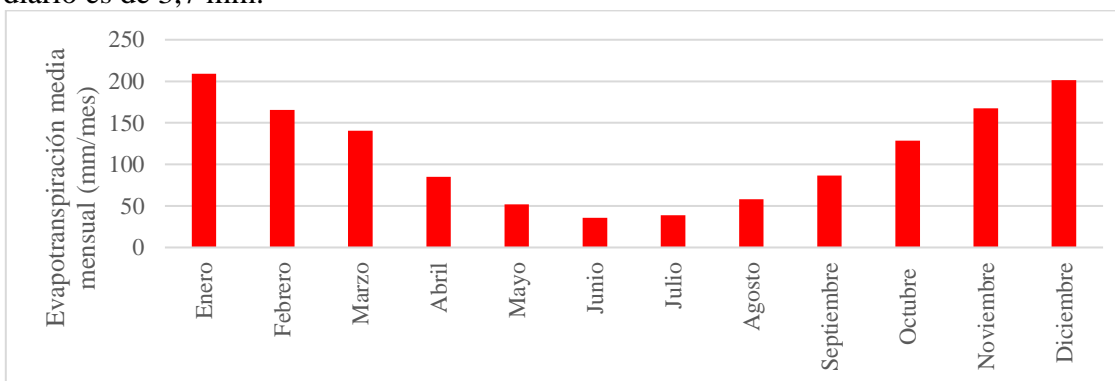


Figura 36. Comportamiento de la evapotranspiración del cultivo de referencia media mensual en Los Maitenes (2009-2022)

En cuanto a la evapotranspiración del cultivo de referencia de Buta Ranquil, se puede observar que durante los meses de noviembre y diciembre se producen los valores de evapotranspiración del cultivo de referencia más altos, con valores medios mensuales de 168,2 y 187,4 mm/mes. Los valores mínimos ocurren durante el mes de junio con un valor medio mensual de 23,7 mm/mes (Figura 37). El promedio medio anual de evapotranspiración del cultivo de referencia en esta estación es de 1075,6mm anuales, mientras que el promedio medio diario es de 2,94 mm.

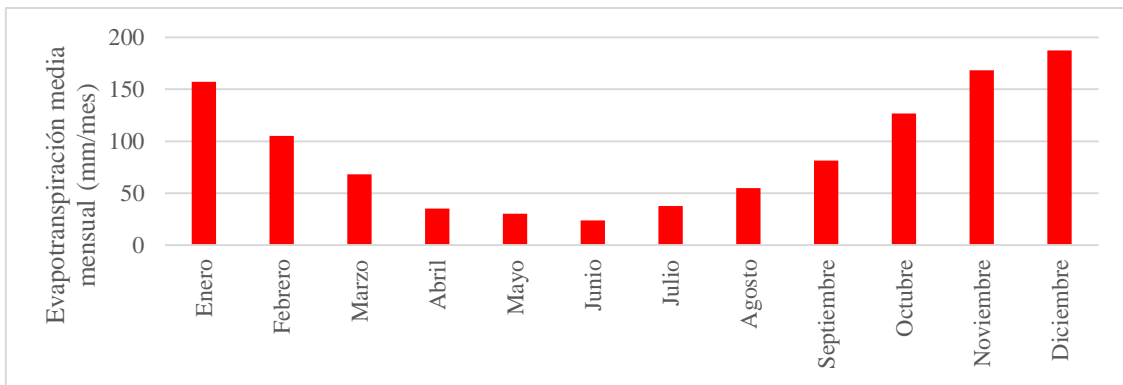


Figura 37. Comportamiento de la evapotranspiración del cultivo de referencia media mensual en Buta Ranquil (2015-2022)

La evapotranspiración del cultivo de referencia en Yacimiento Entre Lomas, se puede observar que durante los meses de diciembre y enero se producen los valores de evapotranspiración del cultivo de referencia más altos, con valores medios mensuales de 328,2 y 333,4 mm/mes. Los valores mínimos ocurren durante el mes de julio con un valor medio mensual de 74,3 mm/mes (Figura 38). El promedio medio anual de evapotranspiración del cultivo de referencia en esta estación es de 2213,6 mm anuales, mientras que el promedio medio diario es de 6,07 mm.

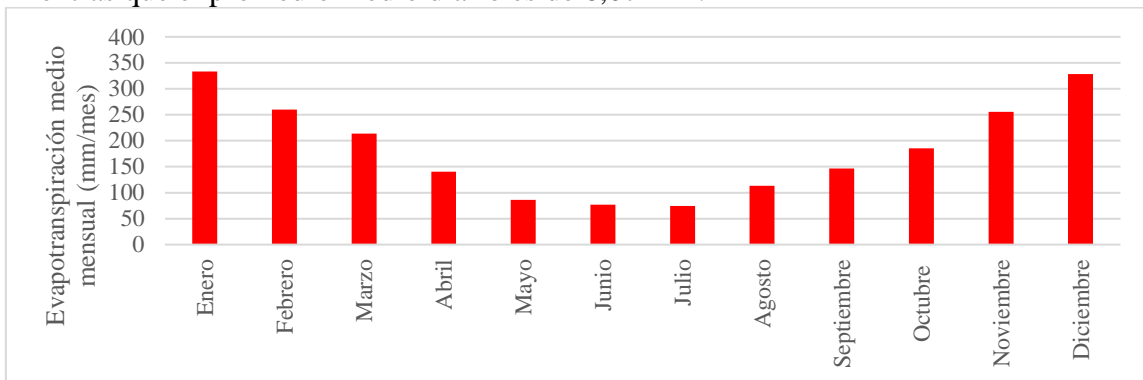


Figura 38. Comportamiento de la evapotranspiración del cultivo de referencia media mensual en Yacimiento Entre Lomas (2015-2022)

En cuanto a la evapotranspiración del cultivo de referencia de Borde Montuoso, se puede observar que durante los meses de diciembre y enero se producen los valores de evapotranspiración del cultivo de referencia más altos, con valores medios mensuales de 223,5 y 219,7 mm/mes. Los valores mínimos ocurren durante el mes de julio con un valor medio mensual de 42,8 mm/mes (Figura 39). El promedio medio anual de evapotranspiración del cultivo de referencia en esta estación es de 1472,7 mm anuales, mientras que el promedio medio diario es de 4,11 mm.

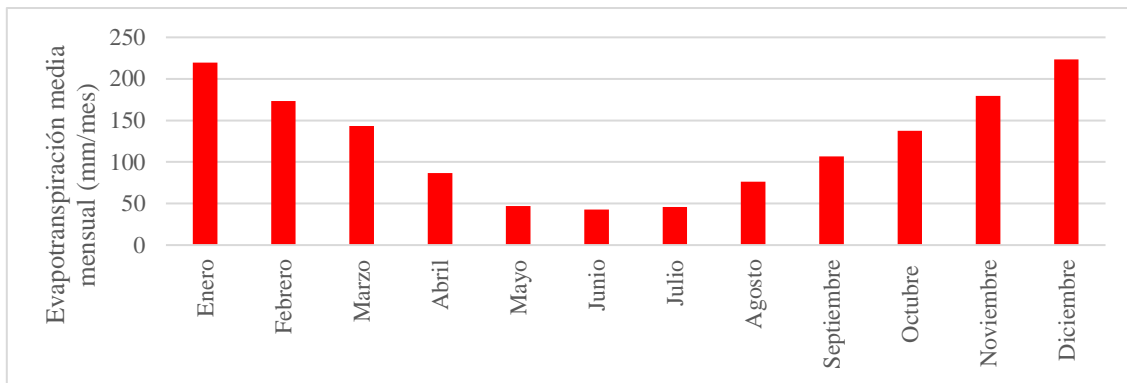


Figura 39. Comportamiento de la evapotranspiración del cultivo de referencia media mensual en Borde Montuoso (2016-2022)

En cuanto a la distribución espacial de la evapotranspiración del cultivo de referencia del área de estudio, la mayor demanda media anual se encuentra en la región este con su pico máximo en la estación Yacimiento Entre Lomas con un valor de 2213 mm anuales (Figura 40). Los valores más bajos de evapotranspiración del cultivo de referencia media anual se encuentran hacia el noroeste con su pico más bajo en la estación de Buta Ranquil con un mínimo de 1075 mm anuales.

Los mayores valores en la región este obedecen, en gran parte, al método de estimación, dado que están calculados considerando el viento y la radiación medida in situ, mientras que las restantes estaciones no. El viento tiene una gran influencia en el poder evaporante de la atmósfera y resulta un factor relevante en zonas áridas y ventosas. Sin embargo, las estaciones más cercanas al área de estudio no cuentan con los parámetros necesarios para estimar con el método de Penman-Monteith y se considera que los valores de evapotranspiración del cultivo de referencia pueden estar subestimados.

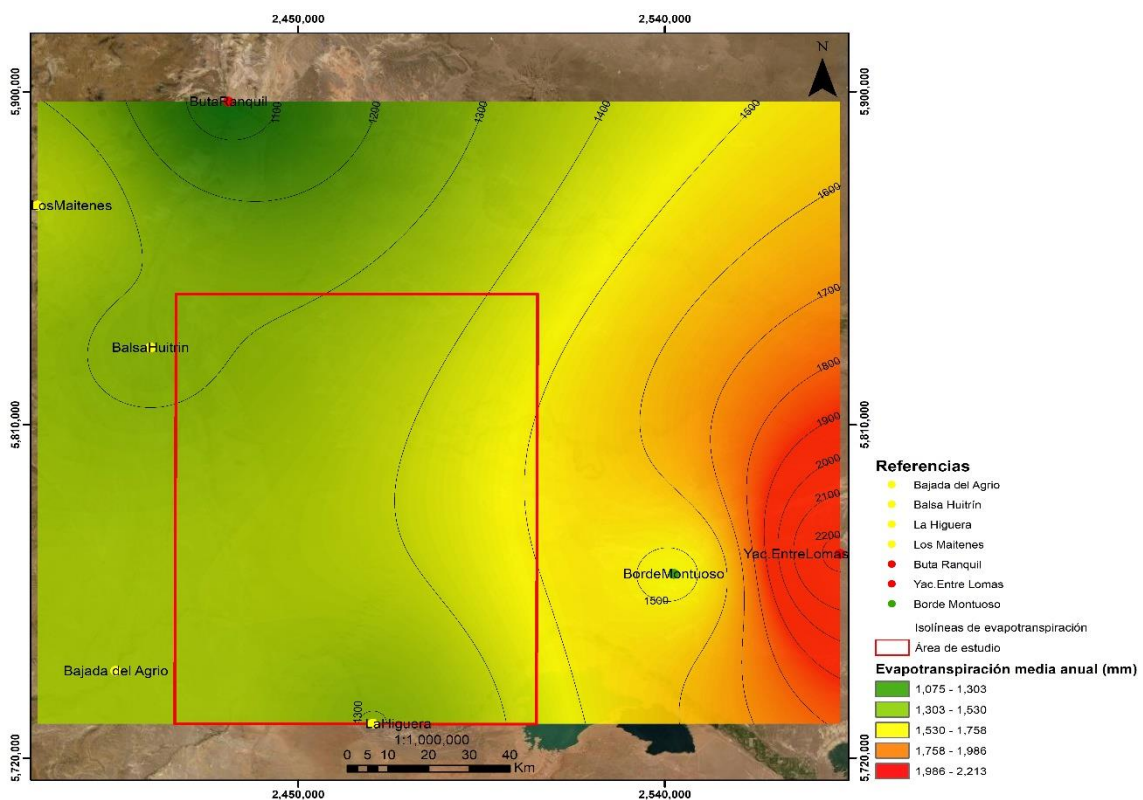


Figura 40. Distribución espacial de la evapotranspiración del cultivo de referencia anual en el área de estudio

6.3 Excedente hídrico

6.3.1 Relación Precipitación vs Evapotranspiración del cultivo de referencia medio diaria

Para interpretar el excedente hídrico se analizó el comportamiento de los valores medios diarios de la evapotranspiración del cultivo de referencia y de la precipitación de cada una de las estaciones.

En la estación Bajada del Agrío se puede observar que el excedente se produce en los meses otoñales e invernales de abril, mayo, junio, julio y agosto (Figura 41). Durante los meses de enero, febrero, marzo, septiembre, octubre, noviembre y diciembre se produce déficit hídrico. El promedio medio diario en esta estación es de 5,72 mm con un valor medio máximo de 38,63 mm diario en el mes de septiembre.

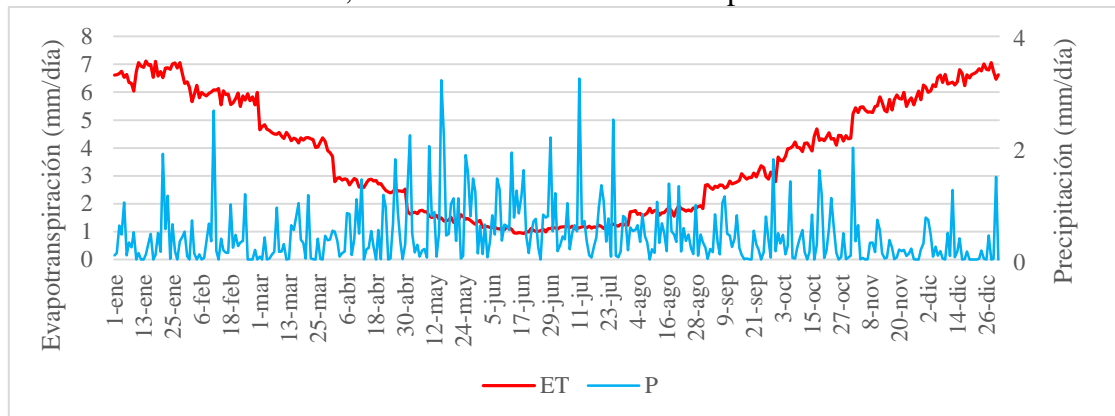


Figura 41. Comportamiento medio diario de la evapotranspiración del cultivo de referencia vs. la precipitación en Bajada del Agrío (1999 – 2022)

En cuanto al excedente que se produce en la estación Balsa Huitrín, se puede observar que el exceso se produce en los meses otoñales e invernales de abril, mayo, junio, julio y agosto. También se puede observar un pequeño excedente durante los últimos días del mes de diciembre (Figura 42). El promedio medio diario en esta estación es de 6,54 mm con un valor medio máximo de 37,84 mm diario en el mes de diciembre.

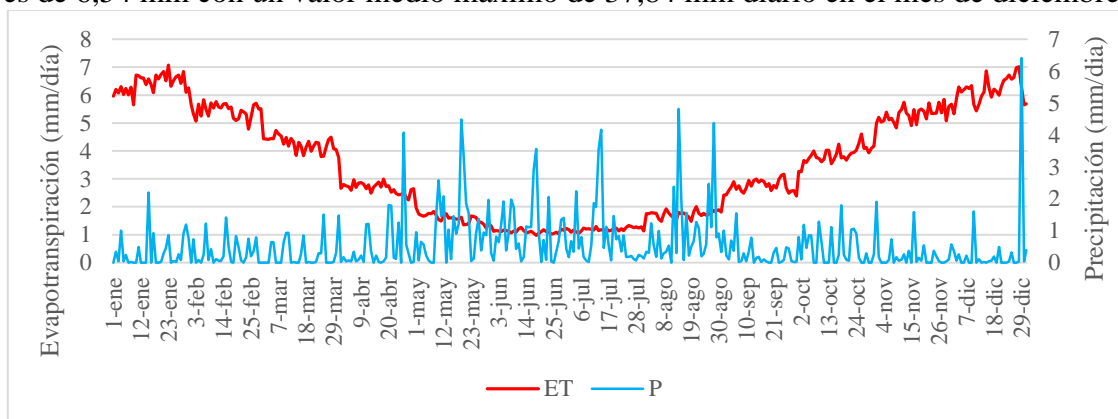


Figura 42. Comportamiento medio diarios de evapotranspiración del cultivo de referencia vs. la precipitación en Balsa Huitrín (2008-2022)

En la estación La Higuera, el excedente hídrico se produce durante los meses de mayo, junio, julio. Luego toma bajos valores durante agosto y tiene un pico máximo durante el mes de septiembre (Figura 43). El promedio medio diario en esta estación es de 6,15 mm con un valor medio máximo de 82,75 mm diario en el mes de septiembre.

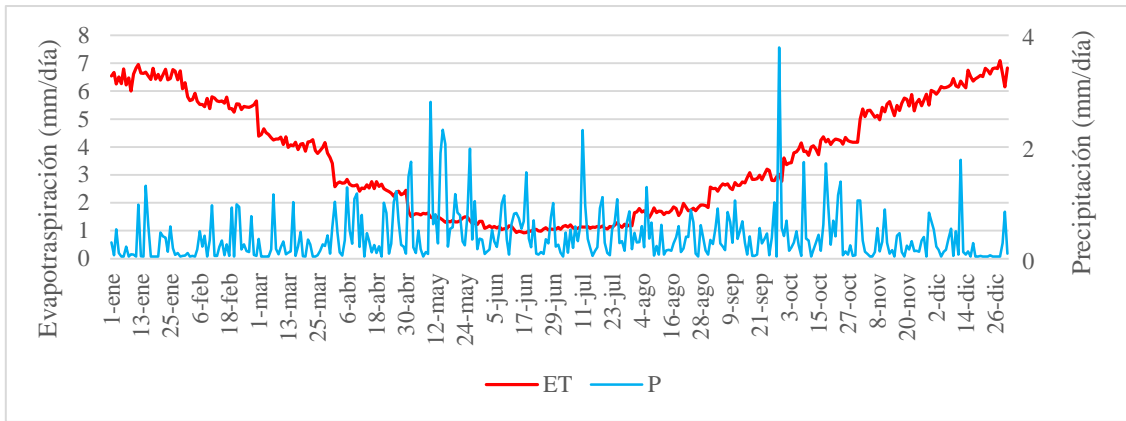


Figura 43. Comportamiento medio diario de evapotranspiración del cultivo de referencia vs. la precipitación en La Higuera (1999-2022)

En la estación Los Maitenes el exceso que se produce durante los meses de abril, mayo, junio, julio y agosto con un pico pronunciado durante el mes de abril (Figura 44). El promedio medio diario en esta estación es de 5,53 mm con un valor medio máximo de 30,89 mm diario en el mes de junio.

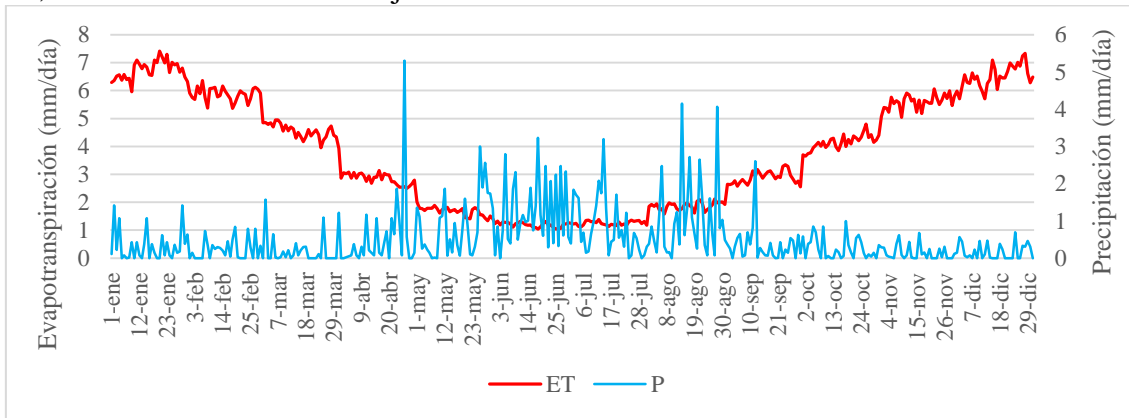


Figura 44. Comportamiento medio diario de evapotranspiración del cultivo de referencia vs. la precipitación en Los Maitenes (2009-2022)

En la estación Buta Ranquil el excedente hídrico se produce en esta estación se observa durante los meses de febrero, abril, mayo, junio, julio y agosto con un pico máximo durante el mes de julio (Figura 45). El promedio medio diario en esta estación es 7,62 mm con un valor medio máximo de 50,56 mm diario en el mes de febrero.

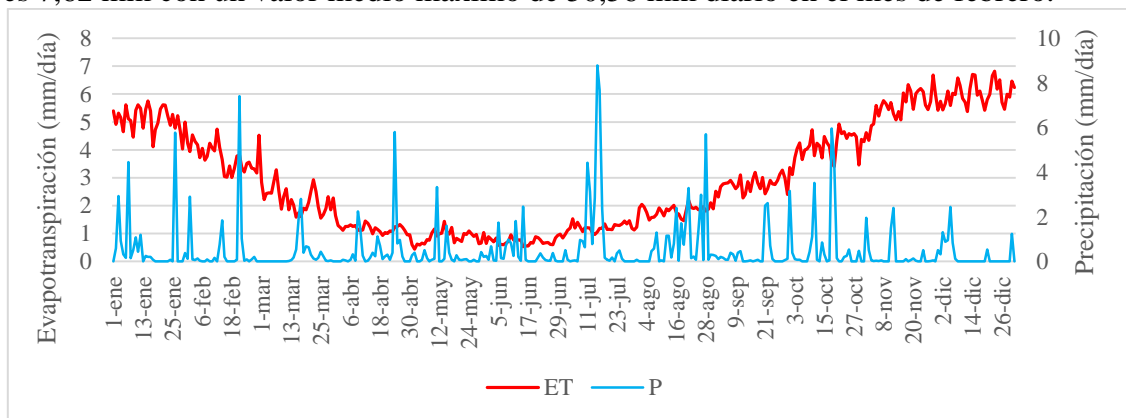


Figura 45. Comportamiento medio diario de evapotranspiración del cultivo de referencia vs. la precipitación en Buta Ranquil (2015-2022)

En la estación Yacimiento Entre Lomas el excedente hídrico se observa durante los meses de mayo, junio, julio y agosto, con un pico en octubre. El pico más marcado se observa durante el mes de mayo (Figura 46). El promedio medio diario en esta estación es 5,78 mm con un valor medio máximo de 52,50 mm diario en el mes de octubre.

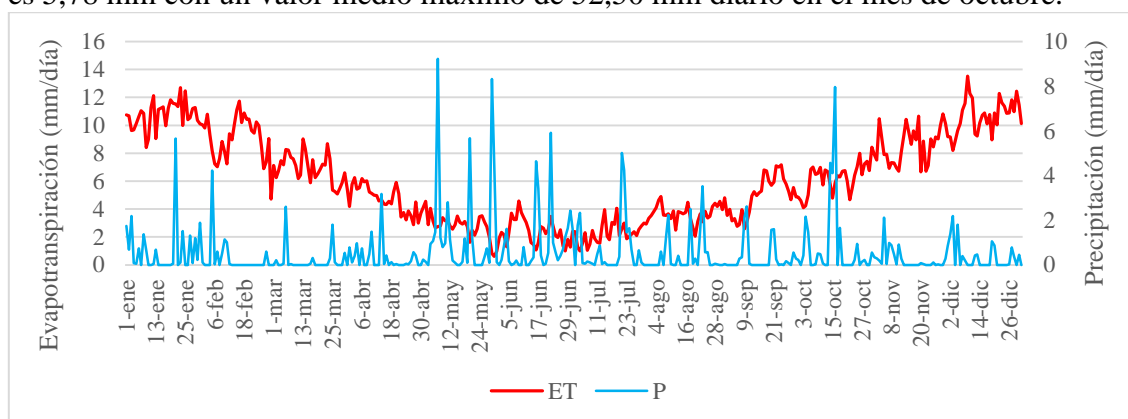


Figura 46. Comportamiento medio diario de la evapotranspiración del cultivo de referencia vs. la precipitación en Yacimiento Entre Lomas (2015 – 2022)

Por último, en la estación Borde Montuoso, al ser una estación con bajas precipitaciones, el exceso que se puede observar se produce únicamente durante el mes de febrero. Durante el resto de los meses, se produce déficit. Este comportamiento se atribuye a la baja cantidad de precipitaciones tomadas en la estación (Figura 47). El valor medio diario es de 1,5 con un valor medio máximo de 63,13 mm diario durante el mes de febrero.

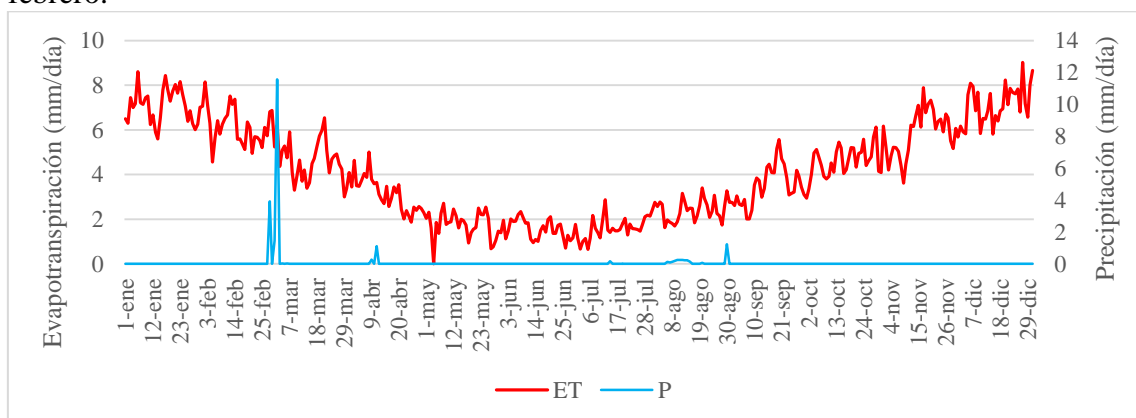


Figura 47. Comportamiento medio diario de la evapotranspiración del cultivo de referencia vs. la precipitación en Borde Montuoso (2016-2022)

A excepción de Borde Montuoso, todas las estaciones presentan excedentes hídricos cuando se considera el balance a escala diaria.

6.3.2 Excedente hídrico diario

Como se mencionó anteriormente, en las regiones áridas y semiáridas, el excedente hídrico se produce durante cortos períodos de tiempo. Las tormentas de alta intensidad se ven representadas por los picos bien marcados en los gráficos. Si bien estos eventos son los que dan lugar a la infiltración y posterior recarga hídrica, también podrían producir, en muchos sitios, que la intensidad de precipitación exceda la capacidad de infiltración de los suelos y genere escorrentía superficial, provocando que el agua no se infiltre en ningún momento.

Considerando la totalidad de datos de la serie de 1999 al 2022 en Bajada del Agrio, se produjo excedente hídrico 449 días. En la Figura 48 se puede observar que los picos máximos de excedente se dieron en los años 2001, 2013 y 2021 con un pico máximo en el 2006 de 58 mm.

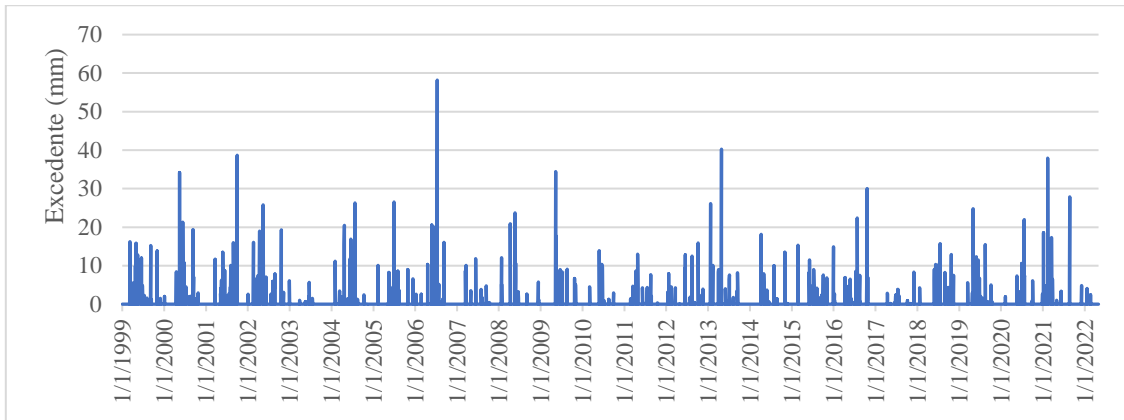


Figura 48. Excedente hídrico diario en Bajada del Agrio (1999-2022)

La estación Balsa Huitrín cuenta con una serie total de datos de 2008 al 2022, donde se produjo excedente hídrico durante 296 días. En la Figura 49 se observar que durante el 2008, 2011 y 2012 ocurrieron excedentes de entre 40 y 45 mm. El pico máximo ocurrió durante el 2009 con un máximo de 62 mm.

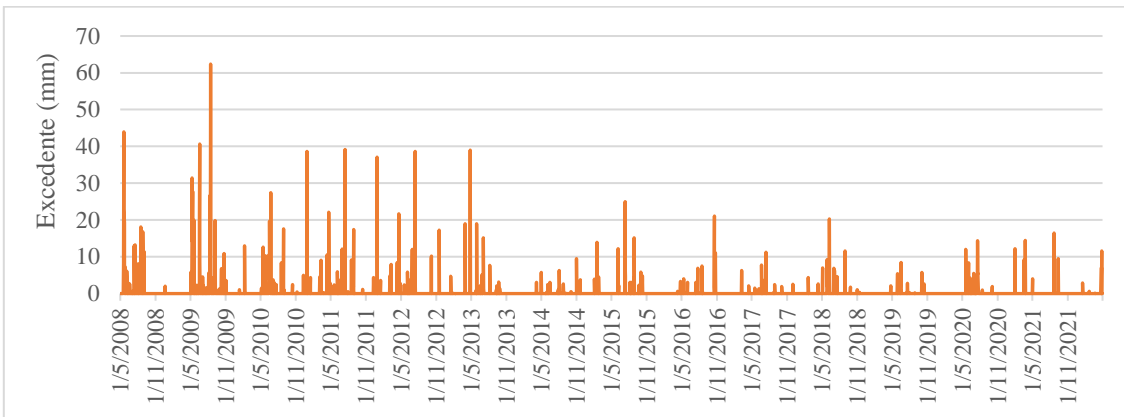


Figura 49. Excedente hídrico diario en Balsa Huitrín (2008-2022)

La estación La Higuera cuenta con una serie de datos que va desde el 1999 al 2022, donde se produjo excedente hídrico durante 357 días. Se puede observar que durante el año 2001 ocurre un excedente máximo de 85 mm, mientras que en el 2009 ocurre otro excedente pero con un valor menor de 45 mm (Figura 50).

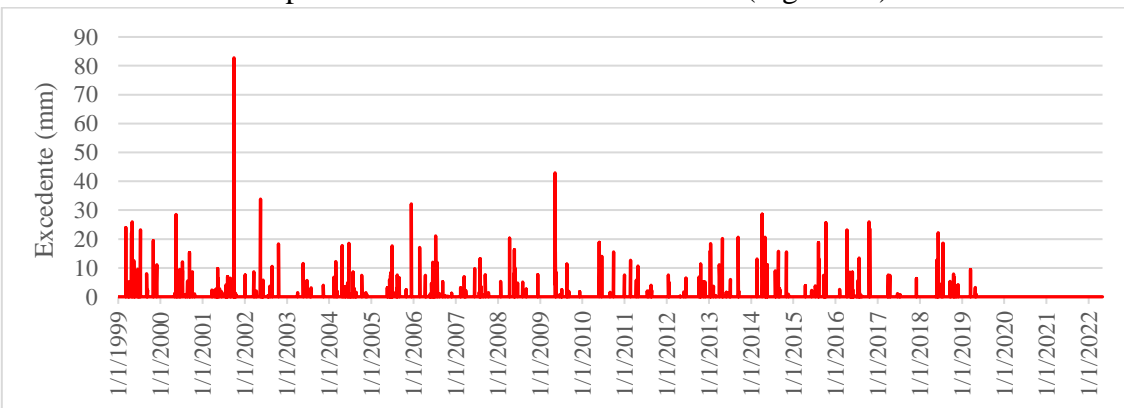


Figura 50. Excedente hídrico diario en La Higuera (1999-2022)

De la totalidad de datos de la serie de 2009 al 2022 en Los Maitenes, solamente se produjo excedente hídrico durante 280 días. En Figura 50 se observa que durante el 2009 se generó el pico más alto de excedentes hídricos de 50 mm. Sin embargo, también se observan otros picos menores en los años 2013, 2017 y 2021 con valores menores de 43, 31 y 30 mm respectivamente.

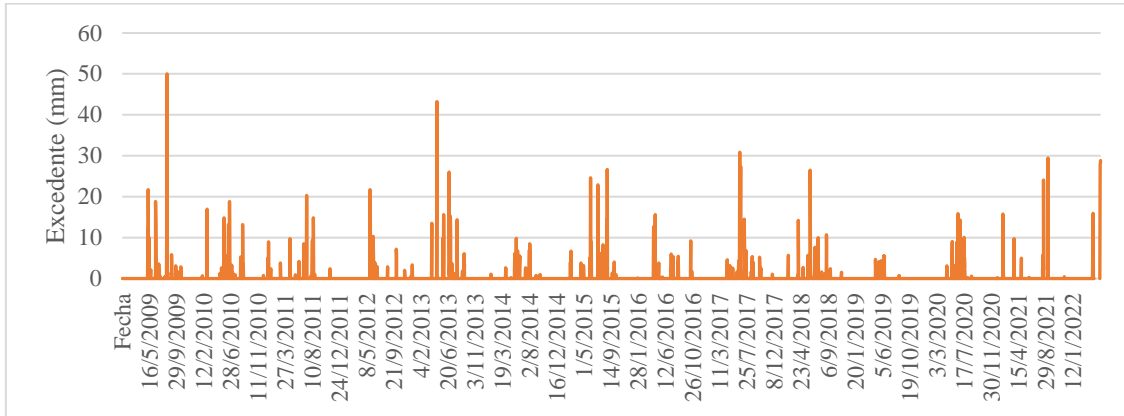


Figura 51. Excedente hídrico diario en Los Maitenes (2009-2022)

La estación Buta Ranquil cuenta con una la serie de datos desde el 2015 al 2022, donde se produjo excedente hídrico solamente durante 115 días. Los picos máximos de excedente hídrico se dieron durante el 2017 y el 2021 de 45 y 51 mm respectivamente (Figura 52).

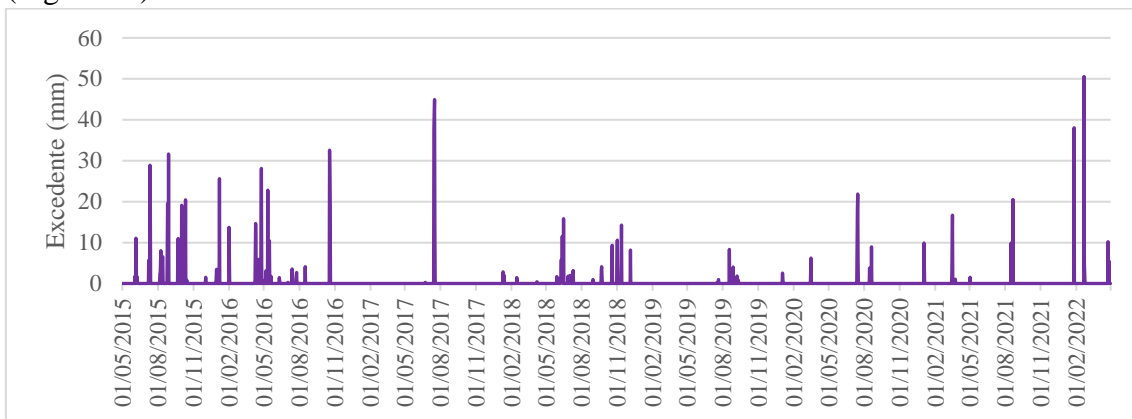


Figura 52. Excedente hídrico en Buta Ranquil (2015-2022)

La estación Yacimiento Entre Lomas cuenta con una la totalidad de datos desde el 2015 al 2022, donde se produjo excedente hídrico durante 158 días. El pico máximo de excedente hídrico se observa durante el mes de septiembre de 2016 con un máximo de 50 mm y otros picos durante el año 2020 con valores que rondan entre 30 mm (Figura 53).

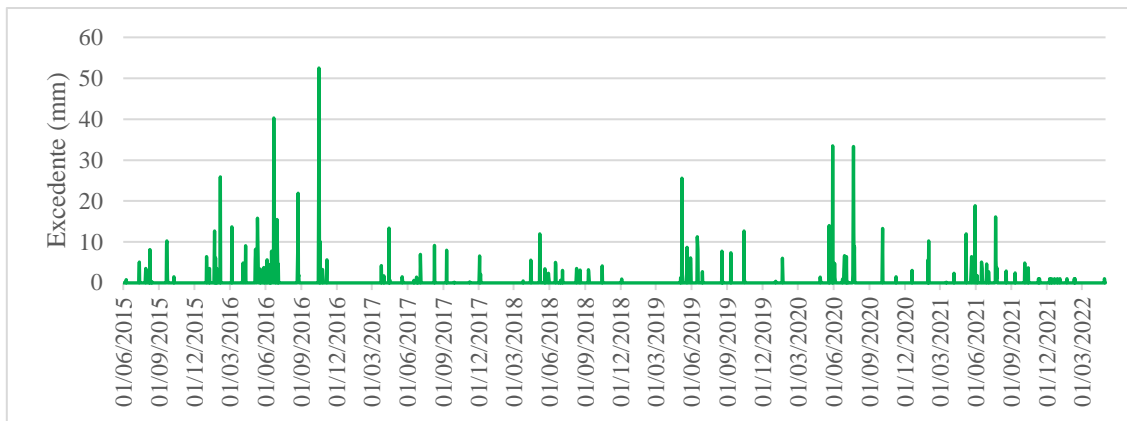


Figura 53. Excedente hídrico en Yacimiento Entre Lomas (2015-2022)

Por último, la estación Borde Montuoso cuenta con un registro que va desde el 2016 al 2022. El excedente hídrico se produjo solamente durante 82 días con un pico durante el año 2017 de 62 mm (Figura 54).

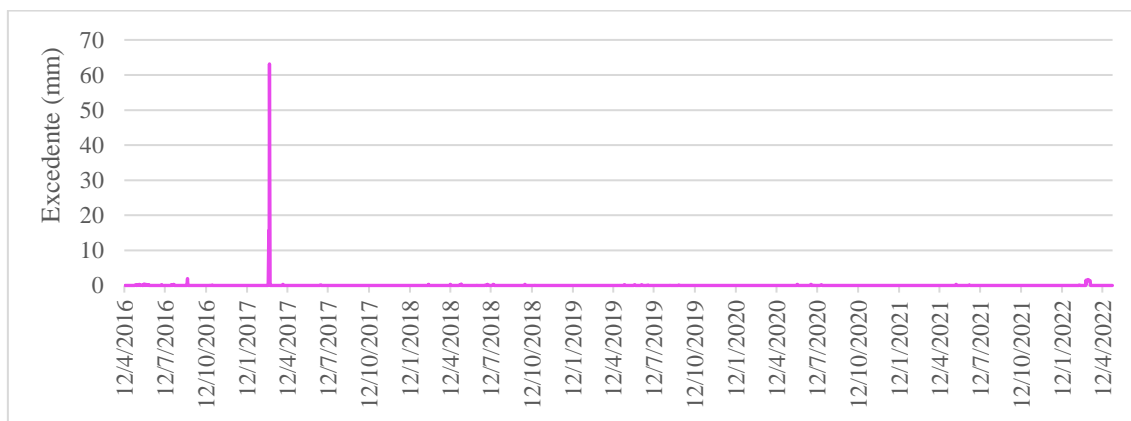


Figura 54. Excedente hídrico en Borde Montuoso (2016-2022)

En todas las series se observa que los excedentes se concentran en los meses de invierno, lo cual ocurre dado el régimen de lluvias y la disminución de la evapotranspiración del cultivo de referencia.

En todas las estaciones se observan picos de valores entre 20 y 60 mm diarios correspondientes a precipitaciones de intensidad media a torrenciales. En estas condiciones meteorológicas, una parte producirá escorrentía superficial y crecidas, según la característica de los factores de la cuenca que intervienen en el proceso lluvia-escorrentía. Es decir, en estos momentos los valores de recarga potencial estimado por este método estarán sobreestimados. Por otro lado, existen días con valores pequeños de excedentes, menores a 2 mm que posiblemente no contribuyan a la recarga.

6.3.3 Distribución espacial del excedente hídrico anual medio

A partir de los excedentes diarios se obtuvieron los valores medios anuales de cada estación (Tabla 13). Como se acaba de comentar, tanto los valores mayores y menores de excedentes diarios pueden producir una recarga menor que el valor estimado. Además, al obtener valores anuales promedio a partir de datos diarios, los picos se atenúan. No se ha realizado la corrección o eliminación de estos valores dada la incertidumbre de estos umbrales (altos y bajos) que deberían obtenerse con una modelación hidrológica continua.

A partir de los promedios anuales se obtuvo la Figura 55 donde se observa la distribución espacial de excedente hídrico anual en el área de estudio. El valor máximo es de 139 mm y ocurren en el noroeste, mientras que el mínimo es de 61 mm anuales, ocurriendo en el este del área de estudio.

Estación	Excedente anual medio (mm)
Bajada del Agrio	110,88
Balsa Huitrín	139,87
La Higuera	90,94
Los Maitenes	121,17
Buta Ranquil	130,83
Yacimiento Entre Lomas	131,94
Borde Montuoso	18,56

Tabla 13. Excedente hídrico anual medio según la estación.

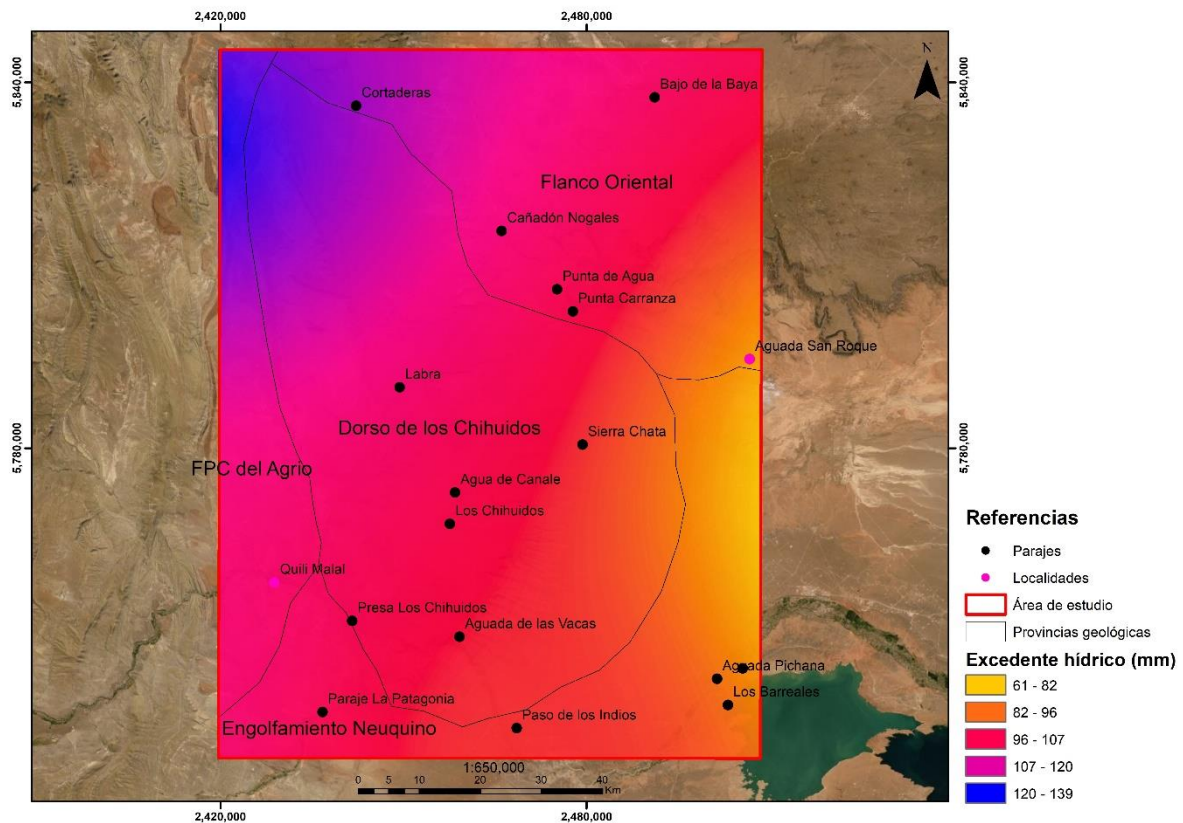


Figura 55. Distribución espacial del excedente hídrico

La Faja plegada y corrida del Agrio posee un excedente medio de 116,9 mm anuales. Además, esta provincia posee un valor máximo de 139 mm y se observa hacia el norte. Hacia el sur, los valores de excedente van decreciendo con un mínimo de 105 mm, representando el valor más alto de los mínimos en el área de estudio.

En el Flanco Oriental se observa un excedente medio de 104,5 mm anuales. El máximo es de 133 mm y se concentra en la región noroeste. El valor mínimo es 69 mm observándose hacia el este.

En el Dorso de los Chihuidos se dispone un valor medio de excedente de 104,7 mm anuales. El valor máximo se observa hacia el noroeste y es de 137 mm, mientras que el mínimo se observa hacia el sureste y es 76,8 mm.

En la zona del Engolfamiento Neuquino se observan los valores medios de excedente más bajos siendo para este caso de 86,6 mm anuales. Como es de esperarse, el

máximo es el más bajo en el área con un valor de 108,9 mm hacia el oeste. En contraste, el mínimo es de 61 mm y se observa hacia el este.

6.4 Recarga potencial

Una fracción del excedente hídrico es capaz de llegar a formar parte de los acuíferos como una recarga potencial. Como se mencionó anteriormente, los valores de Recarga Potencial se obtuvieron multiplicando el excedente hídrico por las Zonas Aptas para la Recarga modificada.

En el área de estudio se observa que los valores de Recarga Potencial anual se dan entre los 0 y los 120 mm anuales. Para analizar la recarga potencial se decidió realizar una descripción según las provincias geológicas (Figura 56) (Tabla 14) y otra según las unidades litológicas aflorantes en el área de estudio (Figura 58) (Tabla 15). Además, se estimó el volumen de agua subterránea que anualmente se acumularía en cada una de las unidades de análisis.

6.4.1 Recarga potencial de las provincias geológicas

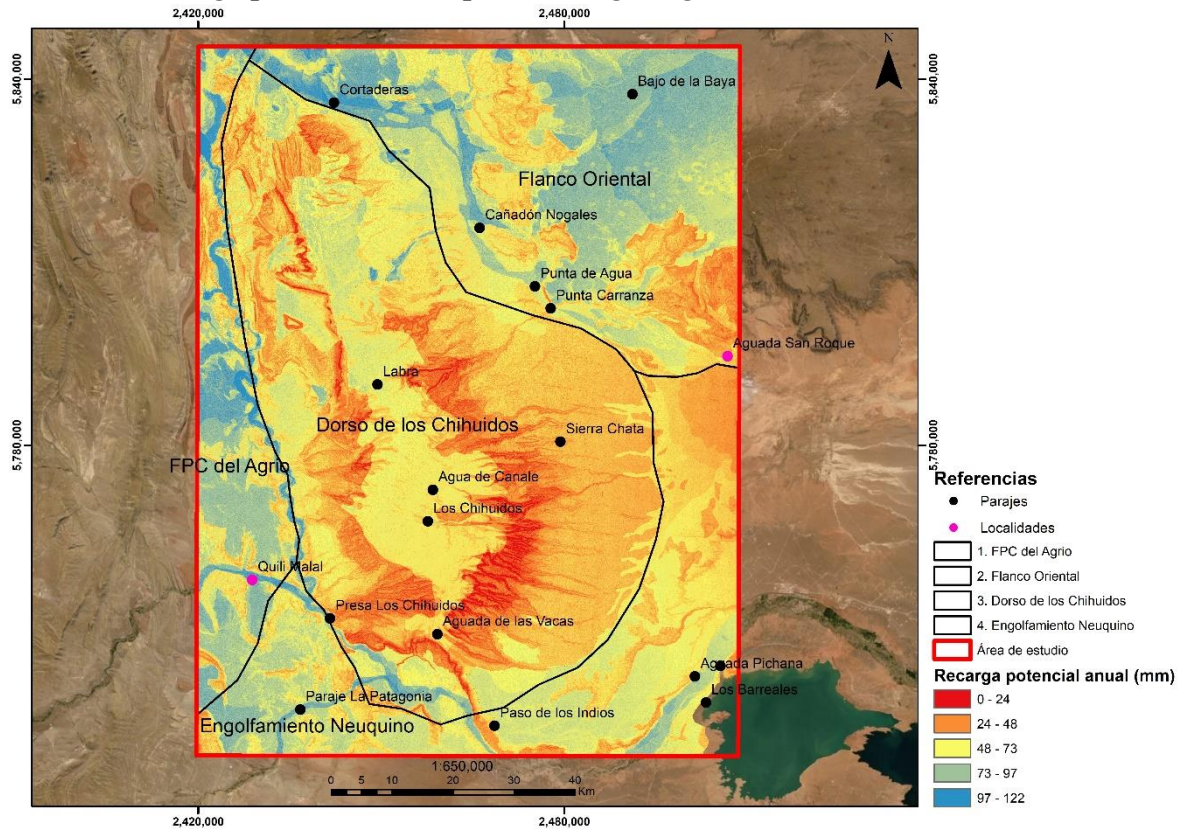


Figura 56. Distribución espacial de la recarga potencial según provincias geológicas

Provincia geológica	Área (km ²)	Precipitación (mm)			Excedente (mm)			Recarga potencial (mm)			Recarga vol. (hm ³)
		Min	Max	Media	Min	Max	Medio	Min	Max	Medio	
FPC del Agrio	966,1	157,8	197,3	171,4	105,2	139,0	116,9	15,8	122,2	63,4	61,2
Flaco Oriental	2712,2	102,2	192,0	153,9	69,3	133,5	104,5	13,0	111,6	59,3	161,0
Dorso de los Chihuidos	4664,5	115,7	195,9	156,7	76,8	137,6	104,7	0,0	109,9	40,7	190,1
Engolfamiento Neuquino	1886,9	90,5	161,1	133,1	61,3	108,9	86,6	14,6	97,4	49,9	94,2

Tabla 14. Valores de precipitaciones anuales, excedentes anuales y recarga potencial anual de las distintas provincias geológicas

La zona de la Faja Plegada y Corrida del Agrio posee una RP mínima de 15,8 mm y un valor máximo de 122,21 mm. El valor medio de recarga potencial que se le asigna a esta provincia geológica es de 63,40 mm anuales. La FPC del Agrio representa un 9 % del total de la superficie del área de estudio y su recarga potencial volumétrica es de 61,25 hm³ anuales.

La provincia geológica del Flanco Oriental cuenta con una RP mínima de 13,00 mm y un valor máximo de 111,65 mm, mientras que el valor medio es de 59,39 mm anuales. La recarga potencial volumétrica que se genera es de 161,08 hm³ anuales. En esta provincia geológica se encuentra el campo volcánico Auca Mahuida con su extensa área basáltica propicia para la recarga potencial.

La provincia geológica del Dorso de los Chihuidos cuenta con un valor mínimo de RP de 0 mm y un máximo de 109,90 mm y con un valor medio de RP en esta provincia es de 40,76 mm. Se puede observar que, si bien el valor mínimo es el más bajo de RP en el área de estudio, la recarga potencial volumétrica es la mayor, contando con un total de 190,12 hm³ anuales. Este valor elevado de recarga volumétrica se produce debido a que esta provincia geológica cuenta con una extensa superficie (que representa casi el 50% del área de estudio) que permite la recarga potencial de importantes volúmenes de agua que pueden infiltrar en los acuíferos.

El Engolfamiento Neuquino cuenta con un valor mínimo de RP de 14,62 mm, un máximo de 97,42 mm y un valor medio de recarga potencial de 49,97 mm anuales. Esta provincia representa un 18% del área total y posee una recarga potencial volumétrica de 94,28 hm³ anuales. Los valores más bajos de RP se encuentran en el Bajo de Añelo y los valores más altos de RP se observan en las planicies aluviales actuales.

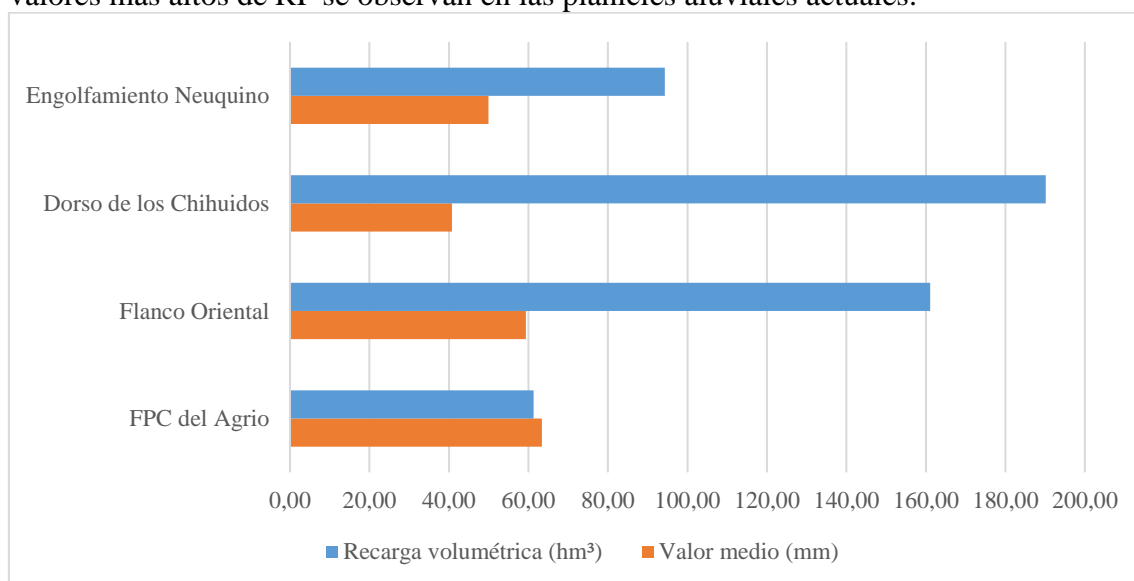


Figura 57. Recarga potencial media anual (mm) y recarga potencial volumétrica (hm³) según las provincias geológicas en el área de estudio

6.4.2 Recarga Potencial de las unidades geológicas aflorantes

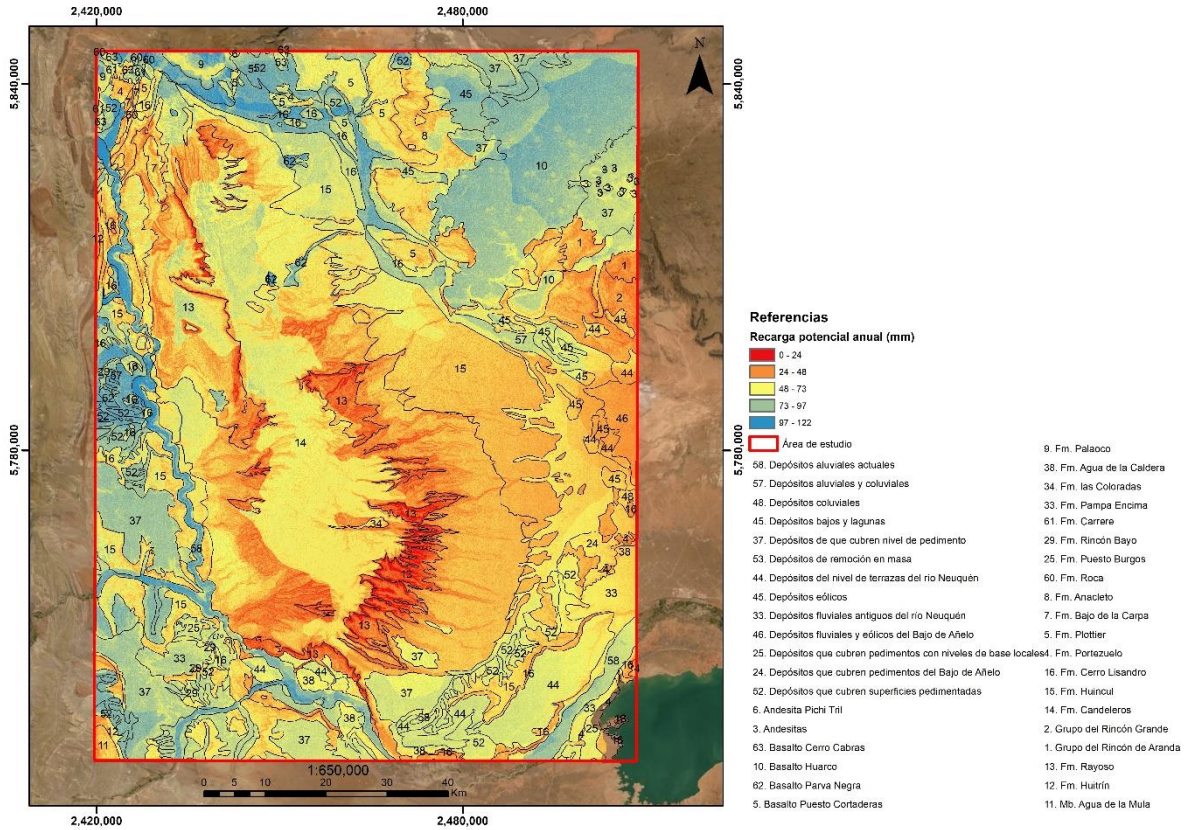


Figura 58. Distribución espacial de la recarga potencial anual según las unidades geológicas aflorantes

Unidad geológica	Cod	Área (km ²)	Recarga potencial (mm)			Recarga a vol. (hm ³)
			Mín.	Máx.	Medio	
Fm. Candeleros	6	2904,7	0,00	100,60	41,07	119,31
Fm. Huincul	7	1363,1	16,03	100,73	44,02	60,00
Basalto Huarco	23	849,8	13,37	91,25	68,97	58,61
Dep. aluviales y coluviales	36	910,7	8,67	122,18	60,19	54,81
Dep. que cubren nivel de pedimento	39	656,6	16,75	90,85	63,66	41,79
Dep. aluviales actuales	38	368,9	11,96	122,21	71,82	26,50
Fm. Rayoso	3	807,8	0,00	104,28	30,67	24,77
Dep. que cubren superficies pedimentadas	27	342,1	23,61	111,61	67,70	23,16
Dep. del nivel de terrazas del río Neuquén	37	280,5	22,21	94,96	54,64	15,33
Fm. Plottier	10	261,8	18,25	102,48	50,66	13,26
Dep. eólicos	34	176,0	18,02	90,59	59,26	10,43
Fm. Anacleto	12	229,3	16,00	89,53	45,07	10,34
Fm. Cerro Lisandro	8	168,8	15,96	106,96	48,29	8,15
Gpo. Rincón Grande	5	206,6	13,00	75,50	35,24	7,28
Dep. fluviales antiguos del río Neuquén	31	117,1	22,08	79,58	46,67	5,46
Fm. Palaoco	20	53,4	35,26	111,65	65,81	3,51
Fm. Pampa Encima	17	48,9	32,12	74,69	62,05	3,04
Fm. Agua de la Caldera	19	52,6	16,41	84,15	51,36	2,70
Gpo. Rincón de Aranda	4	64,8	13,21	73,01	33,00	2,14
Dep. que cubren pedimentos del Bajo de Añelo	28	49,4	24,42	52,83	42,58	2,10
Dep. fluviales y eólicos del Bajo de Añelo	30	67,0	17,10	42,85	30,82	2,07
Dep. bajos y lagunas	33	43,5	18,09	56,32	36,70	1,60
Basalto Parva Negra	22	19,4	35,67	102,83	73,69	1,43
Fm. Bajo de la Carpa	10	28,1	1,62	99,53	41,01	1,15
Fm. Rincón Bayo	15	19,8	31,84	92,10	58,28	1,15
Fm. Portezuelo	9	28,1	19,35	99,38	40,17	1,13
Dep. que cubren pedimentos con niveles de base local	29	16,6	29,75	59,38	51,70	0,86
Fm. Puesto Burgos	14	11,4	32,10	73,04	57,57	0,66
Basalto Cerro Cabras	24	10,4	27,20	97,96	61,99	0,64
Mb. Agua de la Mula	1	16,5	14,62	53,46	38,00	0,63
Fm. Huitrín	2	13,8	14,63	71,28	40,72	0,56
Fm. Carrere	16	7,9	35,03	100,49	64,44	0,51
Andesitas	25	7,0	45,50	78,49	53,14	0,37
Dep. de remoción en masa	32	5,2	49,16	86,96	63,43	0,33
Dep. coluviales	35	8,0	24,35	45,78	40,51	0,32
Fm. las Coloradas	18	6,2	14,36	67,70	42,69	0,26
Fm. Roca	13	5,0	25,51	83,81	51,54	0,26
Andesita Pichi Tril	26	1,1	41,78	73,67	47,99	0,05

Tabla 15. Recarga potencial anual (mm) y recarga potencial (hm³) según las unidades geológicas aflorantes

Se observa que, en primer lugar, la Fm. Candeleros y, en segundo lugar, la Fm. Huincul, representan las unidades de mayor recarga potencial volumétrica anual en el área de estudio. Estas dos unidades pertenecen a la sección inferior del Gpo. Neuquén (Subgrupo Río Limay) y afloran sobre el Dorso de los Chihuidos. La Fm. Candeleros aflora en el centro del área de estudio y es la unidad que posee una recarga potencial más alta con un volumen de 119,30 hm³ anuales. La Fm. Huincul cuenta con una recarga potencial volumétrica de 60,00 hm³ anuales. Cabe destacar que si bien estas dos tienen valores medios de RP similares, cuentan con superficies aflorantes de diferente extensión, con áreas de 2904,7 y 1363,1 km² respectivamente. En la Fm. Candeleros las areniscas son compactas por lo que la RP ocurre a través de las fracturas, mientras que en la Fm. Huincul las areniscas son más porosas y la recarga ocurre por infiltración en un medio poroso. Como se mencionó en el apartado 4, autores como Meconi (2016) definen a estas formaciones como un extenso complejo regional de areniscas y conglomerados interconectados que forman un área de recarga.

El Basalto Huarco aflora en la región noreste del Flanco Oriental, en el complejo volcánico Auca Mahuida y forma una extensa meseta basáltica que procede del volcán y cubre un 8,3% de la superficie total del área de estudio. Esta unidad cuenta con uno de los valores medios de recarga potencial más altos (68,97 mm anuales) y su recarga potencial volumétrica es de 58,61 hm³. Cabe destacar que la recarga en esta unidad se produce de manera vertical a través de un sistema de fracturas verticales, siendo muy eficaz en el proceso de infiltración del agua. Sobre esta formación se observan unos afloramientos de cuerpos andesíticos muy pequeños que poseen una recarga potencial volumétrica de 0,37 hm³ anuales.

Los afloramientos de los Depósitos (Dep.) aluviales y coluviales se encuentran inmediatamente hacia los bordes del Dorso de los Chihuidos y constituyen un área del 8,9 %. Cuentan con un valor medio de 64 mm anuales y con una recarga potencial volumétrica de 54,8 hm³ anuales. Esta unidad posee una alta recarga potencial ya que son depósitos caracterizados por gravas, bloques y arenas, las cuales permiten la infiltración de agua hacia los acuíferos.

Los Depósitos que cubren el nivel de pedimento afloran en las regiones suroeste y noreste y comprenden una superficie del 3,34 %. Poseen un valor medio de recarga potencial de 67,7 mm anuales y la recarga potencial volumétrica de esta unidad es de 23,16 hm³ anuales.

Los Depósitos aluviales actuales corresponden a los sedimentos (arenas, gravas y limos) transportados por los cursos fluviales y conforman las planicies de inundación de los cauces hídricos que hay en el área de estudio: río Neuquén, río Agrio y arroyo Covunco. Ocupan un área de 368,9 km² (3,60 % del área total) y se encuentran en sectores planos y deprimidos. Tienen un valor medio de recarga potencial alto de 71,82 mm y una recarga potencial volumétrica de 26,49 hm³.

La Fm. Rayoso representa la sexta unidad en importancia de recarga potencial en el área de estudio. Si bien esta formación representa el valor medio más bajo de RP (30,67 mm anuales), abarca un gran área de casi el 7,89 % del área total de estudio. Aflora únicamente sobre el Dorso de los Chihuidos, formando lo que se conoce como las Cárceles, y está constituida por areniscas finas a medias. La recarga potencial volumétrica es de 24,77 hm³ anuales. Esta unidad ha sido definida por diversos autores como un nivel que aloja múltiples acuíferos. Otra formación que también pertenece al Grupo Bajada del Agrio, es la Fm. Huitrín que cuenta con un área muy reducida (0,13%), con un valor medio de recarga potencial de 40,72 mm y una recarga potencial volumétrica de 0,56 hm³ anuales.

Otros depósitos actuales son los Depósitos eólicos, Depósitos de remoción en masa y Depósitos de coluviales. Los primeros afloran en las regiones deprimidas hacia las afueras del volcán Auca Mahuida y cuentan con un área total de 175,9 km² (1,72%). Su valor de RP medio es de 59,26 mm y su recarga potencial volumétrica es de 10,42 hm³ anuales. Los Depósitos de remoción en masa y los Depósitos coluviales cuentan con superficies muy restringidas de 5,21 y 7,97 km² respectivamente. Sus valores medios de RP son 63,43 y 40,51 mm con recargas potenciales volumétricas de 0,33 y 0,32 hm³ anuales respectivamente.

Los depósitos y formaciones de edad pleistocena son: Fm. Las Coloradas, Fm. Agua de la Caldera, Depósitos del nivel de terrazas del río Neuquén y los Depósitos fluviales antiguos del río Neuquén. La primera unidad aflora en un área muy restringida sobre el Dorso de los Chihuidos, inmediatamente al lado del paraje Los Chihuidos y está formada por depósitos de conglomerados de basaltos y andesitas y areniscas gruesas. Tienen una RP media de 42,6 mm y una recarga potencial volumétrica de 0,26 hm³ anuales. La Fm. Agua de la Caldera aflora en el valle del tramo inferior del río Neuquén, aguas debajo de la localidad de Paso de los Indios y está conformada por conglomerados y areniscas finas. Cuenta con una RP media de 54,6 mm y su recarga potencial volumétrica es de 2,69 hm³ anuales. Los Depósitos del nivel de terrazas del río Neuquén afloran en los márgenes del río Neuquén con un área de 280,5 km² y están caracterizados por conglomerados. Tienen un valor medio de RP de 58,7 mm y una recarga potencial volumétrica de 15,32 hm³ anuales. Los Depósitos fluviales antiguos del río Neuquén afloran en la región sur del área de estudio y representan acumulaciones de gravas y arenas localmente dispuestas en distintos niveles topográficos, flanqueando la planicie aluvial actual. Esta unidad se caracteriza por ser conglomerados, gravas y arenas y cuentan con un área de 117 km², representando un 1,14% de la superficie total. Tienen un valor de RP medio de 46,6 mm y una recarga potencial volumétrica de 5,46 hm³.

El Bajo de Añelo constituye una amplia cuenca endorreica con drenaje centrípeto que se encuentra en la región este del Engolfamiento Neuquino, cercano a la localidad de Aguada San Roque. En esta región afloran los Depósitos fluviales y eólicos del Bajo de Añelo y los Depósitos que cubren pedimentos del Bajo de Añelo. Cuentan con superficies de 67 y 49,3 km² respectivamente representando un 0,65 y un 0,48 % del área total. Estas dos unidades poseen valores bajos de RP y tienen un valor medio de 30,8 y 42,5 mm respectivamente. La recarga potencial volumétrica es de 2,06 hm³ anuales para los primeros y de 2,10 hm³ anuales para los segundos. Además, se observan en esta zona Depósitos bajos y lagunas que están caracterizados por sedimentos limosos a arcillosos, lo que provoca un valor medio de RP muy bajo de 36,7 mm, con una recarga potencial volumétrica de 1,59 hm³ anuales. Este bajo podría ser interpretado como una zona de descarga.

Dentro del Neógeno se puede observar las unidades: Fm. Puesto Burgos, Fm. Rincón Bayo, Fm. Pampa Encima y el Basalto Parva Negra. La primera aflora en el paraje Presa Los Chihuidos, sobre el margen derecho del río Neuquén y está conformada por tobas, limolitas y arcillas. Esta unidad tiene un área pequeña de 11,42 km². Su valor medio de RP es de 57,5 mm y su recarga potencial volumétrica es de 0,65 hm³ anuales. La Fm Rincón Bayo aflora cerca del paraje La Patagonia y dentro de la FPC del Agrio, ubicada inmediatamente al oeste del río Neuquén y está conformada por sedimentitas epi- y piroclásticas. Representan una superficie de 19,79 km² (0,19 % de la superficie total). Su valor medio de RP es de 58,2 mm y su recarga potencial volumétrica es de 1,15 hm³ anuales. La Fm. Pampa Encima aflora hacia el oeste del río Neuquén, conforma un nivel de agradación y está formada por rodados de rocas ígneas y metamórficas mesozoicas. Abarca un área muy pequeña de 48,91 km², posee un valor medio de RP es de 62,05 mm

y una recarga potencial volumétrica de 3,03 hm³ anuales. Por último, el Basalto Parva Negra comprende una serie de aparatos volcánicos monogénicos que afloran en la región norte del Dorso de los Chihuidos. Esta unidad posee el valor más alto de RP media con un valor de 73,69 mm anuales aunque cuenta con un área muy pequeña de 19,35 km². Su recarga potencial volumétrica es de 1,42 hm³ anuales.

Dentro del Paleógeno se encuentran la Fm. Carrere, Fm. Palaoco, Basalto Cerro Cabras y la Andesita Pichi Tril. Todas estas unidades afloran en el norte-noroeste del área de estudio. Los afloramientos de la Fm. Carrere se ubican al norte de la región de la FPC del Agrio. Estos afloramientos son muy pequeños y cuentan con un valor medio de RP de 64,4 mm. Su recarga potencial volumétrica es de 0,51 hm³ anuales. La Fm. Palaoco está conformada por basaltos y afloran en la Sierra de Huantraico-Negra. Esta unidad posee uno de los valores medio de RP más alto con un valor de 65,8 mm y su recarga potencial volumétrica es de 3,51 hm³ anuales. El Basalto Cerro Cabras está conformado por manifestaciones basálticas que poseen un valor medio de RP de 61,99 mm y una recarga potencial volumétrica de 0,64 hm³ anuales. La Andesita Pichi Tril se compone por tres cuerpos andesíticos con áreas muy restringidas de 1,06 km². Su recarga potencial volumétrica es de 0,05 hm³ anuales.

Dentro del Gpo. Neuquén, además de las Fm. Candeleros y Huincul, también se encuentran otras unidades con afloramientos de sedimentitas cretácicas superiores en el área de estudio. Estas tienen valores mucho más bajos en términos de recarga potencial volumétrica. La Fm. Cerro Lisandro representa al puesto 13 en importancia en la recarga potencial volumétrica con un valor de 8,15 hm³ anuales. Los afloramientos de las Fms. Portezuelo y Plottier representan el puesto 26 y 10 de importancia en la recarga potencial volumétrica con valores de 1,12 y 13,26 hm³ anuales respectivamente. También, se observan afloramientos de las Fms. Bajo de la Carpa y Anacleto, los cuales representan el puesto 24 y 12 con valores de 1,15 y 10,33 hm³ respectivamente. Cabe destacar que si bien todo el Gpo. Neuquén está compuesto por distintas proporciones de areniscas, conglomerados y fangolitas, lo que difiere en los volúmenes de recarga potencial anual es el área que estas unidades abarcan; mientras abarquen mayores superficies, mayor será el volumen de recarga. La Fm. Bajo de la Carpa es la única que solo se encuentra hacia el noroeste. Por otro lado, dentro del Cretácico Superior se encuentra la Fm. Roca, compuesta por calizas y margas con afloramientos muy pequeños donde su recarga potencial volumétrica es de 0,25 hm³ anuales.

Los Gpos. del Rincón Grande y del Rincón de Aranda afloran en la región noreste del área de estudio, en las inmediaciones del volcán Auca Mahuida. El primero está conformado por grandes bancos de limo y areniscas. Aflora con una superficie de 206,5 km² que representan un 2 % de la superficie total. Este grupo cuenta con una RP media baja de 35,24 mm. Si bien la RP es baja, la recarga potencial volumétrica es 7,27 hm³ anuales. El Gpo. Del Rincón de Aranda también está formado por areniscas pero con mayor contenido de arcilla. Esta unidad posee una superficie menor de 64,8 km² y una recarga potencial volumétrica de 2,13 hm³ anuales.

El Mb. Agua de la Mula pertenece a la Fm. Agrio y conforma la unidad más antigua presente en el área de estudio. Cuenta con un afloramiento restringido de 16,5 km² hacia la región suroeste con un valor medio de RP de 38,0 mm. Su recarga potencial volumétrica es de 0,62 hm³ anuales.

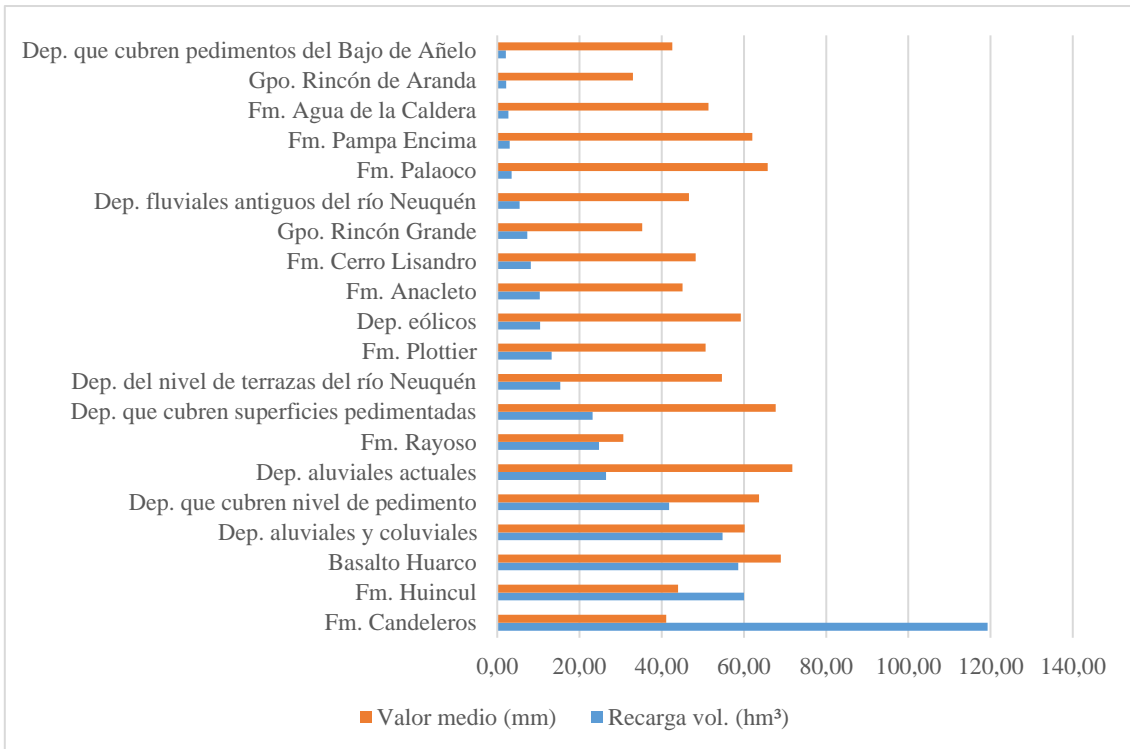


Figura 59. Recarga potencial media anual (mm) vs recarga potencial volumétrica anual (hm³) de las unidades geológicas aflorantes

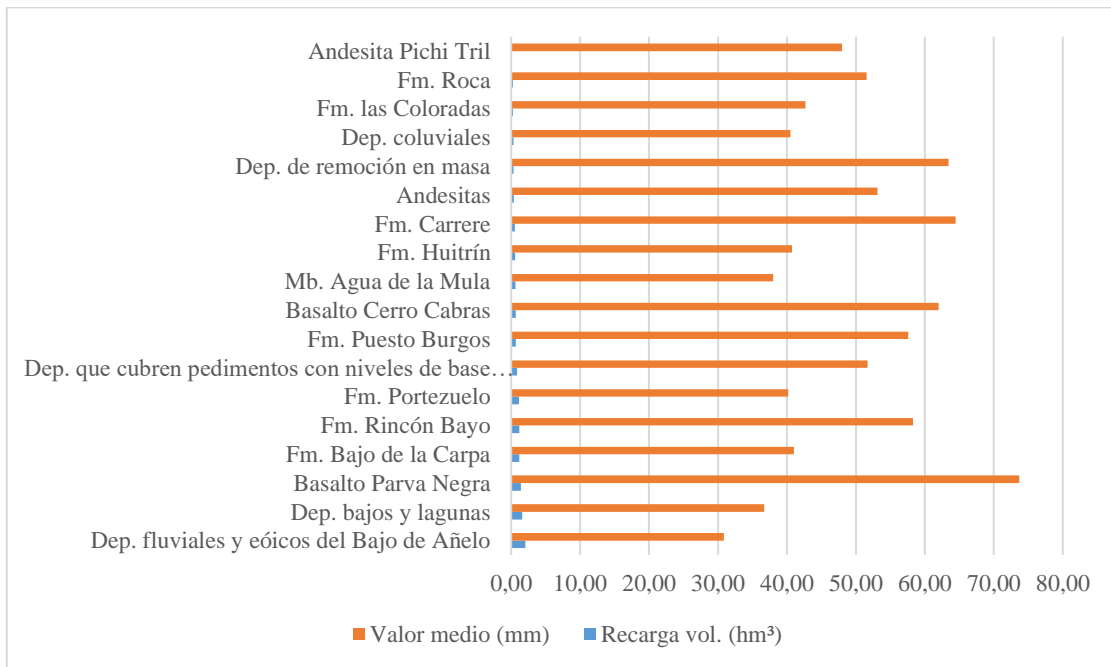


Figura 60. Recarga potencial media anual (mm) vs recarga potencial volumétrica anual (hm³) de las unidades geológicas aflorantes

6.4.3 Comparación y validación con estudios previos

Uno de los objetivos de este trabajo fue realizar una comparación y validación con los resultados obtenidos en estudios previos. El único disponible es el de Gatica (2017), quien calculó la recarga potencial hídrica anual para toda la provincia de Neuquén en una escala 1:500.000.

Provincia geológica	Gatica (2017)				Toth (2022)			
	P media anual (mm)	RP anual (mm)			P media anual (mm)	RP anual (mm)		
		Min	Max	Medio		Min	Max	Medio
FPC del Agrio	299,89	71,28	212,76	139,76	171,46	15,89	122,21	63,40
Flanco Oriental	234,69	21,28	160,90	87,22	153,92	13,00	111,65	59,39
Dorso de los Chihuidos	248,86	26,27	190,71	78,66	156,71	0,00	109,90	40,76
Engolfamiento Neuquino	237,40	7,99	191,11	90,43	133,14	14,62	97,42	49,97

Tabla 16. Comparación con los resultados de recarga potencial obtenidos por Gatica (2017) para el área de estudio

En la Tabla 16 se sintetizan los valores de recarga potencial en las provincias geológicas presentes en el área de estudio. Se puede observar que los valores medios de recarga hídrica potencial entre ambos trabajos son diferentes. Los datos medios de RP anual obtenidos por Gatica son mayores. Sin embargo, las relaciones porcentuales entre la precipitación media anual y la recarga potencial media anual en el Dorso de los Chihuidos de ambos trabajos no son sustancialmente diferentes puesto que la relación es del 31% en el trabajo de Gatica y del 26 % en el presente trabajo. Esto ocurre porque los valores de precipitación tomados en el estudio de Gatica (2017) son mayores que los valores tomados para el presente trabajo. De esta variable de entrada (precipitación) se desprenden varias líneas de análisis.

Estas diferencias obedecen las siguientes causas:

- En Gatica (2017) se utilizaron datos pertenecientes al *software* LocClim que trabaja con las estaciones informadas a FAO y estima las condiciones climáticas mientras que en este trabajo se utilizaron datos de estaciones meteorológicas presentes en el área de estudio que no están incluidas en LocClim.
- En Gatica se utilizaron datos mensuales mientras que en este trabajo el análisis de los datos fue diario. Esto refleja que el método es muy sensible a la escala temporal del factor de entrada que es la precipitación.
- Otro factor que puede afectar al valor final de la recarga potencial anual es la evapotranspiración, ya que para el presente trabajo se utilizaron los métodos de Penman-Monteith y Hargreaves y en Gatica sólo Penman-Monteith.
- La escala espacial de análisis es distinta, Gatica utilizó una escala de 1:500.000, mientras que para este trabajo se utilizó una escala de 1:250.000.

Tanto el aumento de resolución temporal como espacial del análisis realizado en el presente estudio, permiten considerar que los valores de recarga potencial obtenidos se ajustan mejor a las condiciones físicas y climáticas en el Dorso de los Chihuidos.

6.5 Modelo conceptual de recarga

El clima regional árido y semiárido determina una baja disponibilidad de agua para los procesos de escorrentía superficial directa e infiltración. Sin embargo, los suelos pocos desarrollados de textura gruesa y las rocas sedimentarias aflorantes permiten la infiltración rápida y la percolación profunda originando la recarga de los acuíferos. Contribuye a esta recarga la existencia de vegetación de monte y estepa con bajo requerimiento hídrico adaptada a las condiciones climáticas de aridez.

La recarga hídrica se produce en otoño e invierno cuando las precipitaciones aumentan y disminuye la evapotranspiración. Dentro de este período, la recarga hídrica se concentra en períodos de tiempo más cortos donde efectivamente ocurren excedentes hídricos. De ahí la importancia de realizar los balances hidrológicos a escala diaria en

regiones de clima áridos. En contraste, durante las estaciones de primavera y verano, la recarga hídrica es mínima a nula, debido al aumento de la evapotranspiración, factible únicamente durante precipitaciones torrenciales.

Con la información disponible, se concluye que la principal y única fuente de recarga superficial es la precipitación (lluvia y nieve). La recarga inducida en el lecho del río Neuquén es factible pero no ha sido analizada. Se descarta el aporte significativo de agua desde otros acuíferos.

La infiltración en los cauces efímeros presentes en los flancos del Dorso, genera acuíferos someros no permanentes y contribuye a la recarga de los acuíferos profundos regionales.

La estructura anticlinal del Dorso (Figura 61) genera una divisoria de agua del agua recargada, con flujos divergentes hacia el Bajo de Añelo al este y el río Neuquén al oeste. En la zona más elevada, donde se produce la recarga, los acuíferos tienen un comportamiento hidráulico de tipo libre y luego a medida que los flujos se alejan de esta zona, se vuelven confinados permitiendo la existencia de una zona de surgencia al este en el Bajo de Añelo. En el flanco oeste, los flujos podrían descargar en el río Neuquén y además, las condiciones potenciométricas están dadas para que se produzca la recarga de otros acuíferos confinados dentro de la Faja Plegada del Agrio (al oeste del río Neuquén). Esta situación no ha sido analizada en el presente trabajo

Precipitación

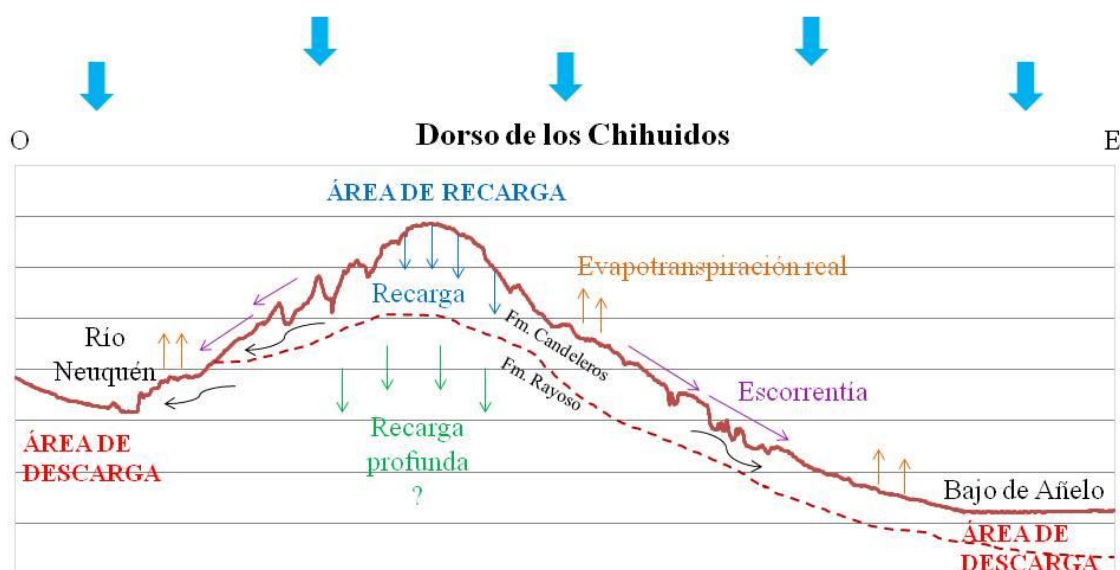


Figura 61. Modelo conceptual de la recarga en el Dorso de los Chihuidos

La precipitación media anual de 157 mm anuales en el Dorso de los Chihuidos produce una recarga potencial promedio de 41 mm anuales (190,12 hm³ anuales). El valor medio de recarga representa un 26% de la precipitación media anual.

Las unidades hidrogeológicas aflorantes en el Dorso de los Chihuidos de interés regional son la Fm. Rayoso y la sección inferior del Gpo. Neuquén (Fms. Huincul y Candeleros). La Fm. Rayoso posee una recarga media potencial de 30,46 mm (23,68 hm³) que representa un 19 % de la precipitación media anual. En el Gpo. Neuquén la recarga es de 41 mm correspondiente a 26% de la precipitación media anual. Esta lámina de recarga en la Fm. Huincul representa un volumen de 29,14 hm³ y en la Fm. Candeleros 113,37 hm³ anuales (mayor volumen dado que tiene una superficie aflorante mayor). Por otro lado, otra unidad aflorante de interés son los depósitos aluviales actuales, los cuales

tienen una recarga de 72 mm (6,70 hm³) que corresponden a un 46% de la precipitación media anual.

El Dorso de los Chihuidos presenta una especial importancia al ser un área de recarga de los flujos locales y regionales. Esta condición le confiere una vulnerabilidad intrínseca elevada a las actividades que se realizan en la superficie y requiere una gestión ambiental acorde.

7. CONCLUSIONES

Este trabajo permitió estimar la recarga potencial de acuíferos en el área de estudio y determinó la recarga potencial ponderada de 50 mm, equivalentes a unos 153 hm³ anuales. A pesar de ser una región árida, la recarga hídrica se ve favorecida en los meses otoñales e invernales, durante los cuales existen mayores aportes pluviales, las temperaturas son mínimas y los valores de evapotranspiración descienden, posibilitando la recarga hídrica y el desarrollo de acuíferos.

Los valores de recarga potencial se estimaron utilizando métodos empíricos teniendo en cuenta las condiciones del terreno, el tipo de suelo, las unidades geológicas, la presencia de vegetación, el uso de suelo y las condiciones climáticas (precipitación y evapotranspiración del cultivo de referencia) del área de estudio mediante un SIG.

Se determinó que en el Dorso de los Chihuidos la recarga potencial anual es de 190,12 hm³, representando el 37,51 % de la recarga potencial anual total en el área de estudio. Las unidades hidrogeológicas más importantes en esta provincia son el Gpo. Neuquén (Fm. Candeleros y Huincul) y la Fm. Rayoso. Si bien estas rocas no cuentan con los valores de RP medios más altos, ocupa el 50% del área total de estudio.

En la región del Flanco Oriental se determinó que la recarga potencial anual es de 161,08 hm³, la cual representa el 31,78 % de la recarga potencial anual total. La unidad de mayor importancia en la recarga es el Basalto Huarco, constituyendo una gran área de recarga con sedimentos de alta permeabilidad como lo son las rocas volcánicas con alta fracturación y coladas basálticas. Además, la Sierra de Huantraico - Negra también constituye un área de recarga donde aflora la Fm. Palaoco.

En la región del Engolfamiento Neuquino la recarga potencial es de 94,28 hm³ anuales, representando un 18,60 % de la recarga potencial anual total del área de estudio, siendo la unidad de mayor interés los depósitos de las planicies aluviales actuales. Estos depósitos en contacto con las rocas de la Fm. Rayoso y el Gpo. Neuquén, producirían recarga inducida a través del lecho de río, pero no ha sido cuantificado en este estudio.

La región de la Faja plegada y corrida del Agrio cuenta con una recarga potencial de 61,25 hm³ anuales, representando el porcentaje más bajo de recarga potencial anual total con un valor de 12,09 %.

Se sugiere que una posible área de descarga se encuentra en el Bajo de Añelo, que conforma una cuenca endorreica que se ubica en el Engolfamiento Neuquino.

Para realizar la estimación de los valores de recarga potencial se planteó un sistema ideal: se desarrolla en estado estacionario, la precipitación es la única entrada del sistema y no se consideran los aportes de las aguas de acuíferos vecinos y aguas superficiales.

Por otro lado, no se tiene en cuenta el volumen de agua extraído del suelo para consumo de las plantas en los meses con déficit hídrico. Esto podría corregirse restando de la recarga estimada, un valor de almacenamiento en el suelo al comienzo de la temporada con excedentes, necesaria para reponer la humedad del suelo hasta la capacidad de campo. En las áreas de recarga los suelos están poco desarrollados y son gruesos, por lo que la capacidad de retención es baja y favorece la infiltración. Considerando la presencia de un suelo predominantemente arenoso de un espesor promedio de 30 cm, la lámina de agua necesaria para reponer el agua útil del suelo, sería de unos 15 mm considerando una capacidad de retención de 5%. Esto representaría una disminución de aproximadamente 30% de la recarga potencial estimada en el Dorso de los Chihuidos y en las rocas del Gpo. Neuquén y Fm. Rayoso.

La estimación se realizó en base a excedentes diarios promediados anualmente para cada estación. Los valores diarios elevados pueden producir una escorrentía superficial adicional no considerada en el factor de áreas favorables para la recarga.

Por último, la comparación con estudios previos demuestra que tanto el carácter de semidetalle de la escala de estudio como el análisis de datos diarios de precipitación y la calidad de los mismos, mejoran la estimación de la recarga potencial en el Dorso de los Chihuidos.

Se sugiere que para ajustar los valores obtenidos de recarga, se cuente con mayor cantidad de estaciones meteorológicas (específicamente sobre las áreas de recarga) y series climáticas. Además, realizar un relevamiento de campo para obtener datos de ensayos de infiltración in situ permitiría “calibrar” los parámetros utilizados.

En cuanto a los datos meteorológicos provistos por la estación Borde Montuoso, si bien se ubican por afuera del área de estudio, se recomienda revisarlos ya que son poco fiables y pueden llegar a mostrar errores en su medición.

Es de vital importancia conocer las áreas y sus valores de recarga de acuíferos puesto que el agua subterránea constituye la principal o única fuente tanto para el consumo humano, como para las actividades agrícola e hidrocarburífera.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, J., Giusiano, A. E., Chebli, G. y Ibáñez, G.** 2011. Shale Gas en la Provincia de Neuquén. Secretaría de Hidrocarburos, Energía y Minería Neuquén & Phoenix Oil & Gas, S.A.
- Alonso, M., Dufilho, A. C. y Giusano, A.** 2016. Caracterización hidrogeológica de la Formación Rayoso y del Grupo Neuquén en el sector centro norte de la Provincia del Neuquén. 9º Congreso Argentino de Hidrogeología y 7º Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Relación Agua Subterránea – Agua Superficial: 46-53. Catamarca.
- Alonso, M., Dufilho, A. C. y Giusano, A.** 2018. Límites litoestratigráficos de las unidades acuíferas Formación Rayoso y Grupo Neuquén en la Cuenca Neuquina. X Congreso Argentino de Hidrogeología y XIV Congreso Latinoamericano de Hidrogeología.
- Álvarez, M. del P., Hernández, M.A., Trovatto, M.M. y González, N.** 2013. Estimación de la recarga en zonas áridas según distintos métodos. Área medanosa del Sur de Península Valdés. Agua Subterránea: recurso estratégico. EDULP. Pp. 15 – 22.
- Aparicio, M.** 1997. Fundamentos de hidrología de superficie. Cuernavaca, México, Lisuma. 303p.
- Braccini, O.** 1970. Rasgos tectónicos de las acumulaciones mesozoicas en las provincias de Mendoza y Neuquén, República Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina 25(2): 275-284. Buenos Aires.
- Carriaca, J.C., Lexow, C. y Bonorino, A.G.** 2012. La recarga a través de cordones medanosos en zonas semiáridas. Estudio de caso: Médanos, prov. De Buenos Aires, Argentina.
- Carrica, J. C.** 2005. Apuntes del curso: Recarga de acuíferos y modelo de balance hidrológico. Maestría en Recursos Hídricos, Universidad Nacional de La Pampa. Santa Rosa.
- Carrica, J. C. y Lexow, C.** 2004. Evaluación de la recarga natural al acuífero de la cuenca superior del arroyo Napostá Grande, provincia de Buenos Aires. Rev. Asoc. Geol. Argent., abr. /jun. 2004, vol.59, no.2, p.281-290.
- Chirino, E.** 2003. Influencia de las precipitaciones y de la cubierta vegetal en el balance hídrico superficial y en la recarga de acuíferos en climas semiáridos. Tesis doctoral Universidad de Alicante, España 387.
- Chow, V.T., Maidment, D.R. y Mays, L.W.** 1988. Hidrología Aplicada. McGraw-Hill. 294 pp
- Consejo Federal de Inversiones (CFI).** 1962. Evaluación de los Recursos Naturales de la Argentina. Tomo IV, Volumen 1. Recursos hidráulicos superficiales. Consejo Federal de Inversiones.
- Custodio, E.** 1998. Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre”. Boletín Geológico y Minero de España, Vol. 109, No. 4, pp.329-346
- Custodio, E. y Llamas, M.R.** 1983. Hidrología subterránea (2 tomos). Omega, 2350 pp.
- Del Prete, P.J.** 2019. Evaluación isotópica del agua subterránea en el Dorso de los Chihuidos, provincia de Neuquén. Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Geológicas. Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Comahue. 59 p
- Dufilho, A.C., Valle, D. y Toth, A.E.** 2002. Elaboración de bases para el ordenamiento territorial ambiental de la Provincia del Neuquén. SIG-OTA. Primera etapa. Informe final - Volumen 1. Consejo Federal de Inversiones Consejo de Planificación y Acción para el Desarrollo.
- Emprendimientos Energéticos Binacional S.A. (EBISA).** 2017. Aprovechamientos hidroeléctricos del Río Santa Cruz: Estudio de Impacto Ambiental. 44 p.
- Ente Nacional de Obras Hídricas de Saneamiento (E.N.O.H.Sa).** 2001. Hidrogeología. Argentina.
- Faustino, J.** 2006. Notas de clase para el curso identificación, evaluación y manejo de zonas de recarga hídrica. San Salvador, CATIE. 113 p.
- Fernández Gálvez, J.** 2010. El recurso suelo-agua en medios áridos y semiáridos. En: Características generales y uso en programas de desarrollo de tierras áridas y semiáridas. Pp. 143 -150.
- Ferrer, J.A., Irisarri, J.A. y Mendía, J.M.** 2006. Mapa de suelos de la Provincia de Neuquén. 1:500.000. (Digitalizado en 2008)
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).** 1978. Effective rainfall in irrigated agricultura.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).** 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje No 56.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).** 2009. Guía para la descripción de suelos.
- Forte Lay, J. y Villagra, M.M.** 1983. El balance hidrológico de Thornthwaite y Mather (1955) aplicado bajo diferentes unidades de tiempo. Verificación con valores observados y comparación de resultados. XI Congreso Nacional del Agua. Aguas Superficiales (1): 89-119. Córdoba.
- Freeze, R.A. y Cherry, J.A.** 1979. Groundwater. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, Vol. 7632, 604.
- Garrido, A.C.** 2010. Estratigrafía del Grupo Neuquén, Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina (República Argentina): Nueva propuesta de ordenamiento litoestratigráfico. Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales, Nueva Serie, 12 (2).
- Garrido, A.C.** 2011. El Grupo Neuquén (Cretácico Tardío) en la Cuenca Neuquina. Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino.

- Gatica, J.R.** 2017. Estimación de la recarga en los acuíferos de la provincia del Neuquén utilizando Sistema de Información Geográfica. Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Geológicas. Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Comahue. 99 p.
- González, M.** 2004. Evaluación de compromisos regionales adquiridos para el PACADIRH, las cumbres mundiales y foros de agua. In foro Centroamericano del agua: avances, retos y desafíos para la gestión del agua. San Salvador, El Salvador.
- Grieser J., Gommel, R. y Bernardi, M.** 2006. *New LocClim - the Local Climate Estimator of FAO. Geophysical Research Abstracts*, Vol. 8, 08305. European Geosciences Union 2006.
- Hendrickx, J.M. y Walker, G.R.** 1997. Recharge from precipitation. En: Recharge of Phreatic Aquifers in Semi-Arid Areas. Róterdam: A.A. Balkema, p. 19-111.
- Hernández, M. A.** 2005. Mecanismos de recarga de acuíferos en regiones áridas (síntesis). II Seminario Hispano Latinoamericano sobre temas actuales de Hidrología subterránea. Relación Agua superficial - Agua subterránea. 249 - 254. Río Cuarto, Universidad Nacional de Río Cuarto.
- Hernández, M.A., González, N. y Hernández, L.** 2010. Procesos de recarga de acuíferos en regiones áridas de Argentina. Revista Latino Americana de Hidrogeología. Vol 7: 32 – 70.
- Hernández, M.A., González, N. y Sánchez, R. A.** 2002. Mecanismos de recarga de acuíferos en regiones áridas. Cuenca del Río Seco, Provincia de Santa Cruz. Argentina. XXXII IAH Congress - VI Congreso ALHSUD. Mar del Plata. Ed. CD Rom y Libro de Resúmenes.
- Hernández, M.A., González, N., Romanazzi, P., Trovatto, M.M., Solero, C., Ceci, J.H., y Álvarez, M. del P.** 2013. Aproximación de volúmenes de agua subterránea disponibles para riego en las cuencas de los ríos Areco y Arrecifes (Buenos Aires). Temas actuales en hidrología subterránea.
- Herrero Ducloux, A.** 1946. Contribución al conocimiento geológico del Neuquén Extraandino. Boletín de Informaciones Petroleras, 266: 245-280.
- Holmberg, E.** 1964. Descripción Geológica de la Hoja 32 d, Auca Mahuida. Provincia del Neuquén. 1:200.000. Carta Geológico-Económica de la República Argentina. Servicio Nacional Minero Geológico. Boletín 94, 101 p.
- Horton, R.E.** 1933. The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle. Transactions of the American Geophysical Union. 14. 446-460.
- Howell, J.A., Schwarz, E., Spalletti, L.A. y Veiga, G.D.** 2005. The Neuquén Basin: an overview. En Veiga, G.D., Spalletti, L.A., Howell, J.A. y Schwarz, E. (eds.). The Neuquén Basin: a Case Study in Sequence Stratigraphy and Basin Dynamics. Geological Society Special Publication 252: 1-14.
- Instituto Nacional de Bosques (INAB).** 2003. Metodología para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural. Manual Técnico. Guatemala. 106 p.
- Keidel, J.** 1917. Über das patagonische Tafelland und die Beziehungen zu den geologischen Erscheinungen in den Argentinischen Anden gebiet und Litoral. *Zeitschrift der Deutsche Akademie Wissenschaft* 3 (5-6): 219-245.
- Keidel, J.** 1925. Sobre la estructura tectónica de las capas petrolíferas en el oriente del Territorio del Neuquén. Ministerio de Agricultura. *Dirección General de Minería y Geología*, Publicación 8: 5-67.
- Kendall, C. y Caldwell, E.A.** 1998. Fundamentals of Isotope Geochemistry [En línea]. En: USGS pp. 51-86.
- Leanza, H. A.** 2003. Las sedimentitas huirinianas y rayosianas (Cretácico inferior) en el ámbito central y meridional de la cuenca Neuquina, Argentina. Servicio Geológico Minero Argentino, Serie Contribuciones Técnicas - Geología 2: 1-31. Buenos Aires.
- Leanza, H.A.** 2009. Las principales discordancias del Mesozoico de la Cuenca Neuquina según observaciones de superficie. Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales, Nueva Serie 11 (2): 145-184.
- Leanza, H.A., Hugo, C., Repol, D., González, R., Danieli, J.C. y Lizuain, A.** 2001. Hoja Geológica 3969-I, Zapala. Provincia del Neuquén. 1:250.000. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). Boletín 275, 134 p.
- Lerner, D.N., Issar, A.S. y Simmers, I.** 1990. Groundwater recharge. A guide to understanding and estimating natural recharge. International contributions to hydrogeology. Vol 8. IAH, Heisse, Hannover, 345 p.
- López Rodríguez, J.J.** 1997. Medida de la recarga por la lluvia: métodos instrumentales en parcelas y de trazadores. En: La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. Textos del Seminario celebrado en las Palmas de Gran Canaria. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid. p. 111-123.
- Losilla, M.** 1986. Aguas subterráneas; generalidades, ocurrencia, tipos de acuíferos. Curso bases hidrológicas para el manejo de cuencas. Turrialba, CR, CATIE. 9 p.
- Maddio, R.A.** 2019. Aplicación de un índice para la estimación de la recarga potencial del acuífero Zapala, Neuquén.
- Maderey, R.** 2005. Principios de hidrogeografía: estudio del ciclo hidrológico. México, DF, Instituto de Geografía de la UNAM. Disponible en: <http://www.igeograf.unam.mx/instituto/publicaciones/libros/hidrogeografia/index.html>

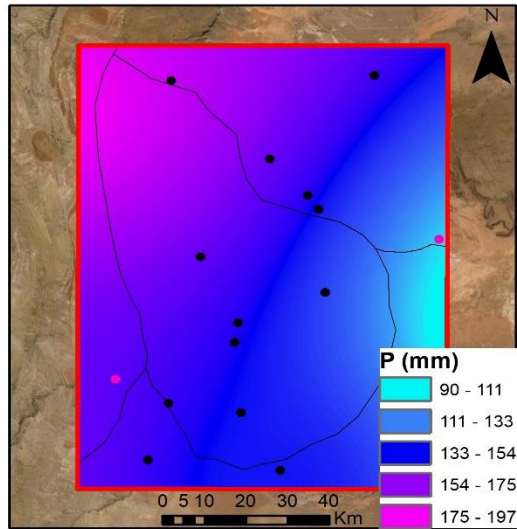
- Maretto, H. y Pángaro, F.** 2005. Edad de formación de algunas de las grandes estructuras del Engolfamiento de la Cuenca Neuquina: actividad tectónica durante la depositación de la Fm. Quintuco. Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Instituto Argentino del Petróleo y Gas (IAPG).
- Martínez de Azagra Paredes, A. y Navarro Hevia, J.** 1996. Hidrología forestal: el ciclo hidrológico. Ed. Secretariado de Publicaciones, Universidad Valladolid. España.
- Matus Silva, O.D.** 2007. Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jacuapa, Matagalpa, Nicaragua. Tesis MSc. En Manejo Integrado de Cuenca Hidrográficas. 247p
- Meconi, G.** 2016. Sistema acuífero Grupo Neuquén y Formación Rayoso (S.A.Ne.Ra.). Sistematización para uso sustentable en reservorios no convencionales de la Cuenca Neuquina. 9° Congreso Argentino de Hidrogeología y 7° Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Hidrogeología regional: 228-237.
- Meinzer, O.E.** 1923. The occurrence of ground water in the United States, with a discussion of principles: U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper 489, 321 p
- Meléndez y Fuster.** 1973. Geología. Tercera edición. Madrid, España, Universidad de Madrid. 896 p
- Micucci, E., Bande, A., Starck, D. y Veiga, R.** 2018. El Jurásico del Dorso de los Chihuidos, contribución a su conocimiento. Instituto Argentino del Petróleo y Gas (IAPG). X Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Sesiones Generales: Energía y Sociedad, aliados inseparables.
- Mintegui Aguirre, J.A. y Lopez Unzu, F.** 1990. La Ordenación Agrohidrológica en la Planificación. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco (Victoria). Depto de Agricultura y Pesca.
- Movía, C., Ower, G. y Pérez, C.** 2007. Estudio de la Vegetación Natural de la Provincia del Neuquén. Tomo I, II y III. Min. De Economía y Hacienda Prov. De Neuquén.
- Núñez S.** 1981. Fundamentos de edafología. San José, Costa Rica, EUNED. 216 p.
- Núñez, S.** 2001. Manejo y conservación de suelos. San José, Costa Rica, EUNED. 263 p. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 1981. Contaminación de las aguas subterráneas. España. 191 p.
- Olaya, V.** 2020. Sistemas de Información Geográfica. Create Space Independent Publishing Platform (Amazon). España. 642 pp.
- Ordoñez Gálvez, J.J.** 2011. Aguas Subterráneas – Acuíferos. “Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral del Recurso Hídrico”. Cartilla Técnica. Sociedad Geográfica de Lima.
- Paruelo, J.M., Beltrán, A., Jobbágy, E., Sala, O.E. y Golluscio, R.A.** 1998. *The climate of Patagonia: general patterns and controls on biotic processes*. Asociación Argentina de Ecología. Ecología Austral (8): 85 – 101.
- Pereyra, F.X., Irisarri, J.A. y Ferrer, J.A.,** 2011. Suelos: factores de formación, procesos pedogenéticos y distribución. 18° Congreso Geológico Argentino. Relatorio 871-880, Neuquén
- Ploil, E., Schulz, C.J. y Matalón, P.** 2013. Agua subterránea y sociedad en regiones áridas: Caso de estudio Algarrobo del Águila, La Pampa, Argentina. VIII Congreso Argentino de Hidrogeología y VI Seminario Latinoamericano sobre Termas Actuales de la Hidrología Subterránea. 299 – 305.
- Ramos, V.A.** 1978. Estructura. En: Rolleri, E.O. (Ed.): Geología y recursos naturales de la Provincia del Neuquén, 7° Congreso Geológico Argentino (Neuquén), Relatorio 9-24. Buenos Aires.
- Ramos, V.A.** 1981. Descripción Geológica de la Hoja 32 c, Los Chihuidos Norte. Provincia del Neuquén. 1:200.000. Carta Geológico-Económica de la República Argentina. Servicio Nacional Minero Geológico. Boletín 182, 104 p.
- Ramos, V.A. y Folguera, A.** 2005. Tectonic evolution of the Andes of Neuquén: Constraints derived from the magmatic arc and foreland deformation En Veiga, G.D., Spalletti, L.A., Howell, J.A. y Schwarz, E. (eds.): The Neuquén Basin: A case study in sequence stratigraphy and basin dynamics. The Geological Society, Special Publication 252: 15-35.
- Ramos, V.A., Folguera, A. y García Morabito, E.** 2011. Las Provincias Geológicas del Neuquén. Relatorio Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén. XVIII Congreso Geológico Argentino. Neuquén. 317 – 326.
- Rodríguez, L., Gómez, A., Oleaga, A., Pacheco, F., Roullier, G., Seoane, N., Silva-Busso, A. y Vives, L.** 2006. Evaluación de la recarga y la vulnerabilidad del sistema acuífero Guaraní en Brasil y Argentina. VII Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo Sustentable.
- Rodríguez, M.F., Leanza, H.A. y Salvarredy Aranguren, M.** 2007. Hoja Geológica 3969-II, Neuquén. Provincias del Neuquén, Río Negro y La Pampa. 1:250.000. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). Boletín 370, 173 p.
- Rolleri, E.O.** 1976. Sistema de San Bárbara. 6° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 240-255. Buenos Aires.
- Roth, S.** 1899. Aviso preliminar sobre mamíferos mesozoicos encontrados en Patagonia. Revista del Museo de La Plata, 9:381-388. La Plata.

- Rutledge, A.T.** 1998. Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground-water recharge and discharge from streamflow records— update: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98-4148, 43 p.
- Samper, F.J.** 1997. Métodos de evaluación de la recarga por la lluvia por balance de agua: utilización, calibración y errores. En: La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. Textos del seminario celebrado en las palmas de gran canaria. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid. p. 41-79
- Samper, F.J., Huguet, Ll., Ares, J. y García-Vera, M.A.** 1999. Programa Visual Balan V.1.0. Código interactivo para la realización de balances hidrológicos. Universidad de la Coruña. 124 p. España.
- Sánchez San Román, F.J.** 2014. Apuntes de hidrología e hidrogeología. Universidad Salamanca (España). Departamento Geología. Disponible en: <https://hidrologia.usal.es/>
- Sanders, L.** 1998. A manual of Field Hydrogeology. Prentice-Hall, 381 pp.
- Scanlon, B.R., Healy, R.W. y Cook, P.G.** 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying ground water recharge. Hydrogeology Journal, 10: 18-39.
- Schosinsky, G. y Losilla, M.** 2000. Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. Revista Geológica de América Central 23: 43-55
- Segeer, C. y Villodas, E.** 2006. Hidrología I: infiltración. Material de referencia en curso de Ingeniería civil, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Cuyo, Argentina. 10 p.
- Shaban, A., Khawlie, M. y Abdallah, C.** 2006. Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: the case of Occidental Lebanon. Hydrology Journal 14(4):433-443.
- Sloto, R.A.** 1990. Geohydrology and simulation of groundwater flow in the carbonate rocks of the Valley Creek Basin, Eastern Chester County, Pennsylvania: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 89-4169, 60 p.
- Sosic M.,** 1978. Recursos Hídricos Subterráneos. VII Congreso Geológico Argentino, Relatorio de Geología y Recursos Naturales del Neuquén, Buenos Aires. pp.: 309-319.
- Sticco, M.** 2014. Informe Tests iniciales del Pozo de agua AP.ww3. Ensayos de bombeo iniciales. Total Austral S.A, Neuquén. Informe inédito. 23pp.
- Sticco, M.** 2015. Informe Tests de bombeo del Pozo de agua AP.ww4. Total Austral S.A, Neuquén. Informe inédito. 27pp.
- Stipanovic, P. N., Rodrigo, F., Baulies, O.L. y Martínez, C.G.** 1968. Las formaciones presenonianas del denominado Macizo Nordpatagónico y regiones adyacentes. Revista Asociación Geológica Argentina, 23 (2):367-388.
- Thornthwaite, C.W.** 1948. An approach toward a Rational Classification of Climate. American Geographical Society 38(1): 55-94
- Touhami, I., Andreu, J.M., Chirino, E., Sánchez, J. R., Moutahir, H., Pulido-Bosch, A., Martínez-Santos P. y Bellot, J.** 2013. Recharge estimation of a small karstic aquifer in a semiarid Mediterranean region (SE Spain) using hydrological model. Hydrological Processes, 27(2): 165 – 174.
- Tunik, M., Folguera, A., Naipauer, M., Pimentel, M. y Ramos, V.** 2010. Early up lift and orogenic deformation in the Neuquén Basin: constraint from the Andean uplift from U-PB and Hf isotopic data of detrital zircons. Tectonophysics 489(1- 4): 258-27.
- Uliana, M. A. y Dellapé, D. A.** 1981. Estratigrafía y evolución paleoambiental de la sucesión maestrichtiano-eoterciaria del Engolfamiento Neuquino. (Patagonia septentrional). VIII Congreso Geológico Argentino, 3: 673-711. San Luis
- United Nations Environment Programme (UNEP).** 1997. World Atlas of Desertification. 2nd. ed. Oxford University Press. 182 p
- Varni, M. y Custodio, E.** 2013. Evaluación de la recarga al acuífero del Azul: 2. Balances de agua en el suelo y de deposición atmosférica del cloruro. VII Congreso Hidrogeológico Argentino. VI Seminario Hispano Latinoamericano sobre temas actuales de hidrología subterránea.
- Vélez Otálvaro, M.V. y Vázquez Ariza, L.M.** 2004. Métodos para determinar la recarga en acuíferos. Avances en Recursos Hídricos 11: 51-62.
- Villagra, P., Giordano, C., Alvarez, J., Cavagnaro, J., Guevara, A., Sartor, C., Passera, C. y Greco, S.** 2011. Ser planta en el desierto: estrategias de uso de agua y resistencia al estrés hídrico en el Monte Central de Argentina. Ecol. Austral, vol.21, n.1, pp. 29-42.
- Villón, M.** 2004. Hidrología. Instituto tecnológico de Costa Rica. Cartago, CR. 386 p.
- Watson, D.F. y Philip, G.M.** 1985. "A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation." *Herramienta de geoprociamiento* 2:315-327
- Weaver, C.** 1931. Paleontology of the Jurassic and Cretaceous of west central Argentina. Memoir University Washington, 1:1-469.
- Yeh, H.F., Cheng, Y.S., Lin, H.I. y Lee, C.H.** 2016. Mapping groundwater recharge potential zone using a GIS approach in Hualian River, Taiwan. Sustainable Environment Research 26: 33 – 43

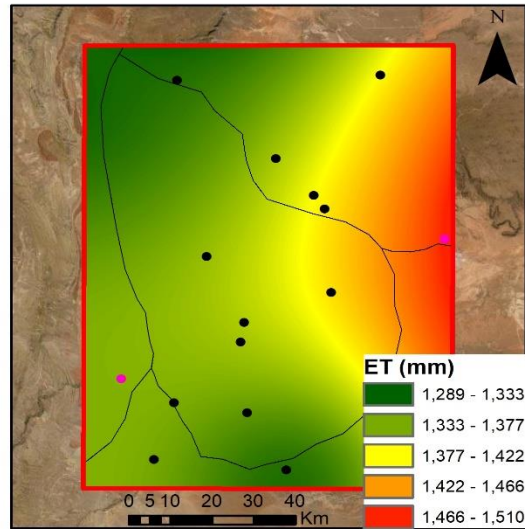
- Zamora Balcarce, G., Zapata, T., Ramos, V., Rodríguez, F. y Bernardo, L.M.** 2009. Evolución Tectónica del Frente Andino en Neuquén. Revista de la Asociación Geológica Argentina 65 (1): 192 - 203 (2009). Argentina.
- Zavala, C. y Ponce, J.J.** 2011. La Formación Rayoso (Cretácico Temprano) en la Cuenca Neuquina. Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino.

ANEXOS

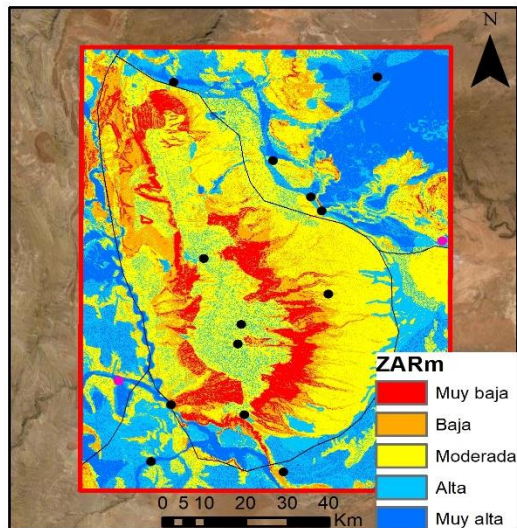
Precipitación media anual (P)



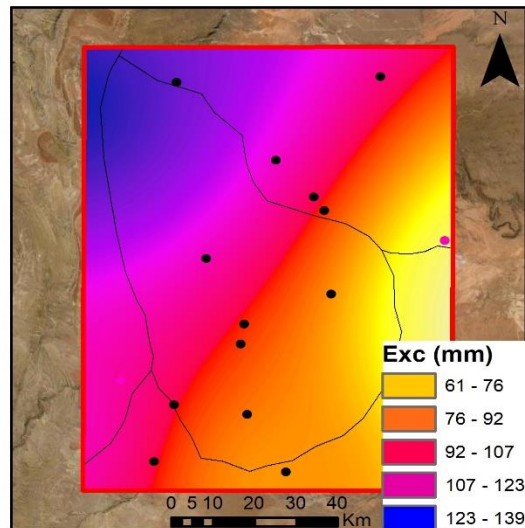
Evapotranspiración media anual (ET)



Zonas Aptas para la Recarga



Excedente (Exc) = P - ET



RECARGA POTENCIAL ANUAL (RP)
 $RP = ZARm * Exc$

