

PROYECTO FINAL INTEGRADOR
INGENIERÍA AMBIENTAL



MODELADO Y SIMULACIÓN DE FLUJO EN LA ZONA
NO SATURADA Y TRANSPORTE DE SOLUTOS EN
MEDIOS POROSOS

Fiorella Laco Mazzone

Dr. Pablo García Martínez

Director

Dra. Graciela Mabel Calabrese

Co-director

Abril de 2021

Sede Andina
Universidad Nacional de Río Negro
Argentina

A mis abuelos, tata Walter, yaya Elena, abuelo Tato y abu Eli, por enseñarme lo que es el amor a la familia, a la tierra, a lo que hacemos y a siempre ofrecer una mano amiga a quien la necesita.

A mis padres, Gastón y Verónica, por todos los sacrificios que hicieron siempre por nosotros para sacarnos adelante e impulsarnos a volar.

A mis hermanos, Santi, Fede y Seba, quienes hacen que mi vida esté llena de recuerdos de travesuras y sonrisas.

A mis tíos y primos, particularmente, a la tití Ceci, por siempre escucharme y acompañarme en mi camino.

A María de los Ángeles, Teresa, Marcelo, Ali, Cami y fia., y a la memoria de Panchito, Tabaré y Ledia, mi familia adoptada, que sin dudas ha enriquecido mi vida más allá de lo que puedo expresar.

A mis amigos y amigas del alma, porque no importa cuánto tiempo pase ni qué tan lejos estemos siempre podemos contar los unos con los otros.

Especialmente, a Fran, porque tu amor, bondad, paciencia y compañerismo han tenido tal impacto en mi vida y a un nivel tan profundo que me permitió reencontrarme, crecer y soñar.

Índice de contenidos

Índice de contenidos	v
Índice de figuras	ix
Índice de tablas	xiii
Resumen	xv
Abstract	xvii
1. Introducción	1
1.1. El agua subterránea	1
1.2. Objetivos y estructura del trabajo	4
1.2.1. Objetivos específicos	4
2. Modelos para el flujo de agua y transporte de solutos	7
2.1. El suelo	7
2.1.1. Perfil y horizontes del suelo	8
2.1.2. Granulometría de las partículas del suelo	10
2.1.3. Textura	13
2.1.4. Densidad del suelo	14
2.2. El agua en el suelo	15
2.2.1. Agua subsuperficial	15
2.2.2. Contenido de agua	17
2.2.3. Potencial de presión	18
2.2.4. Curvas de retención	19
2.3. Movimiento de agua en la zona no saturada	22
2.3.1. Ecuación de Richards	22
2.3.2. Modelos para la curva de retención	23
2.3.3. Modelos para la conductividad hidráulica	24
2.3.4. Limitaciones de la ecuación de Richards	25
2.4. Ecuación de transporte	26

2.4.1.	Mecanismos de transporte físico que afectan el movimiento de solutos	26
2.4.2.	Ecuación de transporte de solutos combinada	29
2.5.	Métodos numéricos e implementación	30
2.5.1.	El código Hydrus-1D	30
2.5.2.	Implementación en R	31
3.	Simulación del movimiento de agua en mallines patagónicos	35
3.1.	Humedales y mallines	35
3.1.1.	Importancia de los humedales	36
3.1.2.	Balance hidrológico	37
3.1.3.	Mallines patagónicos	38
3.2.	Definición del problema	44
3.2.1.	Ubicación geográfica y clima	44
3.2.2.	Horizontes de suelo y determinación de las propiedades hidráulicas	46
3.2.3.	Dominio y condiciones de borde	51
3.2.4.	Discretización espacial y temporal	53
3.2.5.	Condición inicial	53
3.3.	Resultados y discusión	53
3.3.1.	Evolución periódica en base a promedios históricos	53
3.3.2.	Resultados en la periferia del mallín	55
3.3.3.	Resultados en el centro del mallín	57
3.3.4.	Evolución con precipitación variable	63
3.3.5.	Transporte de solutos	65
3.4.	Conclusiones parciales	68
4.	Caracterización hidrológica de rellenos sanitarios	71
4.1.	Rellenos sanitarios	71
4.1.1.	Generación de lixiviados	74
4.1.2.	Balance hidrológico	75
4.1.3.	Contenido de agua de los RSU	76
4.1.4.	Componentes básicos de las coberturas superiores y las barreras basales	77
4.1.5.	Normativa vigente	80
4.2.	El modelo HELP	83
4.2.1.	Descripción general	83
4.2.2.	Configuración del problema	85
4.2.3.	Supuestos y limitaciones	87
4.3.	Diseños de rellenos sanitarios evaluados mediante HELP	91

4.3.1. Diseños de barrera basal y cobertura superior considerados . . .	91
4.3.2. Datos meteorológicos	96
4.3.3. Dimensionamiento del cuerpo del relleno sanitario	98
4.4. Resultados y discusión	100
4.4.1. Barreras basales	100
4.4.2. Cobertura superior	106
4.5. Conclusiones parciales	110
5. Conclusiones y perspectivas	113
Índice de símbolos	117
Agradecimientos	121
Bibliografía	123

Índice de figuras

2.1. Sistemas de clasificación de las partículas del suelo de acuerdo a su tamaño más utilizados en el ámbito de las ciencias del suelo. Nótese a la derecha de la figura la escala entre las distintas categorías granulométricas. Fuente: Adaptación de [1].	10
2.2. Triángulo utilizado para la definición de la clase textural del suelo, según los porcentajes de arenas, limos y arcillas. Fuente: Adaptación de [2].	14
2.3. Sección transversal vertical de un perfil del suelo representando las definiciones de los términos utilizados para describir el agua subsuperficial. Fuente: Adaptación de [3].	16
2.4. Curvas de retención de agua en el suelo para dos clases texturales. Estas curvas relacionan el potencial de presión, h , con el contenido de agua del suelo, y pueden identificarse tres regiones de acuerdo al proceso dominante: entrada de aire, región capilar y región de adsorción. Fuente: Adaptación de [4].	20
2.5. Curvas de retención de agua en el suelo para diferentes clases texturales. Fuente: Adaptación de [1].	21
2.6. Fuentes de dispersión hidrodinámica. Fuente: Adaptación de [4].	29
3.1. Balance hidrológico que permite analizar el movimiento del agua en el ambiente en cual se encuentra un humedal. Fuente: Adaptación de [5].	38
3.2. Corte transversal de un mallín en el cual se presentan las zonas características de un mallín. Fuente: [6].	41
3.3. Dinámica del nivel freático de las zonas centrales y periféricas de un mallín durante un período de 4 años. Fuente: [6].	42
3.4. Relación entre la precipitación media anual y la profundidad del nivel freático promedio. Fuente: Adaptación de [7].	43

3.5. Mapa de isoyetas de la región y ubicación del mallín bajo estudio. Se presenta también la red de rutas nacionales (naranja) y el límite del Parque Nacional Nahuel Huapi (línea de trazos verde). Los colores y contornos indican el régimen de precipitación media anual calculado a partir de las capas ráster mensuales de Cravero et al. [8]. Fuente: Elaboración propia.	45
3.6. (a) Imagen satelital del mallín estudiado, indicando los sitios de muestreo: S1 en el centro del mallín y S2 en la periferia. (b) Topografía del terreno. La elevación fue obtenida del modelo digital de terreno de la Agencia Espacial Europea (capas raster) [9]. Fuente: Elaboración propia.	46
3.7. Régimen mensual de precipitación y evapotranspiración potencial. Promedios históricos obtenidos de los mapas digitales de Cravero et al. [8] para la posición del mallín indicada en la Fig. 3.6. Fuente: Elaboración propia.	47
3.8. Clase textural de los horizontes del suelo para los sitios S1 (a) y S2 (b): horizontes A1 (rojo); A2 (azul); AC (verde). Fuente: Elaboración propia, haciendo uso de la herramienta Soil Texture Calculator de la USDA [10].	50
3.9. Esquema de los dominios y condiciones de contorno utilizados para la simulación en los perfiles de suelo relevados en el centro (a) y la periferia (b) del mallín. Fuente: Elaboración propia.	52
3.10. (a) Secuencia periódica de precipitaciones y ET potencial. Evolución del nivel freático para el sitio S1 (b) y S2 (c) utilizando los parámetros hidráulicos obtenidos mediante el código Rosetta 3.2. Cuando el valor cae por debajo de $z = -200$ cm, el nivel freático queda fuera del dominio. La aproximación de su valor para estos casos se muestra en línea de trazos.	54
3.11. (a) Evolución del nivel freático en la periferia del mallín. (b-d) Evolución de la saturación efectiva en los puntos de observación $z_{obs,1}$, $z_{obs,2}$ y $z_{obs,3}$ mostrados en la Fig. 3.9 (b).	56
3.12. Perfiles de contenido de agua en suelo para cuatro instantes durante el año en la periferia del mallín: primero de enero, abril y julio y mediados de agosto. El triángulo indica la posición del nivel freático obtenido durante la simulación en cada caso.	57
3.13. Evolución del nivel freático en el centro del mallín incrementando el régimen de precipitaciones en un factor mayor a uno.	58

3.14. Curvas de retención para el horizonte A1 del sitio S1 (obtenida mediante Rosetta y las modificadas) comparadas con las curvas de retención determinadas experimentalmente por Liu et al. [11] para suelos cubiertos por plantas de la familia <i>Cyperaceae</i> con distintos valores de densidad aparente.	59
3.15. Evolución del nivel freático en el centro del mallín para distintos valores de $h_{1/2}$ manteniendo el resto de los datos en su valor original.	61
3.16. (a) Nivel freático (mínimo y promedio) y (b) período de saturación del suelo en función de $h_{1/2}$ para distintos θ_s	62
3.17. (a) Precipitación diaria registrada en el aeropuerto de Bariloche, corregida a 470 mm anuales. (b) Exceso (rojo) y déficit (azul oscuro) mensual de precipitación, respecto al promedio histórico. (c) Evolución del nivel freático para tres casos.	64
3.18. Evolución del contenido de soluto en los tres puntos de observación para los dos casos. La evolución del nivel freático se muestra (fuera de escala) en líneas negras para relacionar los períodos de recarga, saturación y secado con la evolución del soluto en cada caso.	66
3.19. Perfiles de concentración durante un año para los dos regímenes hídricos considerados. La condición inicial está representada por la línea vertical en $c = 1$. Los perfiles en azul muestran el período de saturación. Los perfiles en negro y rojo, muestran la etapas temprana y tardía, respectivamente, del proceso de secado. Finalmente, los perfiles en verde muestran la etapa de recarga por precipitación.	67
3.20. Cantidad de soluto acumulada anualmente en cada punto de observación. La línea continua (de trazos) corresponde al caso con $h_{1/2} = 50$ cm (100 cm).	68
4.1. Esquema del flujo de materia en fase líquida en un relleno sanitario. CS = Cobertura Superior; BB = Barrera Basal; UTL = Unidad de Tratamiento de Lixiviados. Los flujos se detallan en la Sec. 4.1.2. Fuente: Elaboración propia.	73
4.2. Esquema del rol de cada uno de los componentes principales de un sistema muti-capa para cobertura superior o barrera basal en el control de las emisiones de los rellenos sanitarios. Fuente: Adaptación de Cossu & Stegmann [12].	78
4.3. Esquema del modelo de capas de un relleno sanitario implementado en el código HELP. Fuente: Adaptación de [13].	86

4.4. Esquemas de las diversas barreras basales propuestas para su caracterización hidrológica mediante el HELP v4.0. Fuente: Adaptado de Cossu & Stegmann [12].	92
4.5. Esquemas de las diversas coberturas superiores propuestas para su caracterización hidrológica mediante el HELP v4.0. Fuente: Adaptado de Cossu & Stegmann [12].	95
4.6. Variación del contenido de agua en la zona de evaporación de la cobertura superior (arriba). PT = porosidad total, 0,501 vol.agua/vol.suelo; CC = capacidad de campo, 0,284 vol.agua/vol.suelo; PMP = punto de marchitez permanente, 0,135 vol.agua/vol.suelo. Valores de precipitación, evapotranspiración y escorrentía empleados para analizar los diseños de coberturas basales (abajo). Fuente: Elaboración propia. . .	101
4.7. Captación de lixiviados total por mes mediante el/los drenaje/s lateral/es para cada diseño de barrera basal propuesto. Los últimos dos casos (D y E) tienen doble capa de drenaje, siendo las líneas azules las correspondientes a la captación del sistema primario y las líneas rojas las del secundario. Fuente: Elaboración propia.	102
4.8. Pérdida de lixiviados total por mes por percolación a través de las barreras de baja permeabilidad de los distintos diseños de barrera basal. Fuente: Elaboración propia.	103
4.9. Pérdidas al ambiente acumuladas a través de la barrera de baja permeabilidad inferior durante el período de simulación para tres condiciones diferentes de instalación de la geomembrana. GFP = Good Field Placement; PFP = Poor Field Placement; BFP = Bad Field Placement. Fuente: Elaboración propia.	104
4.10. Captación de fluidos total mensual mediante el drenaje lateral de la cobertura superior (casos A y B) y el drenaje basal en los tres casos (rojo para A y B y azul para C). Fuente: Elaboración propia.	106
4.11. Percolación de fluidos mensual a través de las barreras de baja permeabilidad de las coberturas superior (casos A y B en verde y naranja, respectivamente) y a través de la barrera basal (rojo para A y B y azul para C). Fuente: Elaboración propia.	107
4.12. Pérdidas al ambiente acumuladas a través de la barrera de baja permeabilidad inferior durante el período de simulación para los tres diseños propuestos. Fuente: Elaboración propia.	109

Índice de tablas

3.1. Resultados obtenidos a partir del método del densímetro para los diferentes horizontes de los sitios de muestreo S1 y S2 correspondientes a la Ea. Perito Moreno. Fuente: Elaboración propia.	49
3.2. Parámetros hidráulicos obtenidos para los horizontes de los sitios S1 y S2 a partir del código Rosetta. Fuente: Elaboración propia.	51
3.3. Parámetros hidráulicos para las curvas de retención mostradas en la Fig. 3.14. El valor de $h_{1/2}$ se obtiene a partir de α_v y n mediante la ec. (3.3). Fuente: Elaboración propia.	60
4.1. Requerimientos legales para la barrera basal de rellenos sanitarios para residuos sólidos municipales no peligrosos en diversos países. Fuente: Adaptación propia a partir de Cossu & Stegmann [12].	81
4.2. Requerimientos legales para la cobertura superior de rellenos sanitarios para residuos sólidos municipales no peligrosos en diversos países. Fuente: Adaptación propia a partir de Cossu & Stegmann [12].	82
4.3. Valores de los parámetros hidráulicos proporcionados por la base de datos del HELP v4.0 para las diversas capas utilizadas en el diseño de las coberturas superiores y las barreras basales. Fuente: Adaptado de Tolaymat & Krause [14].	91
4.4. Valores promedio para el período 2000-2020 de la humedad relativa para el Aeropuerto Internacional Tte. Luis Candelaria. Fuente: Elaboración propia a partir de datos brindados por el SMN.	97
4.5. Estimaciones de la población total a proveer del servicio de disposición final de RSU, de las masas totales de RSU recuperados y a disponer, y del volumen total a disponer en el relleno sanitario. Fuente: Elaboración propia.	99
4.6. Volumen de lixiviados a tratar mensualmente para cada uno de los diseños de barrera basal propuestos. Fuente: Elaboración propia.	102

4.7. Volumen de lixiviados descargados mensualmente al ambiente para cada uno de los diseños de barrera basal propuestos. Fuente: Elaboración propia.	103
4.8. Costos por unidad de superficie a cubrir asociados a los materiales necesarios para la implementación de los diversos diseños de barrera basal analizados. Fuente: Elaboración propia.	105
4.9. Costos totales asociados a los materiales necesarios para la implementación de los diversos diseños de barrera basal analizados. Fuente: Elaboración propia.	105
4.10. Costos por unidad de superficie a cubrir asociados a los materiales necesarios para la implementación de los diversos diseños de cobertura superior analizados. Fuente: Elaboración propia.	110
4.11. Costos totales asociados a los materiales necesarios para la implementación de los diversos diseños de cobertura superior analizados. Fuente: Elaboración propia.	110

Resumen

Recientemente, el interés por la zona no saturada del suelo se incrementó significativamente desde que se tomó conciencia que el ambiente subsuperficial puede verse severamente perjudicado por las actividades antrópicas. Debido a esto, un gran número de modelos y códigos han sido desarrollados en los últimos años para estudiar distintos procesos relevantes a esta temática. Muchos de ellos se basan en la ecuación de Richards que describe la evolución del contenido de agua y el potencial matricial, bajo la acción capilar y gravitatoria en medios porosos.

En este trabajo, se consideraron dos problemas de interés en Ingeniería Ambiental: por un lado, se estudió el movimiento de agua y transporte de solutos en el suelo, particularmente se analizaron suelos de mallines patagónicos y, en por otro lado, se realizó la caracterización hidrológica de rellenos sanitarios, proponiendo varios diseños para la cobertura superior y la barrera basal.

En primer lugar, se abordó la formulación matemática y los métodos numéricos para describir el flujo en medios porosos no saturados, como así también aquellos asociados al transporte de solutos en el suelo. Durante esta etapa, desarrollamos e implementamos una serie de rutinas en que permiten resolver los problemas diferenciales resultantes de interés en forma paramétrica invocando al código HYDRUS-1D como *solver* principal.

Con esa herramienta se estudiaron distintos regímenes de flujo de agua y transporte de solutos asociados a las zonas central y periférica de un mallín cercano a la ciudad de San Carlos de Bariloche. Para ello, determinamos las propiedades hidráulicas del suelo en mallines de estepa a través de funciones de pedotransferencia implementadas en el código Rosetta. Los datos de entrada necesarios para dicho código surgen de las clases texturales de los horizontes del suelo, que determinamos mediante el método del densímetro. Con las propiedades hidráulicas y el forzado atmosférico como datos de entrada, se analizaron distintos regímenes de flujo periódico que permitieron calibrar los parámetros más sensibles del modelo. También se estudió la evolución transitoria basada en los registros de precipitación diaria del aeropuerto Tte. Luis Candelaria durante el período 1990-2014. Por último, se simuló el transporte de solutos para distintos regímenes hídricos.

Los resultados obtenidos para el análisis de flujo de agua en mallines fueron satisfactorios para la zona periférica del mallín utilizando los parámetros hidráulicos obtenidos

mediante la caracterización de las texturas del perfil del suelo y el código Rosetta. Sin embargo, este procedimiento no arrojó buenos resultados en la zona central. En este caso, efectuamos una parametrización de la curva de retención en términos de los dos parámetros más sensibles y con mayor grado de incertidumbre, y analizamos la respuesta del sistema en función de ellos. Con esta metodología fue posible ajustar estos parámetros a partir de los promedios anuales del nivel freático mínimo y del período de saturación del mallín. En el caso del problema transitorio, identificamos la relevancia de un parámetro adicional que caracteriza la capacidad de acumulación de agua en la región central del mallín. En cuanto a las simulaciones de transporte de solutos, observamos que el régimen hídrico afecta significativamente la redistribución del compuesto.

Finalmente, realizamos la caracterización hidrológica de barreras basales y coberturas superiores de rellenos sanitarios, mediante el código HELP. En este caso, analizamos el balance hidrológico en rellenos sanitarios y, particularmente, su representación mediante el modelo HELP. Propusimos diversos diseños de coberturas superiores y barreras basales con el fin de calcular los caudales de percolación, drenaje y pérdida de lixiviados a través de cada una de ellas. Los diseños propuestos fueron aplicados a un relleno sanitario dimensionado para proveer de servicio de disposición final de RSU a los Municipios de San Carlos de Bariloche y Dina Huapi para el período 2021-2030. A partir de las simulaciones realizadas pudimos evaluar el desempeño de los sistemas propuestos, estimar los caudales de drenaje y determinar cuáles diseños cumplían los límites de pérdida de lixiviados establecidos por las normativas internacionales.

Palabras clave: FÍSICA DEL SUELO, MODELADO, AGUA SUBTERRÁNEA, MALLINES, RELLENOS SANITARIOS

Abstract

Recently, interest in soil's unsaturated zone has significantly increased since it was realized that the subsurface environment can be severely damaged by human activities. For this reason, several models and codes have been developed in recent years in order to study different processes of relevance in this topic. A considerable number of those are based on Richard's equation, which describes the evolution of the water content and the pressure head, under capillary and gravitational forces in porous media.

In this context, this work considers two case studies of interest in Environmental Engineering: firstly, we study the water movement and solute transport in soils, focusing specifically in those associated with *mallines patagónicos* and, secondly, we performed the hydrological characterization of Municipal Solid Waste Landfills (MSWL), considering several designs for the top and basal barriers.

First, we introduced the mathematical formulation and the numerical methods to describe flow in unsaturated porous media, as well as those associated with solute transport in soils. During this stage, we developed and implemented several routines which allowed us to solve the resulting differential problems of interest parametrically while invoking HYDRUS-1D code as the core solver.

With this tool, we studied different water flow and solute transport regimes associated with the central and peripheral zones of a *mallín* located in the vicinity of San Carlos de Bariloche. We determined soil's hydraulic properties in steppe wetlands through the use of pedotransfer functions implemented on the Rosetta code. The input data required for this code arises from the textural classes of the soil's horizons, which we determined with the hydrometer method. By simulating a families of periodic regimes, we were able to calibrate the most sensitive parameters of the model. We also studied the transient evolution of the water content based on the daily precipitation database for the Tte. Luis Candelaria airport for the period of 1990-2014. Lastly, we simulated solute transport for two different hydrological regimes.

The results obtained for the water movement analysis in *mallines* were adequate for the peripheral zone, when the hydraulic parameters obtained from the Rosetta code were considered. However, this procedure did not yield good results in the central zone. In this case, we parameterized the retention curve in terms of the two most sensitive parameters and analysed the system's response to these parameters. These parameters

control the position and height of the retention curve. We found that it is possible to adjust these parameters using the annual average values of the minimum water table and the saturation period of the *mallín*. Regarding the solute transport simulations, we observed that the hydrological regime significantly affects the solute redistribution.

Finally, we used the HELP code to perform the hydrological characterization of top and basal barriers of MSWL. In this case, we studied the theoretical framework related to the water balance of MSWL. We proposed several designs for the top and basal barriers and estimated the percolation, drainage and leak fluxes through each layer. The proposed designs were applied to a MSWL sized to provide the final disposal of MSW for the Municipalities of San Carlos de Bariloche and Dina Huapi during the period of 2021-2030. We evaluated the performance of the proposed systems, estimated the drainage flowrates and checked which designs satisfied the maximum limits of leachate losses established by international regulations.

Keywords: SOIL PHYSICS, MODELING, GROUNDWATER, WETLANDS, LAND-FILLS

Capítulo 1

Introducción

1.1. El agua subterránea

Marco histórico

El movimiento del agua que infiltra en el suelo y que conforma los acuíferos ha sido de gran importancia para muchas actividades humanas desde tiempos remotos, principalmente, por ser una fuente de agua potable. Los registros del uso de pozos y conductos subterráneos para la provisión de agua potable en zonas áridas de medio oriente se remontan a varios siglos antes del comienzo de la era cristiana [15]. Según su contenido de agua, el medio subterráneo puede dividirse en dos zonas: la zona no-saturada (ZNS) que se extiende desde la superficie del suelo hasta la capa freática y, por debajo de ésta, la zona saturada (ZS) que es la región del suelo donde todos los poros están completamente llenos de agua. Los primeros estudios formales del flujo de agua en la ZS se deben al Ing. Hidráulico Henry Darcy y fueron aplicados a resolver problemas de provisión de agua y construcción de puentes en varias ciudades francesas. La ley empírica de Darcy fue luego deducida formalmente por M. K. Hubbert y generalizada a flujo multi-fásico para su aplicación a ingeniería de reservorios de petróleo [16].

Relevancia en Ingeniería Ambiental

La ZNS del suelo, por su parte, juega un rol de fundamental importancia en el ciclo hidrológico, ya que controla los procesos de infiltración, evaporación, transpiración vegetal, escorrentía tanto superficial como subsuperficial y recarga de acuíferos. Todos estos procesos determinan el contenido de agua del suelo y su movimiento. Debido a procesos advectivos, el movimiento del agua afecta en gran medida el transporte de compuestos químicos y biogeológicos desde la superficie del suelo hasta la capa freática y viceversa. La ecuación deducida por Richards describe la variación del contenido de agua, o bien, el potencial matricial en función de la acción capilar y la fuerza gravita-

toria [17]. Originalmente, la motivación por comprender y modelar matemáticamente estos procesos de gran complejidad surgió, principalmente en Estados Unidos, como herramienta para optimizar el manejo de suelos agrícolas y maximizar su producción. Recientemente, el interés por la zona no saturada del suelo se incrementó significativamente desde que se tomó conciencia de que el ambiente subsuperficial puede verse perjudicado por las actividades agrícolas, industriales y municipales. El desastre del repositorio de residuos tóxicos en Love Canal, cerca de las cataratas del Niágara, estado de Nueva York, EEUU, es uno de los ejemplos más paradigmáticos del enorme impacto ambiental que puede ocasionar el transporte de contaminantes por flujos subsuperficiales en la ZNS [18].

Antecedentes en la temática

Debido al creciente interés por este tema, muchos modelos y códigos han sido desarrollados en los últimos años. Por ejemplo, el Laboratorio de Salinidad de EEUU (*USSL*, por sus siglas en inglés) junto con la Universidad de California Riverside, han desarrollado una serie de códigos de simulación numérica y modelos analíticos fenomenológicos que se encuentran disponibles públicamente, marcando un estándar en el abordaje de esta temática [19]. Entre estos códigos, HYDRUS es uno de los más utilizados para estimación de flujo y transporte de compuestos en la zona no saturada del suelo [20]. En el país, este código ha sido empleado recientemente para estudiar varios problemas de interés ambiental, como son: el transporte de nitratos en la ZNS hacia las napas a causa del manejo intensivo del ganado, comúnmente, conocido como *feedlots* [21], y el transporte de contaminantes hacia el acuífero causado por la recarga de las precipitaciones en la zona industrial de Bahía Blanca [22].

Áreas de aplicación: mallines y rellenos sanitarios

Estas herramientas de modelado y simulación serían muy útiles para efectuar análisis cuantitativos similares a nivel regional. A modo de ejemplo, existen muchos mallines utilizados para la producción ganadera en la región que no se encuentran inundados en forma permanente, particularmente aquellos ubicados en la zona esteparia del oeste de la provincia de Río Negro. A medida que el nivel freático baja, el contenido de agua del suelo disminuye. La variación del contenido de agua afecta en gran medida la ecología y capacidad productiva del mallín y, por lo tanto, los servicios ecosistémicos que éste puede brindar. La dinámica del contenido de agua está fuertemente influenciada por las propiedades hidráulicas del suelo y éstas, a su vez, por el tipo de manejo que se haga del mallín. Por eso resulta de interés, desarrollar herramientas de análisis de estos procesos que contribuyan en la toma de decisiones sobre el uso productivo sustentable de estos suelos.

Otra área de aplicación del modelado de flujo en medios porosos no saturados son los rellenos sanitarios para disposición final de residuos sólidos urbanos (RSU; o también denominados *Municipal Solid Waste Landfills*, MSWL, según la US-EPA). Después de casos como el mencionado desastre de Love Canal, el diseño de los sitios de disposición final de RSU se focalizó en lograr barreras basales y coberturas superiores adecuadas. Estas coberturas se constituyen como un sistema que combina diversas barreras, con espesores y propiedades hidráulicas particulares según su fin, que se diseña para minimizar las emisiones tanto líquidas como gaseosas al ambiente circundante [12].

A lo largo del tiempo, el rol de los rellenos sanitarios ha mutado junto con las estrategias de gestión de los RSU, siendo considerados actualmente como sumideros finales para los ciclos de los materiales; particularmente, son considerados grandes sumideros de carbono. Este nuevo concepto de relleno sanitario denominado repositorio geológico considera que así como los materiales son extraídos del suelo en formas no móviles deben ser devueltos a él en las mismas condiciones, siguiendo los principios de la economía circular. En conceptos anteriores de rellenos sanitarios, la minimización del ingreso de agua y de su interacción con los RSU llevaba a la “momificación” de dicha capa impidiendo su adecuada degradación. Esto genera muchas veces lo que se denomina como “bombas secas”, es decir, una masa de residuos no estabilizados dispuestos en muchos casos sobre geosintéticos que tienen la potencialidad de perder sus propiedades con el paso del tiempo. Debido a esto último, este tipo de diseños trae aparejado típicamente problemas de liberación de contaminantes al ambiente fuera del período típico estipulado para el monitoreo post-clausura [12].

Dado que el contenido de agua de los RSU controla el transporte y la disponibilidad de contaminantes en solución, los rellenos sanitarios sustentables promueven la generación y el tratamiento controlado de lixiviados y gases durante el período de operación y mantenimiento post-clausura. De esta forma, se promueve la estabilización temprana del relleno sanitario; minimizando la generación de lixiviados fuera de los períodos mencionados. Por ello, la implementación, desde un punto de vista operacional, de los balances hídrico y de masa para los contaminantes presentes en los rellenos sanitarios pueden representar la piedra angular de la calibración de las intervenciones técnicas que apuntan, en las fases de planificación, operación y post-clausura, a alcanzar la sustentabilidad ambiental [12].

El modelo *Hydrologic Evaluation of Landfill Performance* (HELP) se implementó como una herramienta de software en los años ‘80 que permite estimar el balance hídrico de los rellenos sanitarios y ha tenido un desarrollo continuo hasta el presente. Las actualizaciones más recientes se encuentran disponibles a través de la US-EPA [23] y constituyen la base de diseño de coberturas para rellenos sanitarios más empleada en los Estados Unidos en lo que refiere a su caracterización hidrológica. Este modelo fue también aplicado, validado y adaptado a las condiciones particulares de Alemania [24]

y Australia [25]. Este programa requiere información sobre las precipitaciones del sitio junto con las condiciones meteorológicas para el área de estudio y el dimensionamiento del relleno sanitario, y modela escorrentía, flujos laterales e infiltración/percolación en función de distintos parámetros de diseño (número de capas, espesor y composición). El dominio de esta herramienta permitiría tener capacidad de diseño del balance hidrológico de coberturas para rellenos sanitarios, lo que tiene potencial aplicación directa a las celdas del Centro Ambiental Municipal de la ciudad de San Carlos de Bariloche y a otros sitios de características similares.

1.2. Objetivos y estructura del trabajo

El objetivo general del presente Proyecto Final Integrador (PFI) es: *Generar capacidad local de estudio de movimiento de agua y transporte de solutos en medios porosos y su aplicación a dos medios de interés ambiental, en particular: suelos y rellenos sanitarios.*

De acuerdo con dicho objetivo general, en primer lugar, se pondrá foco en la caracterización cuantitativa del movimiento de agua y transporte de solutos en suelos a través de herramientas de cálculo numérico. En segundo lugar, se aplicarán dichas herramientas al estudio de mallines de la zona y, por último, se evaluarán diseños de coberturas para rellenos sanitarios.

1.2.1. Objetivos específicos

A continuación, se plantean los objetivos específicos y los principales lineamientos metodológicos que guiarán a la consecución de los mismos.

1. *Identificar el modelo adecuado y la implementación numérica para simulaciones del flujo de agua en medios porosos.*
 - Definir el marco teórico, la formulación matemática y los métodos numéricos para flujo en medios porosos no saturados.
 - Instalar y utilizar el código HYDRUS-1D para simular casos de prueba.
 - Analizar y emplear el módulo de transporte de solutos.
2. *Analizar el movimiento de agua y el transporte de solutos en mallines de la zona.*
 - Determinar las propiedades hidráulicas del suelo en mallines.
 - Calcular la evolución estacional del contenido de agua usando el código HYDRUS-1D.

- Analizar cuantitativamente el transporte de solutos.

3. *Realizar la caracterización hidrológica de barreras basales y coberturas superiores para rellenos sanitarios, mediante el código HELP.*

- Instalar el código HELP propuesto por la US-EPA y analizar el modelo hidrológico que dicho código implementa.
- Calcular los flujos de percolación, drenaje y pérdida de lixiviados para diversos sistemas de barrera basal y cobertura superior aplicados a un relleno sanitario dimensionado para proveer del servicio de disposición final de RSU a los Municipios de San Carlos de Bariloche y Dina Huapi para el período 2021-2030.

Teniendo ello presente, este PFI está organizado como se describe a continuación. El marco teórico y los métodos numéricos empleados para el estudio del movimiento de agua y transporte de solutos en la ZNS del suelo (objetivo 1) se presentan en el Capítulo 2. El estudio de la dinámica del contenido de agua y solutos en un mallín de la región esteparia cercana a la ciudad de San Carlos de Bariloche (objetivo 2), se desarrolla en el Capítulo 3. En el Capítulo 4, se describe el diseño de coberturas para rellenos sanitarios mediante el HELP, y se presentan los resultados para un caso hipotético basado en las necesidades referidas a la disposición final de RSU para los Municipios de Bariloche y Dina Huapi (objetivo 3). Finalmente, las conclusiones generales y perspectivas de trabajo futuro en el área, se presentan en el Capítulo 5.

Capítulo 2

Modelos para el flujo de agua y transporte de solutos

Este capítulo se enfoca en la descripción del marco teórico asociado a los modelos matemáticos que describen el movimiento de agua y el transporte de solutos en el suelo así como su implementación para la resolución numérica. En primer lugar, se abordan los conceptos básicos y la terminología relacionados a la físico-química, estructura y composición del suelo. Se describe la estructura general de las aguas subsuperficiales así como las variables y ecuaciones utilizadas en este trabajo para calcular el flujo de agua en medios porosos con saturación variable. Posteriormente, se presentan las ecuaciones asociadas al transporte de solutos en el suelo. Por último se describe el código, los métodos numéricos y la implementación desarrollada para resolver los problemas diferenciales resultantes en forma paramétrica.

2.1. El suelo

Desde la perspectiva de las ciencias ambientales, el suelo se considera como un sistema natural sometido a interacciones dinámicas con la atmósfera y con los estratos ubicados debajo de él, que tiene influencia sobre el clima del planeta y el ciclo hidrológico y sirve de soporte para el crecimiento de una gran variedad de organismos [26].

El suelo puede entenderse como un sistema natural heterogéneo, polifásico, particulado, disperso y poroso. La naturaleza dispersa del suelo y su consecuente actividad en la interfaz dan como resultado fenómenos tales como: la adsorción/desorción de agua y compuestos químicos, capilaridad, intercambio de iones, expansión y contracción de las partículas del suelo, así como también procesos de floculación y dispersión alternos [26].

Las tres fases más comunes de la materia se encuentran conformando el suelo: la fase

sólida constituye la *matriz del suelo*; la fase líquida hace referencia al agua del suelo, la cual contiene generalmente sustancias disueltas, denominada *solución del suelo*, y la fase gaseosa que constituye la *atmósfera del suelo* [26].

La matriz consiste en partículas que varían en su composición química así como en tamaño, forma y orientación. La mayoría es materia mineral proveniente de las rocas de la corteza terrestre. También contiene sustancias amorfas, particularmente materia orgánica del suelo (MOS), la cual se encuentra adherida a las partículas minerales constituyendo ensamblajes denominados *agregados*. La estructura de la matriz del suelo determina las características geométricas de los poros en los cuales el agua y el aire son transmitidos y retenidos.

Las proporciones relativas de aire, agua, MOS y materia de origen mineral presentan una gran variación espacial y temporal, e influyen en gran medida en el comportamiento y la productividad de dichos medios. En un suelo dado, estos cuatro componentes se encuentran mezclados en patrones complejos. Aunque una muestra de suelo pueda parecer en un principio netamente sólida, se debe notar que, por ejemplo para un suelo franco, sólo aproximadamente la mitad de su volumen consiste en material sólido tanto orgánico como mineral.

2.1.1. Perfil y horizontes del suelo

Existen dos conceptos íntimamente relacionados entre sí y fundamentales en lo que refiere a la arquitectura del suelo: perfiles y horizontes o estratos. Se entiende por *perfil* a aquella sección vertical del suelo a través de todos sus estratos u horizontes y extendiéndose hasta el material parental [1]. En otras palabras, el perfil del suelo consiste típicamente en una sucesión de estratos u horizontes que pueden ser distinguidos unos de otros en mayor o menor medida [26].

Los *estratos* mencionados pueden ser el resultado del patrón de deposición o sedimentación, como se observa en suelos de depósitos sedimentarios de origen eólicos, aluviales y glaciales. Sin embargo, si los estratos se forman en el sitio debido a procesos pedogenéticos, a estos se los llama *horizontes* [26]. En ambos casos, se los puede definir como una capa del suelo, aproximadamente paralela a la superficie, que difiere en propiedades y características de las capas adyacentes tanto superiores como inferiores, según corresponda [1].

El *horizonte A* es la capa más cercana a la superficie que se encuentra dominada por partículas minerales, pero que ha sido oscurecida por la acumulación de MOS [1, 26]. Este horizonte es la zona del suelo de mayor actividad biológica, en el cual las plantas y los animales, así como sus residuos, interactúan con una gran diversidad, sumamente lábil, de microorganismos, tales como bacterias (incluyendo aquellas de tipo filamentosas conocidas como *actinomyces*), protozoos y hongos [26].

En ecosistemas no perturbados, los restos orgánicos de hojas caídas y otros materiales provenientes de plantas y animales tienden a acumularse en la superficie. Allí estos restos sufren varios grados de descomposición y transformación tanto física como bioquímica de forma tal que que las capas de materiales más antiguas, parcialmente descompuestas, subyacen a los restos más recientemente añadidos al suelo. En su conjunto, estas capas orgánicas en la superficie del suelo se designan como *horizonte O* [1].

Las capas subyacentes a los horizontes A y O contienen comparativamente menos MOS. En dichos horizontes subyacentes, se pueden acumular cantidades variables de: arcillas de silicatos, óxidos de hierro y aluminio, yeso o carbonato de calcio. A estos se los conoce como *horizonte B* [1]. La acumulación de los compuestos mencionados se produce debido a que éstos son lixiviados desde el horizonte A a causa de la percolación del agua, o bien, se forman en el sitio a través de procesos de meteorización. El horizonte B es generalmente de mayor espesor que el horizonte A.

A partir de la acumulación de arcillas y de la presión generada por el suelo suprayacente, se observa en el horizonte B una disminución en la porosidad, que, en el caso de que el mismo sea extremadamente denso, podría inhibir: la aereación, el drenaje interno de agua y la penetración de las raíces en el suelo, aspectos que se abordarán con mayor profundidad en secciones siguientes [26].

Debido a que la meteorización tiende a ser más intensa cerca de la superficie del suelo, en muchos de éstos, las capas superiores pierden parte de su arcilla u otros productos de meteorización por lixiviación hacia los horizontes subyacentes. Esto hace que aparezcan en la parte superior del perfil, usualmente justo debajo del horizonte A, horizontes intensamente meteorizados, que han sufrido lixiviación y que no presentan acumulación de MOS. Estos horizontes son referidos generalmente como *horizonte E*, o de eluviación [1].

Las raíces de las plantas y los microorganismos se pueden extender más allá del horizonte B, especialmente en regiones húmedas, lo que ocasiona cambios químicos en el agua del suelo, cierto grado de meteorización bioquímica y la formación del *horizonte C*. Ésta es la sección del perfil del suelo menos meteorizada [1]. En suelos residuales, el horizonte C consiste en la roca madre fragmentada y meteorizada; mientras que, en suelos sedimentarios, el horizonte C puede consistir en depósitos de origen aluvial, eólico o glacial [26].

Es importante mencionar que la secuencia de los horizontes A, B, C no es siempre la secuencia que se observa en los suelos, sino que varía dependiendo de las condiciones particulares del sitio. Existen cinco variables principales que se consideran como factores de formación del suelo que impactan directamente en la secuencia observada en el perfil: el clima, el material parental, la vegetación, la topografía del sitio y el tiempo. Los suelos maduros serán aquellos que han sido sometidos a estos factores por

un período de tiempo suficientemente largo de forma tal que se observe un desarrollo completo del perfil (secuencia A, B, C) [26].

2.1.2. Granulometría de las partículas del suelo

Exceptuando los suelos orgánicos, la mayoría de la estructura sólida de los suelos consiste en partículas minerales. El método tradicional de caracterizar los tamaños de dichas partículas consiste en ordenarlas en tres rangos de tamaño convenientemente separables conocidos como fracciones texturales. Estas tres categorías se denominan típicamente arenas, limos y arcillas. El procedimiento de separación de estas fracciones y de la estimación de sus proporciones es conocido como *análisis granulométrico*, para el cual se han elaborado técnicas estándar. Los resultados de dicho análisis determinan la clase textural del suelo [26].

Excluyendo por el momento los fragmentos de roca más grandes como la grava, las partículas del suelo poseen un rango de cuatro órdenes de magnitud en cuanto a su tamaño: desde 2,0 mm hasta 0,0002 mm en diámetro. Dentro del ámbito científico, las partículas del suelo se agrupan en distintas categorías granulométricas de acuerdo a distintos sistemas de clasificación. En la figura 2.1, se presentan las escalas comparativas de los tres sistemas más ampliamente utilizados dentro de las ciencias del suelo. Cabe mencionar que los rangos propuestos no son puramente arbitrarios, sino que reflejan cambios sustanciales en cómo se comportan las partículas y en las propiedades físicas que las mismas le otorgan a los suelos [1]. En este proyecto final integrador, se utilizará la clasificación propuesta por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (*USDA*, por sus siglas en inglés).

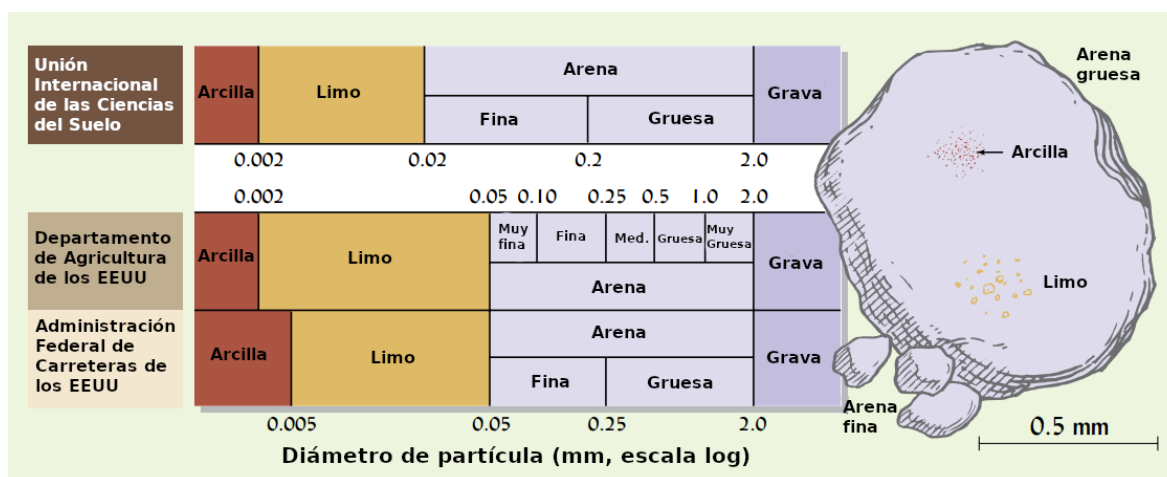


Figura 2.1: Sistemas de clasificación de las partículas del suelo de acuerdo a su tamaño más utilizados en el ámbito de las ciencias del suelo. Nótese a la derecha de la figura la escala entre las distintas categorías granulométricas. **Fuente:** Adaptación de [1].

Dado que se considera como suelo a la parte del mismo que, una vez disgregada,

es capaz de atravesar el tamiz de malla de 2 mm [26], se puede decir que existen tres grandes categorías de partículas de acuerdo a su granulometría:

- **Arenas:** comprenden el rango de 2,0 mm a 0,05 mm; por lo cual, estas partículas pueden ser percibidas a simple vista. Es habitual que la fracción de arena se encuentre subdividida dentro de los distintos sistemas de clasificación en subcategorías tales como: gruesa, media y fina. Las partículas de arena no se adhieren unas a otras; por lo que, no se sienten pegajosas al tacto, sino que se percibe una textura granulada al frotarla entre los dedos. Éstas pueden tener distinta morfología, ya sea redondeadas o angulares, dependiendo del grado de meteorización o abrasión a la que se hayan visto sometidas [1, 26].

Las partículas de arena de mayor tamaño pueden ser fragmentos de roca que contienen varios minerales; sin embargo, la mayoría de los granos de arena consisten en un único mineral, siendo el más habitual el cuarzo (SiO_2) o cualquier otro de los silicatos primarios [1, 26]. Debido a la predominancia de dicho mineral, la fracción de arena generalmente contiene pocos nutrientes para las plantas. Sumado a ello, el gran tamaño de dichas partículas ocasiona que cualquier nutriente que se encuentre presente en ellas no sea liberado fácilmente y, por consiguiente, no esté disponible para las plantas [1].

Dado que las partículas de arena son relativamente grandes, también lo son los poros entre ellas. Estos poros de gran tamaño en suelos arenosos no pueden retener agua contra la fuerza gravitatoria y, por consiguiente, drenan rápidamente y promueven la entrada de aire en el suelo. Estas partículas además poseen una baja superficie específica. Por esto último, posee además una muy baja capacidad para retener nutrientes y no se adhieren entre sí en una masa coherente. En consecuencia, los suelos arenosos tienden a estar bien aireados y sueltos; pero, al mismo tiempo, no son fértiles y son propensos a la sequía.[1]

- **Limos:** aunque son similares a las arenas en cuanto a su forma y composición, las partículas de limo (0,05-0,002 mm) son lo suficientemente pequeñas para ser imperceptibles sin la ayuda de un microscopio o para sentirse en forma individual al tocarlas. Por lo que, el limo se siente más suave al tacto, siendo su textura similar a la de la harina; pero, no es pegajosa, incluso cuando se la humedece [1, 26].

A pesar de que el limo está compuesto de minerales aún meteorizables, su pequeño tamaño y gran superficie específica permite una meteorización lo suficientemente rápida para liberar cantidades significativas de nutrientes para las plantas [1].

Los poros entre las partículas de material limoso son mucho más pequeños y numerosos que aquellos de la arena; por lo que, éste retiene una mayor cantidad de

agua y permite que drene una menor cantidad de solución del suelo. Sin embargo, el limo por sí mismo no exhibe demasiada plasticidad o bien maleabilidad. La poca elasticidad, cohesión y capacidad de adsorción que algunas fracciones de limo presentan se debe en gran medida a una fina película de arcilla adherida a ellas [1, 26]. Debido a la baja adhesión de sus partículas y a su baja plasticidad, los suelos con altos contenidos de limos y arenas finas son altamente susceptibles a la erosión tanto eólica como hídrica.[1]

- **Arcillas:** esta fracción granulométrica comprende el conjunto de partículas minerales más pequeñas, siendo sus diámetros característicos $< 0,002$ mm. Esto último hace que las mismas puedan ser vistas únicamente con la ayuda de un microscopio electrónico. Por otra parte, cabe mencionar que su característica distintiva al tacto es que se vuelve una masa pegajosa al humedecerla con agua y, además, se tornan fácilmente maleables, exhibiendo una elevada plasticidad. A diferencia de las otras dos categorías mencionadas previamente, las arcillas tienden a tener la forma de pequeñas escamas o plaquetas planas. [1, 26]

Las arcillas generalmente pertenecen al grupo de los minerales conocidos como aluminosilicatos. Estos son minerales secundarios originados en el suelo en el transcurso de su proceso de formación a partir de su material parental. Cabe mencionar que, en algunos casos, la fracción de las arcillas puede incluir concentraciones considerables de partículas finas que no pertenecen a la categoría de los aluminosilicatos, tales como óxidos de hierro o carbonato de calcio [26]. Cada mineral que conforma a las partículas dentro de este rango granulométrico imparte diferentes propiedades a los suelos en los cuales es prominente. Por consiguiente, las propiedades del suelo tales como los comportamientos de expansión y contracción, su plasticidad, la capacidad de retención de agua y de adsorción de compuestos químicos dependen del tipo de arcilla presente así como también de su cantidad [1].

Las fracciones más pequeñas de arcilla ($< 0,001$ mm) y las partículas orgánicas de tamaño similar que componen el suelo poseen propiedades coloidales. Esto último implica que, si las mismas se encuentran en suspensión, no sedimentarán fácilmente. Debido a su tamaño extremadamente pequeño, las partículas coloidales del suelo poseen un valor alto de área superficial por unidad de masa. Las superficies de suelos de estas características (tanto los minerales como los orgánicos) exhiben cambios electromagnéticos que atraen iones positivos y negativos así como también agua, haciendo que esta fracción del suelo sea la más activa química y físicamente [1, 26]

Cabe mencionar que los poros entre las partículas de arcilla son muy pequeños e intrincados; debido a ello, el movimiento tanto del agua como del aire a través

de los mismos es muy lento. En suelos arcillosos, los poros entre las partículas son pequeños en tamaño, pero muy numerosos, lo cual le permite a dicho suelo retener una gran cantidad de agua. Sin embargo, una gran proporción del agua almacenada en ellos no se encuentra disponible para las plantas. Más aún, las arcillas que componen dichos suelos, dependiendo de su tipo específico, serán responsables de los procesos de expansión y contracción de los mismos durante su hidratación y secado, respectivamente [1].

Debido a su elevada área superficial por unidad de masa y su actividad físico-química resultante, las arcillas son la fracción granulométrica que tiene más influencia en el comportamiento del suelo.

2.1.3. Textura

La proporción de partículas en cada uno de los rangos de tamaño mencionados en la sección anterior se describe en su conjunto como *textura*. Es importante mencionar en este punto que la textura puede variar de horizonte a horizonte dentro del mismo perfil de suelo; por lo que, se trata de una característica de cada horizonte y no del suelo en su conjunto. A pesar de ello, la textura posee una profunda influencia en muchas propiedades del suelo y afecta su aptitud para la mayoría de sus posibles usos [1].

A los suelos con diferentes proporciones de arenas, limos y arcillas, se les asigna distintas clases texturales [26]. La clase textural proporciona una idea de la distribución del tamaño de partículas que componen a cada horizonte del suelo y de la naturaleza general de sus propiedades físicas. Las relaciones entre los nombres de las clases texturales y las proporciones de arenas, limos y arcillas se representan en un diagrama denominado triángulo textural, el cual se encuentra representado en la figura 2.2 [1].

Las 12 clases texturales presentadas en la figura 2.2 forman una secuencia graduada desde aquellas denominadas como arenas, que se corresponden más bien a partículas de granulometrías gruesas, hasta clases texturales netamente arcillosas, que se corresponden con una mayor preponderancia de las partículas de granulometrías muy finas.

Las clases texturales denominadas como arenosas y franco-arenosas son dominadas principalmente por las propiedades de la arena mencionadas en la sección anterior. Esto se debe a que dichos suelos se encuentran compuestos generalmente por al menos un 70 % de dicha fracción textural y menos del 15 % restante se corresponde a arcillas. Por otra parte, las clases texturales denominadas arcilla, arcillo-arenoso y arcillo-limoso se encuentran dominadas por las características de la arcilla. En forma similar, la clase textural limo es dominada por los efectos de la fracción textural homónima presente en dicho suelo [1].

A pesar de lo expuesto en el párrafo anterior, la mayoría de los suelos se corresponden con algún tipo de clase textural franca. Un horizonte clasificado como franco

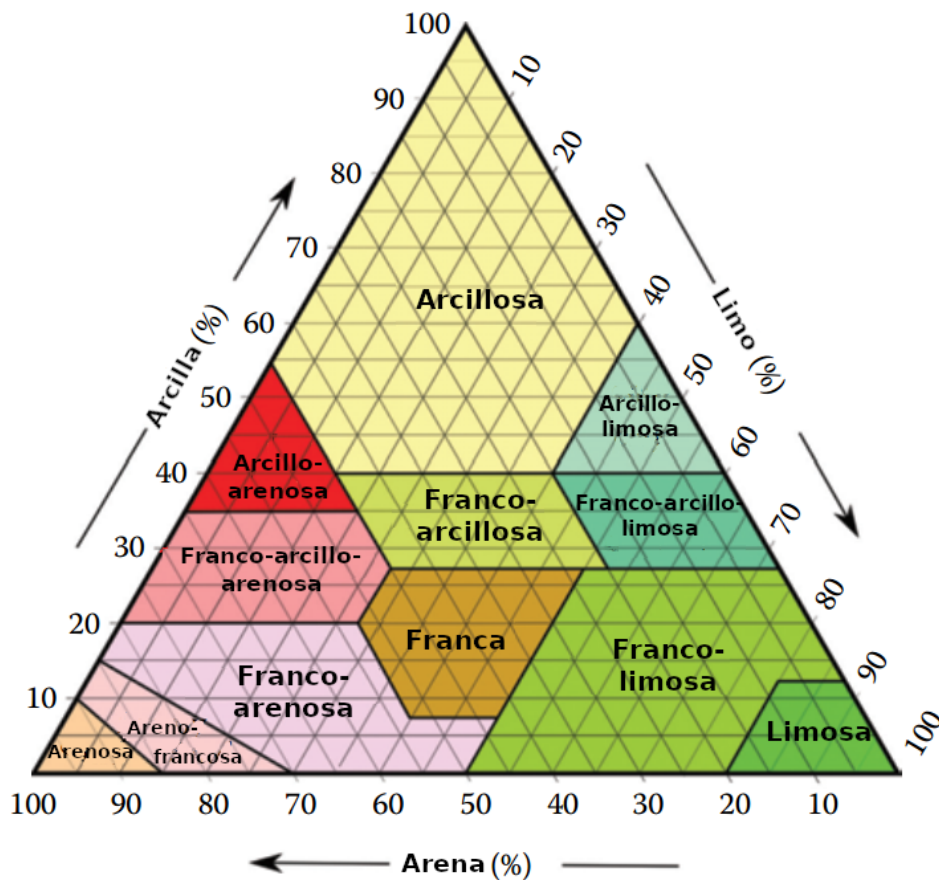


Figura 2.2: Triángulo utilizado para la definición de la clase textural del suelo, según los porcentajes de arenas, limos y arcillas. **Fuente:** Adaptación de [2].

presentará una mezcla de arenas, limos y arcillas de forma tal que presenta en su conjunto las propiedades de cada una de las fracciones texturales en aproximadamente la misma medida. Esta definición no implica que estas tres fracciones se encuentren presentes en las mismas proporciones; por ello, la clase franca *per se* no se encuentra en el medio del triángulo de clases texturales. Esto ocurre debido a que con un pequeño porcentaje de arcillas es suficiente para que el suelo obtenga las propiedades de dichas partículas; mientras que, para las arenas y los limos, una proporción de dicho tamaño influye en menor medida en las propiedades del suelo. Comparativamente, se puede observar que para que un suelo sea clasificado como franco-arcilloso basta con que el porcentaje de arcillas ronde el 26%; pero, para considerarse franco-arenoso o franco-limoso, un suelo debe tener al menos 45% de arena o 50% de limo, respectivamente [1].

2.1.4. Densidad del suelo

En cuanto a la densidad del suelo, es importante hacer mención a la densidad de partículas y a la densidad aparente del mismo. La primera de estas definiciones refiere

a la masa por unidad de volumen de las partículas sólidas del suelo.

$$\rho_{particle} = \frac{m_s}{V_s} \quad (2.1)$$

donde: $\rho_{particle}$ refiere a la densidad de las partículas [ML^{-3}]¹, m_s representa la masa de suelo seco [M] y V_s representa el volumen ocupado por los sólidos [L^{-3}]. Los valores típicos de esta variable se encuentra entre 2,6-2,75 g cm⁻³.

La composición química y la estructura de los cristales de los minerales determinan la densidad de las partículas del suelo. Es importante notar que la densidad definida de esta forma no se ve afectada por el espacio de los poros y, por consiguiente, no está relacionada con el tamaño de partícula (textura) o al arreglo de dichas partículas en el suelo (estructura²). Para cálculos generales referidos a suelos minerales superficiales con contenido de materia orgánica que varía entre 1% y 5%, se puede asumir una densidad de partícula de 2,65g cm⁻³ [1].

Por otro lado, la *densidad aparente* del suelo, ρ_b , se define como la masa correspondiente a una unidad de volumen de suelo seco. Este volumen incluye tanto a los sólidos que conforman la matriz del suelo como a los poros asociados a ellos, según se especifica en la siguiente igualdad:

$$\rho_b = \frac{m_s}{V} \iff \rho_b = \frac{m_s}{V_s + V_a + V_w} \quad (2.2)$$

donde: ρ_b representa la densidad aparente [ML^{-3}], m_s es la masa de suelo seco [M] y V representa el volumen total del suelo [L^{-3}], compuesto por el volumen ocupado por los sólidos (V_s), el aire (V_a) y el agua (V_w). La densidad aparente del suelo es siempre menor que la densidad de las partículas que lo componen y sus valores típicos se encuentran entre 1,1-1,6 g/cm³, pudiendo alcanzar valores mucho menores en suelos ricos en MOS y en suelos alofánicos [1].

2.2. El agua en el suelo

2.2.1. Agua subsuperficial

Las aguas subsuperficiales se dividen en dos categorías principales: la *zona no saturada* (ZNS) o vadosa cercana a la superficie del suelo y la *zona saturada* (ZS) o freática, más profunda. La frontera entre estas dos zonas es conocida como *nivel freático*, que se define como la superficie en la que la presión del agua intersticial es igual a la pre-

¹Se utiliza la nomenclatura estándar para las dimensiones primarias del Sistema Internacional: M = masa; L = longitud; T = tiempo.

²La estructura refiere a la combinación o al arreglo de las partículas primarias del suelo en agregados secundarios (también denominados *peds*).

sión atmosférica [3]. A modo de referencia, es esperable que dicho nivel se encuentre comúnmente a sólo 1–10 m por debajo de la superficie del suelo en regiones húmedas; mientras que, puede encontrarse a varios cientos o incluso miles de metros de profundidad en regiones áridas. En el caso particular de los humedales, dicho nivel se encuentra esencialmente en la superficie terrestre [1].

En la figura 2.3, se observa una sección transversal de un suelo en el cual se encuentra representado el nivel freático con la línea indicada como *water table* (por su denominación en inglés). En un sitio dado de estudio, el nivel freático se moverá hacia arriba o hacia abajo en el perfil del suelo en respuesta al balance entre la cantidad de agua que ingresa a través del suelo y la cantidad perdida a través de pozos bombeados y de sumideros naturales (raíces y ascenso capilar). En las regiones templadas húmedas, el nivel freático suele ser máximo a principios de la primavera después de las lluvias de invierno y el deshielo, pero antes de que la evapotranspiración comience a extraer el agua almacenada en las capas más superficiales del suelo [1].

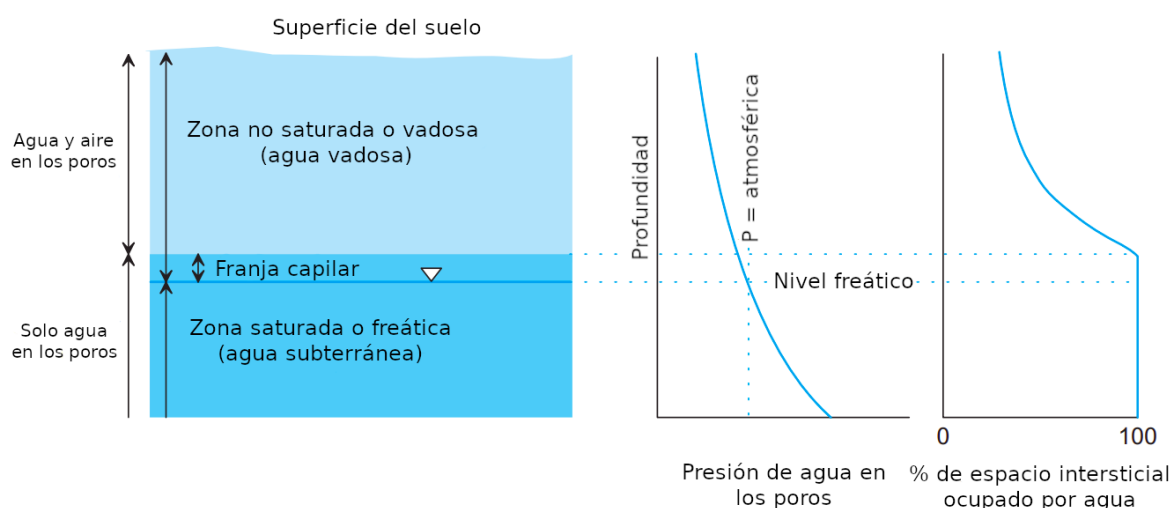


Figura 2.3: Sección transversal vertical de un perfil del suelo representando las definiciones de los términos utilizados para describir el agua subsuperficial. **Fuente:** Adaptación de [3].

La ZNS se define como la zona por encima del nivel freático en la cual la presión del agua intersticial es menor que la atmosférica. Esta disminución de la presión se debe a las fuerzas capilares existentes en la matriz porosa. En la mayoría de la ZNS, el espacio intersticial contiene porcentajes variables de agua y aire. El término agua vadosa aplica a toda el agua en la ZNS; mientras que, los términos agua del suelo y humedad del suelo son aplicados a las aguas en la ZNS en la parte superficial en la cual las raíces de las plantas se encuentran activas [3].

Debajo del nivel freático, se encuentra la ZS, donde la presión del agua intersticial es mayor que la presión atmosférica y los poros del suelo se encuentran completamente saturados con agua. A menudo, esta zona se encuentra sobre un horizonte de suelo

impermeable o una capa de roca o arcilla impermeable y, al agua dentro de ésta zona, se la denomina *agua subterránea*.

La zona de humectación por movimiento capilar se conoce como *franja capilar*. Formalmente, se la puede definir como aquella zona del suelo que se encuentra completamente saturada con agua, pero que se encuentra por encima del nivel freático y a una presión menor que la atmosférica [3]. Dicho movimiento puede proporcionar un suministro constante y significativo de agua que permite a las plantas sobrevivir durante períodos de precipitación escasa, ya que pueden bombear agua hasta la superficie. Por otro lado, el ascenso capilar también puede traer aparejado un suministro constante de sales disueltas a la superficie, conocido como proceso de salinización, que produce frecuentemente la degradación de suelos, particularmente en regiones áridas [1].

2.2.2. Contenido de agua

Para analizar el movimiento de agua en el suelo, se requiere una variable para cuantificar el contenido de agua en cada posición espacial. El contenido de agua del suelo puede ser definido de varias formas. El contenido volumétrico de agua, θ , es la razón entre el volumen de agua y el volumen total ($L^3 L^{-3}$). En forma alternativa, el contenido gravimétrico de agua, θ_g , se define como el cociente entre la masa de agua y la masa de sólidos. Estas definiciones pueden relacionarse mediante la expresión,

$$\theta = \frac{V_w}{V} = \frac{\rho_b}{\rho_w} \theta_g \quad (2.3)$$

donde ρ_w es la densidad del agua, V_w el volumen de solución o agua en el perfil [L^3]; y, V , el volumen total del sistema [L^3]. Este último término incluye el volumen de gas, el de líquidos y el de sólidos.

El contenido de agua también se puede medir empleando la *saturación efectiva*, S_e :

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.4)$$

donde θ_s es el *contenido de agua volumétrico saturado* (igual a la porosidad si no hay gas atrapado en el perfil y todos los poros se encuentran llenos de agua) y θ_r es el *contenido de agua volumétrico residual*. El contenido de agua residual es en cierto punto definido arbitrariamente como el contenido de agua en el cual la conductividad hidráulica se acerca a cero. Este valor es generalmente una constante empírica que se determina al ajustar los datos de la curva característica de retención de agua para dicho suelo (ver Sec. 2.2.4).

2.2.3. Potencial de presión

La retención y el movimiento de agua en el suelo, su consumo y translocación en las plantas y su pérdida a la atmósfera son todos fenómenos asociados con la energía [1]. Las dos formas principales de energía son la potencial y la cinética. Dado que el movimiento del agua en el suelo se da a velocidades bajas, la energía cinética se vuelve despreciable. En cambio, la energía potencial, que está asociada a la posición o a la condición interna del agua del suelo, es la que juega el rol principal para determinar su estado y movimiento [26]. Por simplicidad, de aquí en adelante, se utilizará el término potencial para referirse a la energía potencial.

La solución del suelo está sujeta a un conjunto de fuerzas que resultan de la atracción mutua entre la matriz del suelo y el agua, de la presencia de solutos en solución, así como también de la acción de los gases del suelo y de la acción de la gravedad. Cada una de estas fuerzas da origen a una componente del potencial total ψ_{tot} , igual a la suma algebraica de las mismas expresada como:

$$\psi_{tot} = \psi_n + \psi_o + \psi_p + \psi_g + \dots \quad (2.5)$$

donde ψ_n es el potencial neumático, ψ_o es el potencial osmótico, ψ_g es el potencial gravitatorio y ψ_p es el potencial de presión o potencial matricial. La primera componente es debida a la diferencia de presión del aire del suelo respecto a la presión atmosférica. Dado que la presión del aire en el suelo es casi constante y cercana a la atmosférica, esta componente es generalmente ignorada. Por otro lado, el potencial osmótico es originado por la presencia de solutos en solución. Este fenómeno no afecta significativamente el flujo de agua en el suelo [26]; sin embargo, puede adquirir importancia en la interacción entre el suelo y las raíces de las plantas y en procesos que involucran difusión de vapor. En este trabajo, interesan el potencial gravitatorio y el potencial de presión.

El agua del suelo se encuentra bajo la influencia de la fuerza de gravedad que empuja hacia las capas más profundas del suelo. El potencial gravitatorio es el resultado de esta fuerza, y su valor en cualquier punto del suelo se determina por la elevación de dicho punto respecto a un nivel de referencia arbitrario. En la práctica, este nivel de referencia puede ubicarse en la superficie del suelo o en el nivel freático.

El potencial de presión constituye una propiedad dinámica del suelo, y depende del contenido de agua y la composición del suelo. El agua en el suelo puede encontrarse tanto a una presión igual a la hidrostática, la cual es mayor que la atmosférica (en el caso saturado), o a una presión menor que la atmosférica, llamada tensión o succión. En el primer caso su potencial de presión adopta valores positivos; mientras que, en el segundo, se vuelve negativo y se lo denomina potencial matricial, también conocido como potencial capilar [26]. El potencial matricial (o potencial mátrico) resulta de las fuerzas de cohesión en el agua (que da lugar al fenómeno de tensión superficial) y

adhesión a la matriz del suelo y el aire, cuyo efecto es retener el agua en el suelo y bajar su potencial respecto al del agua libre.

Los potenciales pueden expresarse en unidades de energía específica. En particular, la energía por unidad de volumen, coincide con la unidad de presión (el Pascal en el Sistema Internacional de unidades) que puede ser a su vez expresado como cargas (o alturas), al dividir por $\rho_w g$. De esta manera, los potenciales quedan expresados en unidades de longitud,

$$H = h + z_g \quad (2.6)$$

siendo H el potencial hidráulico total, h el potencial de presión y z_g el potencial gravitatorio. El potencial hidráulico total es la fuerza impulsora del movimiento del agua. Su componente de presión o matricial h se relaciona con el contenido de agua a través de la curva de retención o curva característica, que es propia de cada horizonte y se describe a continuación.

2.2.4. Curvas de retención

El potencial de presión, expresado en unidades de longitud como h de aquí en más, se encuentra relacionado con el contenido de agua a través de la curva de retención o curva característica, que es propia de cada horizonte (figura 2.4). Éstas curvas pueden ser divididas en tres regiones de acuerdo al potencial mátrico.

La primera de ellas es la *región de adsorción* que ocurre a valores muy negativos de dicho potencial, donde el contenido de agua es bajo y aproximadamente constante. El agua en dicha condición se encuentra retenida en películas sobre las superficies de las partículas, debido a la doble capa de cationes intercambiables. Las clases texturales más finas tendrán mayor contenido de agua en dicha región que aquellas de granulometría gruesa debido a su mayor superficie específica [4]. El punto de marchitez permanente, θ_{PMP} , definido como el punto a partir del cual las plantas ya no pueden extraer agua del suelo ocasionando que se marchiten, delimita el fin de esta región en el eje de las abscisas.

En la región de adsorción de la curva de retención, se identifica también el contenido de agua residual, θ_r . Este término se define como el valor asintótico de θ cuando $d\theta/dh \rightarrow 0$, siendo un parámetro de ajuste que debe ser considerado en el contexto del modelo utilizado [21].

La *región capilar* ocurre en rangos medios de potencial mátrico. A medida que este potencial se vuelve menos negativo, una sucesión de poros cada vez de mayor tamaño se llenan con agua por acción de la capilaridad. La forma de esta región de la curva se encuentra íntimamente relacionada con la distribución de tamaño de poros de dicho horizonte. Los cambios drásticos en esta región están asociados con poros de tamaño uniforme o bien una distribución de tamaño de poros con poca variabilidad; mientras

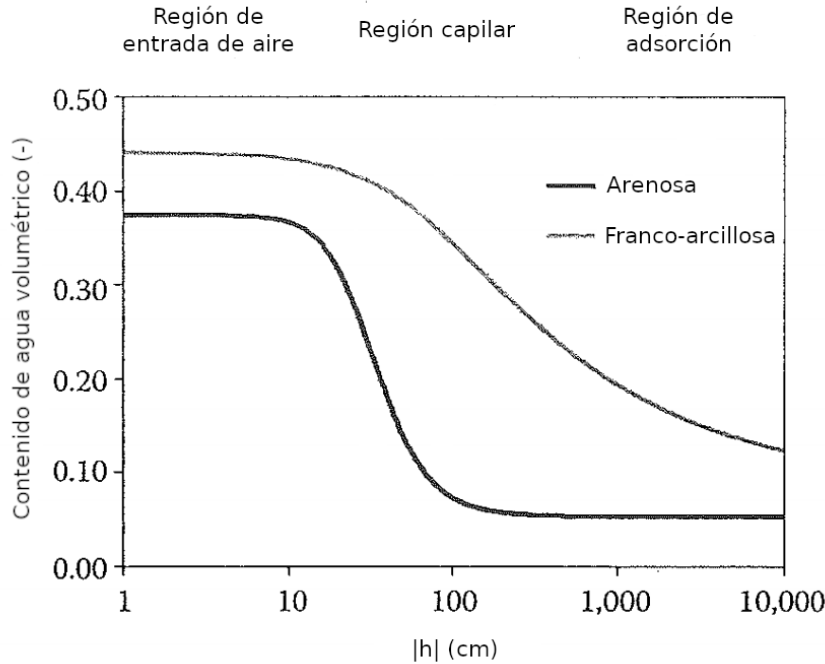


Figura 2.4: Curvas de retención de agua en el suelo para dos clases texturales. Estas curvas relacionan el potencial de presión, h , con el contenido de agua del suelo, y pueden identificarse tres regiones de acuerdo al proceso dominante: entrada de aire, región capilar y región de adsorción. **Fuente:** Adaptación de [4].

que, cambios más paulatinos sobre un rango amplio de valores de potencial mátrico indican una mayor variabilidad en el tamaño de poros. Dado que la capilaridad domina esta sección de la curva de retención, es crítico que se cuente con muestras de suelos que mantengan intacta su estructura para las mediciones necesarias para su elaboración. Esto implica también que la curva de retención ofrece una forma de caracterizar la estructura del suelo [4].

Como bien se mencionó en el párrafo anterior, en esta región, el flujo de agua en el suelo se encuentra dominado por fenómenos capilares, los cuales predominan desde el valor de θ_{PMP} hasta el valor de la capacidad de campo para dicho suelo, θ_{CC} . Para suelos arenosos, la tensión que corresponde a la capacidad de campo es $h_{CC} = 100$ cm; mientras que, para suelos de textura fina, suele adoptarse un valor de 300 cm [21].

Finalmente, la *región de entrada de aire* ocurre a valores de potencial mátrico cercanos a cero. En esta región, el contenido de agua es alto y nuevamente es aproximadamente constante. La ordenada al origen de las curvas presentadas en la Fig. 2.4 representa el contenido de agua saturado, θ_s , en el cual los poros del suelo están llenos de agua; por esto último, en esta condición, su valor será igual a la porosidad total de dicho horizonte. La disminución en el contenido de agua del suelo se producirá recién cuando se alcance una tensión que exceda las fuerzas de capilaridad en los poros de mayor tamaño que contienen agua. En dicho punto, el aire comienza a ingresar en los

poros mencionados. Ese potencial mátrico es denominado como valor de entrada de aire (h_A) y usualmente ocurre entre los valores de -10cm a -100 cm [4]. Matemáticamente, se expresa como el máximo valor de h para el que $d\theta/dh = 0$. Por ello, se puede decir que la región de la curva comprendida entre $h = 0$ y $h = h_A$ se corresponde con la región de entrada de aire.

En suelos de textura gruesa el valor de h_A está relativamente bien definido y es físicamente realista. Sin embargo, su definición es cuestionada en suelos constituidos por materiales más finos debido a que, en contraposición a los suelos de textura más gruesa, la distribución del tamaño de poro es más amplia. Más aún, h_A es considerado un parámetro empírico, aproximadamente igual a la inversa de la presión de entrada de aire. Radcliffe & Šimůnek [4] sostienen que θ_s también es un parámetro de ajuste y su valor debe considerarse en el contexto del modelo elegido para describir la curva de retención.

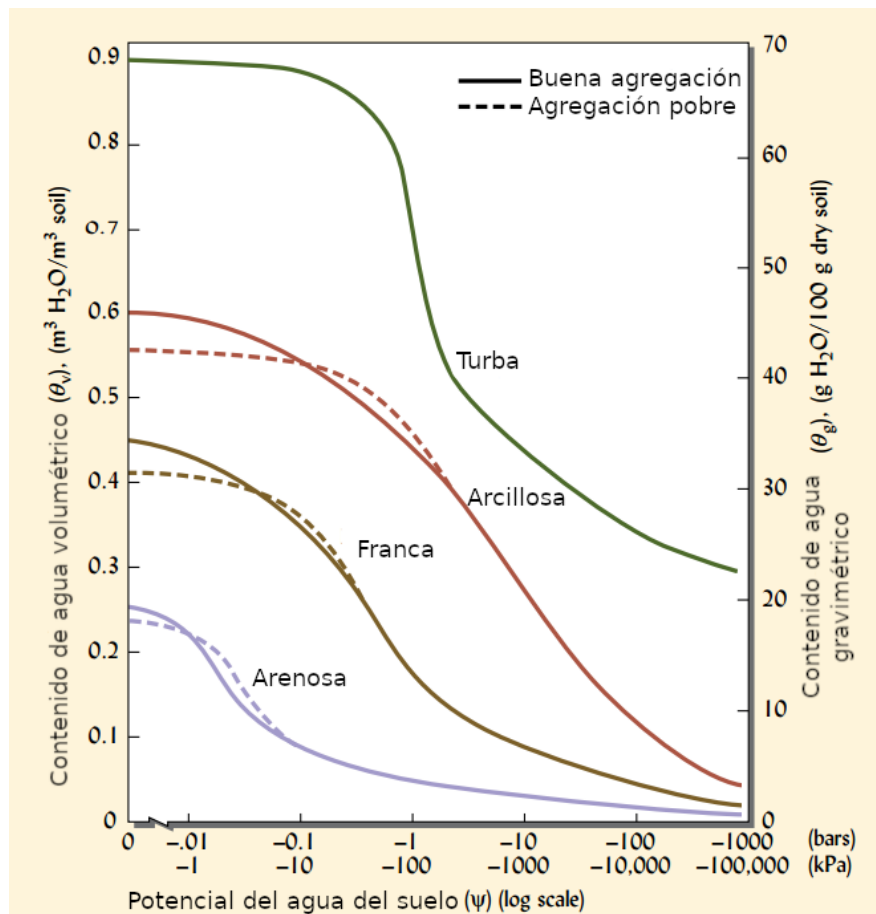


Figura 2.5: Curvas de retención de agua en el suelo para diferentes clases texturales. **Fuente:** Adaptación de [1].

Finalmente, la figura 2.5 muestra una curva de retención típica donde se aprecia el marcado efecto de la textura y la estructura del suelo medida a través de las fracciones de arenas, limos y arcillas. Es necesario señalar que la relación $\theta(h)$ no es unívoca, es decir que la curva obtenida en el proceso de secado no coincide con la determinada

en el proceso de humedecimiento del suelo, debido al efecto de histéresis. Las causas de los fenómenos de histéresis son varias, una de ellas es la falta de uniformidad en la geometría de los poros individuales, que se manifiesta en el llamado “cuello de botella”, el ángulo del menisco formado entre la partícula de suelo y el líquido que fluye por él depende de la dirección en la que este líquido se desplaza. Otros factores que contribuyen a la histéresis es el aire atrapado dentro de los agregados del suelo entre períodos de humedecimiento/secado, y los fenómenos de expansión-contracción de los suelos. No obstante, este efecto es más pronunciado en suelos de textura gruesa a potenciales altos [21]. Dadas las características texturales del suelo estudiado y la complejidad para la modelación, este efecto no será tenido en cuenta en este trabajo.

2.3. Movimiento de agua en la zona no saturada

2.3.1. Ecuación de Richards

A medida que el agua fluye a través del perfil de suelo, se suceden procesos de secado y humedecimiento que dan lugar a la variación espacio-temporal del potencial matricial y el contenido de agua. La ley fundamental que puede utilizarse para modelar la dinámica de este fenómeno es la ecuación de continuidad para un volumen elemental representativo del suelo (no a escala de poro), que puede escribirse como,

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{J}_w \approx -\frac{\partial J_{w,z}}{\partial z} \quad (2.7)$$

donde \mathbf{J}_w es el vector de flujo volumétrico de agua [$L^3T^{-1}L^{-2}$]. La segunda igualdad aproximada indica que se supone que el flujo en el suelo ocurre predominantemente en la dirección vertical y que el flujo lateral neto es despreciable.

Para el flujo vertical, se utiliza la ley de Buckingham-Darcy, que es la extensión de la ley de Darcy a flujo en medios no saturados. Esta ley se basa en los siguientes supuestos: 1. La fuerza impulsora del agua en un suelo isotérmico, rígido y no saturado, que no contenga membranas de soluto y en el que el potencial de presión de aire es cero, es la suma del potencial matricial y el gravitatorio. 2. La conductividad hidráulica de un suelo no saturado es una función del contenido de agua o del potencial matricial. Matemáticamente se expresa como,

$$J_{w,z} = -K(h) \frac{\partial H}{\partial z} = -K(h) \frac{\partial(h+z)}{\partial z} = -K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right), \quad (2.8)$$

donde $K(h)$ es la conductividad hidráulica no saturada [$L T^{-1}$].

Reemplazando la expresión para el flujo (2.8) en la ecuación de continuidad (2.7),

obtenemos la ecuación de Richards,

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right], \quad (2.9)$$

donde $\theta(h)$ es el contenido de agua como función del potencial matricial, cuya relación está dada por la curva de retención. A su vez, ambas variables dependen de la posición, z , y del tiempo, t .

Queda claro que para poder resolver la ecuación (2.9) es necesario conocer explícitamente las dependencias del contenido de agua y la conductividad hidráulica como función del potencial matricial. A continuación, se describen los modelos empleados para aproximar estas dependencias funcionales.

2.3.2. Modelos para la curva de retención

De acuerdo con lo descrito en apartados anteriores, la función que relaciona el contenido de agua, $\theta(h)$, y el potencial de presión, h , son de tipo potencial. Aún no existe una teoría universal para la predicción de la relación entre estas dos variables a partir de propiedades básicas del suelo, como son su textura y su estructura. La adsorción y los efectos de la geometría de los poros son generalmente muy complejos para ser descritos por un modelo sencillo. Por ello, diversos autores han propuesto varias fórmulas empíricas para describir la curva de retención, siendo los más conocidos aquellos propuestos por Brooks y Corey [27] y por van Genuchten [28].

El primero de éstos es ampliamente utilizado por su sencillez y se describe como,

$$S_e = \left(\frac{h_A}{h} \right)^\lambda, \quad (2.10)$$

donde: λ es el índice de distribución de poros, el resto de los parámetros fueron descritos en la sección 2.2. Uno de los limitantes asociados a la utilización de este modelo es que el mismo describe únicamente la porción de la curva de retención cuyos valores del potencial de presión, h , son menores que la presión de entrada de aire, h_A (figura 2.4).

Uno de los modelos alternativos más ampliamente difundidos que surgen para subsanar dicha limitante es el de van Genuchten [28]. Este se encuentra representado por la siguiente igualdad:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + |\alpha_v h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0, \end{cases} \quad (2.11)$$

donde n y m son parámetros empíricos. Usualmente, se asume que $m = 1 - 1/n$. Por otra parte, el parámetro α_v representa la inversa de la presión de entrada de aire, h_A ,

y sus unidades son $[\text{cm}^{-1}]$.

2.3.3. Modelos para la conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica no saturada es afectada tanto por propiedades del suelo como por propiedades del fluido. La porosidad total, la distribución del tamaño de poros y la continuidad de los poros modifican la conductividad al igual que la viscosidad y la densidad del fluido. Más aún, se puede decir que este parámetro es una función no lineal del contenido de agua y que varía con la textura del suelo [21].

Al igual que en el caso de los modelos para describir las curvas de retención de agua, para la función de conductividad hidráulica, se han desarrollado un número considerable de ecuaciones que buscan representarla. Uno de los más sencillos es aquel planteado por Gardner [29]:

$$K(h) = K_s e^{bh}, \quad (2.12)$$

donde $K(h)$ es la conductividad hidráulica no saturada que depende del potencial de presión (particularmente, del potencial matricial) $[LT^{-1}]$; K_s , la conductividad hidráulica saturada $[LT^{-1}]$; y, b es una constante empírica positiva que depende del suelo. Dada su gran simplicidad, este modelo es frecuentemente utilizado en soluciones analíticas[30], a pesar de sus limitaciones asociadas.

En cuanto a modelos para la conductividad hidráulica no saturada, es importante destacar los dos que se encuentran acoplados con las ecuaciones de Brooks y Corey[27] (ec. (2.10)) y van Genuchten[28] (ec. (2.11)). Es importante tener presente que ambos modelos fueron derivados usando la distribución de tamaño de poros. El modelo de Burdine [31] fue desarrollado considerando el suelo como un conjunto de tubos capilares de diferente radio, obteniéndose:

$$K(S_e) = K_s S_e^l \frac{\int_0^{S_e} \frac{dS_e}{h^2(S_e)}}{\int_0^1 \frac{dS_e}{h^2(S_e)}} \quad (2.13)$$

donde l es un parámetro que está asociado con la conectividad entre poros [-] y $h(S_e)$ representa la relación de la curva de retención. Este modelo se encuentra asociado generalmente con la ecuación de Brooks y Corey (ec. (2.10)), lo cual lleva a que la función para la conductividad hidráulica sea:

$$K(S_e) = K_s S_e^{1+l+2/\lambda}. \quad (2.14)$$

Por otra parte, el modelo de Mualem [32] es ligeramente diferente ya que considera para su deducción que el suelo está formado por dos grupos de tubos capilares

conectados en serie:

$$K(S_e) = K_s S_e^l \frac{\left[\int_0^{S_e} \frac{dS_e}{h(S_e)} \right]^2}{\left[\int_0^1 \frac{dS_e}{h(S_e)} \right]^2}. \quad (2.15)$$

En este caso, el modelo que se acopla generalmente con la ecuación (2.15) es el planteado por van Genuchten (ec. (2.11)), obteniéndose la siguiente expresión:

$$K(S_e) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2. \quad (2.16)$$

Mualem [32] estimó un valor de $l = 0,5$ para la mayoría de los suelos y es lo que se asume habitualmente. Sin embargo, Schaap y Leij [33] recientemente recomendaron utilizar un $l = -1$ como un valor apropiado para la mayoría de las clases texturales de los suelos.

2.3.4. Limitaciones de la ecuación de Richards

Dado que la ecuación de Richards se obtiene a partir de la combinación de la ecuación de continuidad y la ley de Buckingham-Darcy, sus limitaciones estarán asociadas a aquellas de las ecuaciones que la constituyen. En medios porosos, las limitaciones con respecto al flujo de agua estarán asociadas con la ley de Buckingham-Darcy.

En lo que respecta a la ley de Buckingham-Darcy, en concreto, se puede decir que la misma no es válida en todas las condiciones de flujo a través de medios porosos. Ésta es típicamente relevante en el rango de volumen desde unos pocos mm^3 hasta unos pocos m^3 . Para volúmenes por fuera de dicho rango, pueden presentarse desviaciones del flujo según lo establecido por la ley de Buckingham-Darcy [26].

Se reconoce también que la relación lineal entre el flujo y el gradiente hidráulico falla a velocidades de flujo altas, donde las fuerzas inerciales ya no son despreciables en comparación con las fuerzas viscosas. La ley de Buckingham-Darcy es aplicable entonces sólo mientras el flujo sea laminar. El flujo laminar predomina en los limos y materiales más finos para los gradientes hidráulicos que generalmente se encuentran en la naturaleza. Sin embargo, en arenas gruesas y gravas, los gradientes hidráulicos muy superiores a la unidad pueden dar como resultado condiciones de flujo no laminar. Por lo que, en tales casos, la ley de Darcy puede no ser una buena aproximación. El flujo no laminar también puede ocurrir en macroporos como grietas anchas y en los canales generados por la fauna del suelo [26].

Las desviaciones de la ley de Darcy también pueden ocurrir en el extremo opuesto del rango de velocidad de flujo, es decir, en gradientes bajos y en poros estrechos. Se ha propuesto que, en suelos arcillosos, los gradientes hidráulicos pequeños pueden llegar a no causar ningún flujo o, en el caso de que haya un gradiente, el mismo causa tasas

de flujo que son menores que aquellas proporcionales al gradiente [26].

Otra limitación importante de la ley de Darcy se relaciona con la escala del sistema de flujo. La ley puede fallar a escala microscópica cuando los procesos de flujo tienen lugar a distancias cortas comparables a los tamaños de los poros individuales. En el otro extremo, también puede fallar en la escala del paisaje, donde el medio del suelo es muy heterogéneo y puede incluir dominios o episodios de flujos laminares y turbulentos en diferentes direcciones y tortuosidades. Por lo tanto, la ley de Buckingham-Darcy es aplicable principalmente a sistemas relativamente homogéneos y estables de escala y tamaños de poros intermedios [26].

2.4. Ecuación de transporte

El transporte de solutos es considerado como uno de los temas más complejos de la física de suelos. Esto se debe a que involucra el movimiento de agua y compuestos químicos, reacciones químicas y transformaciones debido al metabolismo de los organismos que habitan en él. Esta temática constituye un área de investigación en continuo desarrollo debido a su vínculo con la calidad del agua en muchas localidades, no sólo en lo que refiere a usos agrícolas sino también en lo que respecta al abastecimiento de agua [4].

Por ello, en esta sección, se abordarán en primer lugar los mecanismos de transporte físico que afectan el movimiento de solutos en el suelo y, posteriormente, se desarrollará la ecuación de transporte de solutos combinada.

2.4.1. Mecanismos de transporte físico que afectan el movimiento de solutos

Los solutos en el suelo no sólo se mueven pasivamente con el agua mediante el proceso denominado convección, sino que también se mueven dentro de ella en respuesta a los gradientes de concentración en los procesos de difusión y dispersión. El caudal másico total, J , es la tasa de flujo másico a la cual el soluto fluye a través de una sección transversal [$ML^{-2}T^{-1}$]. Dicho caudal es la suma de las componentes que representan los mecanismos de transporte físico que afectan el movimiento del soluto: advección, difusión y dispersión hidrodinámica, y se expresa como

$$J = J_c + J_d + J_h, \quad (2.17)$$

donde J_c es el flujo convectivo, J_d representa al flujo difusivo, y J_h , el flujo dispersivo o hidrodinámico. A continuación, se desarrolla sobre cada una de éstas.

Transporte convectivo de solutos

La convección del agua del suelo, a veces denominado flujo Darciano, lleva consigo un flujo convectivo de solutos, J_c , proporcional a su concentración, c . Para flujo unidimensional vertical, se puede expresar de la siguiente forma:

$$J_c = cq_z = -c \left(K(h) \frac{\partial H}{\partial z} \right), \quad (2.18)$$

donde se reemplaza por q el valor definido para dicha variable en la ley de Buckingham-Darcy. Es importante tener presente que la velocidad del flujo convectivo no es en verdad q_z , la cual representa una velocidad macroscópica promedio, sino que una mejor aproximación sería \bar{v} , que representa una velocidad promedio del agua en los poros a escala microscópica. A esta última se la conoce habitualmente como velocidad aparente promedio y se relaciona con q_z a partir de la siguiente igualdad:

$$\bar{v} = \frac{q_z}{\theta}. \quad (2.19)$$

Sustituyendo dicha igualdad en la ecuación (2.18), se obtiene que el flujo convectivo está definido de la siguiente manera:

$$J_c = c\bar{v}\theta. \quad (2.20)$$

Difusión de solutos

Los procesos de difusión ocurren comúnmente dentro de fases líquidas o gaseosas compuestas por varias sustancias como consecuencia del movimiento término aleatorio (habitualmente denominado movimiento browniano) y de repetidas colisiones y deflexiones de las moléculas en el fluido. Este proceso tiende a equalizar la distribución espacial de los componentes en un fluido no homogéneo.

Estos procesos son sumamente importantes en el suelo. La difusión en la fase gaseosa de los gases que componen la atmósfera del suelo, así como en el vapor de agua, pueden tener una influencia decisiva en la química del suelo y sus procesos biológicos. Siendo igualmente importantes, se deben mencionar los procesos de difusión que involucran solutos en la solución del suelo, incluyendo tanto nutrientes como compuestos tóxicos y sales que afectan no sólo a la vegetación y a la fauna del suelo sino que también traen aparejados riesgos de degradación de dichos ecosistemas por salinización y contaminación.

El flujo difusivo, J_d , es producido por el movimiento de las moléculas de fluido en respuesta a un gradiente de concentración. De acuerdo a dicha fuerza impulsora, las moléculas se tenderán a mover desde zonas de mayor concentración hacia zonas de

menor concentración. La difusión química en agua libre en reposo se describe mediante la primera ley de Fick [26]. A pesar de ello, en el suelo, debido a la reducción del área de sección transversal y a la tortuosidad del medio, los procesos difusivos se ralentizan. Por ello, el coeficiente de difusión de un soluto en agua libre debe ser reducido teniendo en cuenta un factor de tortuosidad, $\Xi(\theta)$, y un factor de área transversal, θ , expresado en su forma fraccional no porcentual. El flujo difusivo queda entonces expresado como [4]:

$$J_d = -D_{d,tot}(\theta) \frac{\partial c}{\partial z}, \quad (2.21)$$

donde $D_{d,tot}$ es el coeficiente de difusión efectivo para medios porosos [L^2T^{-1}], que contempla las modificaciones sobre el coeficiente de difusión en agua libre para un soluto dado a causa de los efectos de la tortuosidad y de la reducción de la sección transversal.

Dispersión hidrodinámica

Detrás de la discusión anterior sobre la difusión hay una suposición implícita de que, siempre que ocurran gradientes de concentración en la fase líquida del suelo, los solutos distribuidos de manera variable se difundirán independientemente de si la propia fase líquida está en movimiento o no. Sin embargo, el movimiento de cualquier solución no homogénea en un cuerpo poroso provoca otro proceso que se diferencia de la difusión en su mecanismo, pero que tiende a producir una tendencia análoga o sinérgica a mezclarse y eventualmente a igualar las diferencias de concentración o composición entre diferentes porciones de solución fluida. Este proceso, que en ocasiones predomina sobre la difusión, se denomina dispersión hidrodinámica. Es un resultado de la falta de uniformidad microscópica de la velocidad del flujo en los poros conductores del suelo [26]. Debido a ello, se puede decir que tres procesos contribuyen a este tipo de dispersión: el tamaño de poros que se encuentra asociado con la distribución de tamaño de partículas del suelo; la tortuosidad, que implica que las líneas de flujo puedan tener diferentes longitudes entre dos puntos dados; y, la fricción con las superficies de los poros, lo cual impacta en la distribución de velocidad dentro de cada canal intersticial [4, 21]. Esto se encuentra representado en la figura 2.6.

Dado que el efecto de la dispersión hidrodinámica es el de mezcla del soluto, en forma similar al proceso de difusión, matemáticamente el flujo dispersivo se puede representar mediante una expresión similar a la primera ley de Fick como sigue [21]

$$J_h = -D_{h,tot}(\bar{v}) \frac{\partial c}{\partial z}, \quad (2.22)$$

siendo $D_{h,tot}$ el coeficiente de dispersión hidrodinámica [L^2T^{-1}], relacionado a la velo-

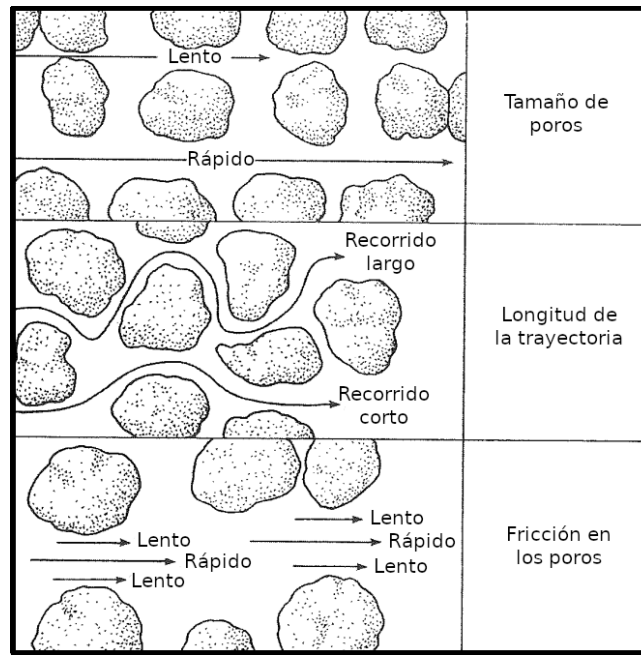


Figura 2.6: Fuentes de dispersión hidrodinámica. **Fuente:** Adaptación de [4].

cidad, \bar{v} , y al contenido de agua, θ , de la siguiente forma

$$D_{h,tot} = D_L \theta \bar{v}. \quad (2.23)$$

El término D_L de la ecuación (2.23) es la dispersividad del medio $[L]$, cuyo valor depende en gran medida de la escala del problema.

2.4.2. Ecuación de transporte de solutos combinada

La concentración de un compuesto en solución puede predecirse resolviendo una ecuación de conservación que expresa matemáticamente el principio de conservación de la masa de dicho compuesto. Si bien los compuestos pueden existir en las tres fases del suelo, el desarrollo de la ecuación de conservación o ecuación de transporte que se realiza a continuación asume que los compuestos se hallan disueltos en la fase líquida, sin considerar las fases sólida y gaseosa.

En un medio granular o de porosidad simple, el transporte de solutos es gobernado por la ecuación de advección-dispersión. La derivación de esta ecuación es análoga a la derivación de la ecuación de flujo. Para simplificar el análisis y por su interés para este PFI, se considera sólo la dirección vertical, siendo z positivo hacia arriba. Se asume además que la concentración total de soluto corresponde a la fase disuelta no considerando la fase adsorbida [21].

La ecuación de conservación unidimensional en dirección vertical para un soluto

disuelto se expresa como:

$$\frac{\partial(c\theta)}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial z} + S, \quad (2.24)$$

donde S representa a fuentes y sumideros que pueden encontrarse en el suelo [$\text{ML}^{-3}\text{T}^{-1}$].

Ahora bien, para tener en cuenta los tres mecanismos presentados anteriormente, se combinan las ecuaciones (2.20), (2.21) y (2.22) como sigue

$$J = \bar{v}\theta c - D_{d,tot}(\theta)\frac{\partial c}{\partial z} - D_{h,tot}(\bar{v})\frac{\partial c}{\partial z}. \quad (2.25)$$

2.5. Métodos numéricos e implementación

2.5.1. El código Hydrus-1D

El programa HYDRUS-1D es un entorno de modelado de dominio público, disponible, junto con su documentación, a través del USDA [34]. Este programa resuelve numéricamente la ecuación de Richards para flujo de agua y las ecuaciones de dispersión por advección basadas en la ley de Fick para el transporte de solutos [35].

Además de la posibilidad de resolver las ecuaciones planteadas, incluyendo distintos modelos de porosidad, permeabilidad, curvas de retención y conductividad hidráulica, el código también incluye la implementación de los siguientes procesos:

- Término de remoción de agua por raíces y modelos logísticos de crecimiento.
- Transferencia de calor y evolución de la temperatura.
- Transporte de solutos en fase líquida y difusión en la fase gaseosa.
- Reacciones químicas de orden cero y hasta dos reacciones de degradación (o decaimiento) de primer orden acopladas.
- Distintos tipos de condiciones de borde, constantes (Dirchlet para concentración y Neumman para flujos) o con dependencia temporal prescrita. El forzado atmosférico entra en esta última categoría y es utilizado en este trabajo.

Las ecuaciones de flujo y transporte se resuelven numéricamente usando esquemas de elementos finitos lineales tipo Galerkin. La integración en el tiempo se logra utilizando un esquema de diferencias finitas implícito (hacia atrás) tanto para condiciones saturadas como no saturadas. Para mejorar la performance en problemas transitorios, se ajusta automáticamente el paso temporal, respetando los límites de estabilidad basados en los números de Courant (para advección) y Peclet (para procesos difusivos). El término de contenido de agua se evalúa utilizando un método que conserva la masa propuesto por Celia et al. [36]. Las posibles opciones para minimizar las oscilaciones numéricas en las soluciones de transporte incluyen el *upwind* y difusividad artificial.

2.5.2. Implementación en R

Si bien el programa HYDRUS-1D se presenta y opera actualmente a través de una interfaz gráfica para Windows, el código original está escrito en Fortran77. En el presente PFI, se desarrolló un conjunto de rutinas en lenguaje R, que permiten preparar los datos, correr HYDRUS-1D y acceder a las salidas, sin necesidad de recurrir a la interfaz gráfica. Esto no sólo le da mayor portabilidad al código (pudiendo ejecutarse en plataformas de software libre, como Linux), sino que fundamentalmente permite elaborar estudios paramétricos programando una o varias series de corridas, en lugar de tener que hacer una corrida a la vez interactuando con un sistema de ventanas. El código desarrollado para tal fin fue estructurado en diversas rutinas (o *scripts*), que se pueden agrupar en tres categorías principales: rutina principal, definición del problema y preparación de datos y post-procesamiento. A continuación, se describe brevemente las funciones de cada una de ellas.

Rutina principal

Esta primer categoría está conformada por un único archivo, *hfv13_problema.R*, donde "problema" se utiliza como identificador de la familia de corridas preparadas por la rutina. En este archivo se centraliza: la configuración de la simulación que se desea correr junto con la creación de los directorios necesarios; la ejecución de las rutinas de preparación de datos que generarán los archivos de datos de entrada necesarios para la corrida; la ejecución (simple o múltiple) del código HYDRUS-1D en el sistema, que corre por fuera del núcleo activo de R; y, finalmente, la ejecución de las rutinas de post-procesamiento para lectura de los archivos de salida, procesado de la información, y guardado de las variables de interés.

Definición del problema y preparación de datos

Dentro de esta categoría, se encuentran los scripts que se utilizan para elaborar los archivos de datos de entrada necesarios para correr el código HYDRUS-1D. En concreto, el código HYDRUS-1D requiere de cuatro archivos de datos de entrada, los cuales son:

- **DESCRIPT.TXT:** este archivo contiene una breve descripción de la simulación indicando los cambios significativos realizados y la versión del código HYDRUS-1D que se está utilizando.
- **SELECTOR.IN:** este archivo contiene la configuración principal del modelo a utilizar (ej.: ecuaciones, parámetros hidráulicos y composición del dominio, término fuente, coeficientes de difusión, condiciones de contorno, etc.). Dependiendo de la configuración elegida, se deben agregar bloques adicionales con in-

formación específica. Para el desarrollo de este PFI, resultan de importancia los bloques que proporcionan la información básica (bloque A), acerca del flujo de agua en el perfil (bloque B), la discretización temporal para la simulación (bloque C), el transporte de solutos (bloque F). También preparamos y probamos el bloque G, para agregar el consumo de agua por parte de las plantas; sin embargo, al no disponer de información precisa para completar este bloque, se decidió no utilizarlo para no agregar incertidumbre en este estudio inicial.

- **PROFILE.DAT:** este archivo contiene la información asociada a la discretización espacial del perfil, incluyendo los espesores correspondientes a cada horizonte y las subregiones de cálculo para los balances de masa, y la condición inicial establecida para el mismo. Además, en este archivo se especifica información necesaria para el transporte de solutos como es el número de solutos a considerar, su concentración a lo largo del perfil y la temperatura del perfil al inicio de la simulación. Finalmente, se especifican el total de nodos de observación y los números nodales correspondientes.
- **ATMOSP.H.** este archivo sólo debe proporcionarse cuando se selecciona la condición de contorno superior de forzado atmosférico del sitio. Para los casos de interés en este PFI, se especificaron las precipitaciones, la evaporación potencial, el valor absoluto del potencial de presión mínimo permitido en la superficie del suelo (h_{CritA}), el flujo a través de la superficie inferior, así como también la concentración para cada soluto en la superficie del suelo y en la parte inferior del perfil (estos últimos iguales a cero), entre otros parámetros que dependen de lo especificado en el archivo **SELECTOR.IN** para las condiciones de contorno.

Cada uno de estos archivos es generado, en el formato adecuado, por uno o varios scripts, según se describe a continuación:

- ***input_descript.R:*** genera en primer lugar el directorio de trabajo con el cual se guardarán tanto los archivos de datos de entrada como los resultados generados por el HYDRUS-1D. Sumado a ello, este script genera el archivo **DESCRIPT.TXT** y escribe la dirección del directorio de trabajo que será utilizado por el HYDRUS-1D.
- ***set_soilprop.R:*** genera un dataframe (estructura de datos estándar de R) en el cual se guardan los parámetros hidráulicos del suelo obtenidos en el caso de este PFI a partir del código Rosetta con el formato apropiado para ser interpretado por el HYDRUS-1D.
- ***input_selector.R:*** genera el archivo **SELECTOR.IN**. Aquí se configuran los cinco bloques de información propios del archivo de datos de entrada **SELEC-**

TOR.IN: información básica de la simulación (A), información referida al flujo de agua incluyendo los parámetros hidráulicos de los suelos (B), la discretización temporal junto con los tiempos en los que se imprimen la condición de las variables para todo el perfil (C), la configuración para el transporte de solutos (F). Dado que se especifican los parámetros hidráulicos de los distintos horizontes del suelo, en este se utiliza el dataframe generado con el script anterior.

- ***set_profile.R***: prepara el dataframe con las condiciones iniciales, la distribución de horizontes ("Materials" y "Layers") y otros parámetros según utilización (temperatura, crecimiento de raíces, etc.).
- ***input_profile.R***: genera el archivo PROFILE.DAT a partir del dataframe generado por el script anterior.
- ***set_atmosph.R***: inicializa el dataframe con la secuencia temporal de precipitaciones, evaporación y transpiración potencial, hCritA y algunos otros parámetros. La primera parte de esta rutina depende mucho de la fuente de información y métodos empleados para determinar estos parámetros atmosféricos. En la presente implementación se utilizaron dos rutinas de pre-procesamiento (*ET_pot_data_2.R* y *atlas_clima.R*) para adecuar los datos de las estaciones meteorológicas y de las capas ráster del Atlas Climático de Argentina.
- ***input_atmosph.R***: genera el archivo ATMOSP.H a partir del dataframe generado por el script anterior.

Como puede verse la lógica que se repite es primero generar una estructura de datos con la información requerida primero (scripts comenzados por "set") y escribir los archivos de entrada para HYDRUS-1D después (scripts comenzados por "input"). Esto permite generar rápidamente los datos y manipular fácilmente parte de ellos (propiedades del suelo, nivel de precipitación, condición inicial, etc.) una o muchas veces durante la ejecución del script principal.

Post-procesamiento

Esta última categoría se encuentra conformada por el script: ***post_data.R***. Éste, contiene diferentes instrucciones utilizadas para la lectura y manipulación de los datos generados por HYDRUS-1D, y su conversión a objetos de R. Posteriormente, con estos objetos se procede a realizar los gráficos pertinentes.

Capítulo 3

Simulación del movimiento de agua en mallines patagónicos

En este capítulo, se estudian distintos regímenes de flujo de agua y transporte de solutos en un mallín cercano a la ciudad de San Carlos de Bariloche. Primero, se describe el sitio del estudio y la caracterización de los suelos hecha en el campo. Las muestras tomadas fueron analizadas en el laboratorio, y las texturas determinadas fueron introducidas en el código Rosetta para estimar las propiedades hidráulicas. Con esas propiedades y el forzado atmosférico (precipitación y evapotranspiración potencial) obtenido de los mapas digitales elaborados por Cravero et al. [8], se analizaron distintos regímenes de flujo periódico, que se utilizaron para calibrar los parámetros más sensibles del modelo. También se estudió la evolución transitoria basada en los registros de precipitación diaria del aeropuerto Tte. Luis Candelaria durante el período 1990-2014. Por último se simuló el transporte de solutos para distintos regímenes hídricos. Partiendo de un perfil uniforme de concentración se analizó la redistribución producida por los procesos de advección, difusión y dispersión hidrodinámica.

3.1. Humedales y mallines

Según el Convenio de Ramsar, los humedales son definidos como aquellas zonas de la superficie terrestre, generalmente planas a plano-cóncavas, cuyo relieve circundante es más elevado y cuya superficie está temporal o permanentemente inundada, reguladas por factores climáticos y en constante interrelación con los seres vivos que la habitan [37]. Por ello, se puede decir que este término refiere a aquellos ecosistemas que son de transición entre los terrestres y los acuáticos, considerándose los como ecotonos [1].

Actualmente, el Ministerio Nacional de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el marco del Inventario Nacional de Humedales [38] define a los humedales como aquellos ambientes en los cuales la presencia temporaria o permanente de agua superficial o sub-

superficial causa flujos biogeoquímicos propios y diferentes a los ambientes terrestres y acuáticos. Estos ambientes además presentan rasgos distintivos como es la presencia de biota adaptada a estas condiciones, comúnmente plantas hidrófitas, y/o suelos hídricos o sustratos con rasgos de hidromorfismo.

Por ello, es importante notar que, si bien hay muchos tipos de humedales, todos ellos comparten una característica en común que es de relevancia para este PFI. Los suelos hídricos, o bien hidromórficos, se encuentran bajo condiciones de saturación, inundación o encharcamiento en zonas cercanas a la superficie por períodos de tiempo lo suficientemente prolongados durante la temporada de crecimiento como para desarrollar condiciones anaeróbicas en su parte superior [5]. Debido a esto, el régimen hídrico de los humedales constituye un aspecto central de su estudio, dado que es en gran medida la prevalencia de condiciones anaeróbicas que determinan el tipo de plantas, animales y suelos que se encuentran en dichas áreas.

3.1.1. Importancia de los humedales

A nivel global, se calcula que los humedales cubren aproximadamente 12,1 millones de km². Sin embargo, la Perspectiva Mundial sobre los Humedales [37] estima que su extensión ha disminuido rápidamente, con pérdidas del 35 % desde 1970. Esta pérdida o degradación de los humedales tiene impactos negativos en la naturaleza y las personas. A continuación, se mencionan algunos de los servicios ecosistémicos brindados por los humedales [1]:

- **Biodiversidad:** los humedales son hábitats de suma relevancia para un gran número de especies que dependen completamente de estos ambientes para la vida, siendo habitual que los humedales tengan asociadas especies endémicas. Cerca del 40 % de las especies en peligro de extinción o amenazadas y un tercio de todas las especies de aves dependen de los humedales en alguna forma.
- **Filtración de agua:** el agua es filtrada y purificada a medida que pasa por el suelo de los humedales en su camino desde la superficie terrestre hacia ríos, bahías, lagos, estuarios y acuíferos. Los humedales actúan como filtros naturales de la mayoría de los sedimentos, remueven altas proporciones de nutrientes por las plantas y los microorganismos (especialmente nitrógeno y fósforo) que de otra forma ocasionarían eutrofización de los sistemas acuáticos, y, degrada sustancias orgánicas que podrían ocasionar efectos tóxicos o agotar los suministros de O_2 en sistemas acuáticos y agua potable.
- **Valor cultural:** muchos humedales poseen un valor cultural tanto para los pueblos originarios como para la población rural dado que proveen de agua y pasturas para el ganado.

- **Control de inundaciones y crecidas:** los humedales actúan como grandes reservorios de precipitaciones y escorrentía, liberando el agua captada lentamente ya sea para flujo superficial o como agua subterránea. De esta forma, se evitan los caudales altos que provocan inundaciones y daños a las viviendas y las tierras urbanizadas aledañas a ríos. Los estudios han demostrado que las inundaciones son mucho menos graves y menos frecuentes donde se ha permitido que los sistemas fluviales mantengan intactos sus humedales asociados.
- **Actividades recreativas y educativas:** son sitios de recreación y turismo dada su belleza paisajística y la diversidad de vida animal y vegetal, lo cual permite que se generen ingresos a las economías regionales y propician el desarrollo de actividades de educación ambiental.

Las principales presiones sobre los humedales identificadas se relacionan con: cambios en el uso del suelo debido a procesos de urbanización, deforestación, entre otros, que llevan al relleno de los mismos; alteraciones en la dinámica del agua ya sea por extracción, intercepción, drenaje, entre otros; extracciones asociadas a la pesca, la obtención de madera y pasturas para el ganado; contaminación agrícola, industrial y doméstica; introducción de especies exóticas invasoras; y, el cambio climático. Actualmente, en Argentina, se trabaja en la aprobación de la Ley de Humedales [39].

3.1.2. Balance hidrológico

La ecuación (3.1) describe el balance hídrico en humedales contemplando su interacción con el resto del paisaje en el cual se encuentra inmerso (ver Fig. 3.1),

$$P + H_o + Gwd = Gwr + S_o + ET + \Delta S, \quad (3.1)$$

es decir, la suma de la *precipitación* (P), la *escorrentía* (H_o) y la *descarga de agua subterránea* (Gwd) es igual en magnitud a la suma de la *evapotranspiración* (ET), el *flujo de agua superficial saliente* (S_o), la *recarga de agua subterránea* (Gwr), y, el *cambio en el almacenamiento de aguas superficiales y subterráneas* (ΔS).

El proceso de *transpiración*, por medio del cual las plantas absorben agua y luego evaporan parte de ella a través de sus estomas, y el proceso de *evaporación*, por el cual el agua se evapora directamente del suelo o la superficie de las plantas directamente, se combinan bajo el término denominado evapotranspiración, ET .

Las variaciones a corto plazo en el balance hidrológico de un humedal producen fluctuaciones en el nivel freático. Estas variaciones determinan el *hidroperíodo* del humedal. Si las entradas exceden a las salidas de dicho sistema natural (en la época de lluvias por ejemplo), el equilibrio establecido en la ecuación (3.1) se mantiene mediante un aumento en el almacenamiento caracterizado por un aumento del nivel freático

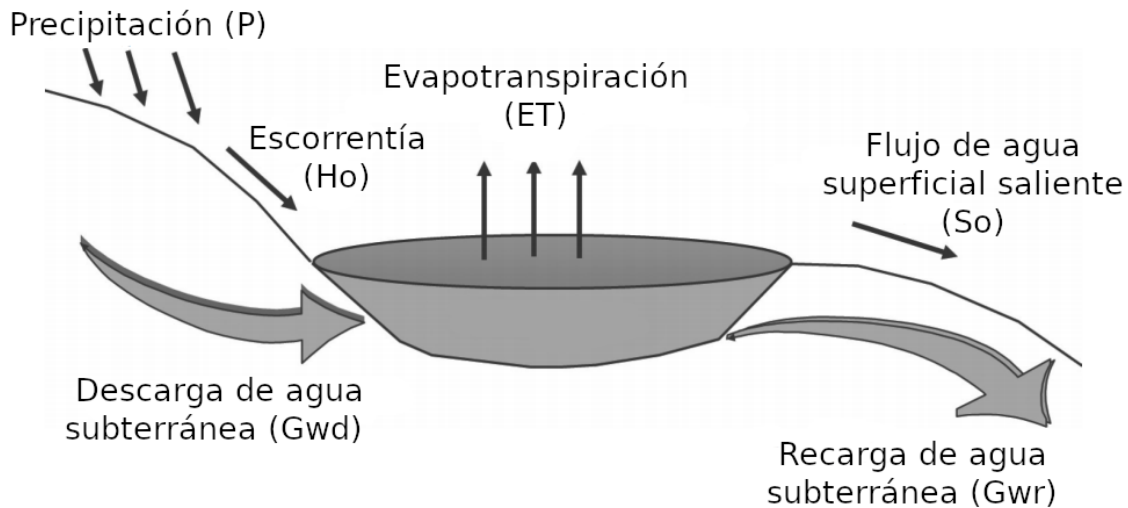


Figura 3.1: Balance hidrológico que permite analizar el movimiento del agua en el ambiente en cual se encuentra un humedal. **Fuente:** Adaptación de [5].

y, eventualmente, acumulación de agua en superficie. Por el contrario, si las salidas superan a las entradas (estación seca), el equilibrio se mantiene mediante una disminución en el almacenamiento y, por consiguiente, se espera que los niveles de agua en el humedal disminuyan [5].

3.1.3. Mallines patagónicos

El término mallín proviene de la lengua mapuche siendo su significado: tierra pantanosa, bañado o estero. Estos ecosistemas son considerados como un tipo específico de humedales con vegetación azonal que forman praderas higrófilas de ciperáceas, juncáceas y gramíneas [40]. Por lo que, de acuerdo con lo descrito en secciones anteriores, se constituyen como formaciones netamente diferenciadas de las áreas circundantes por su tipo de suelo hidromórfico con alto contenido de MOS, emplazadas dentro de las cuencas en zonas de alto contenido hídrico y desarrollándose sobre ellos flora característica de dichos ambientes.

En la Patagonia Argentina, estos ecosistemas se localizan a lo largo de todo el gradiente ambiental Oeste-Este desde la cordillera de los Andes (2000 mm de precipitación anual) hasta la zona de estepa (300 mm de precipitación anual). Dichos ecosistemas, que abarcan aproximadamente el 5% de la superficie de la Patagonia [41], son ambientes típicos de alta productividad de especies palatables para el ganado vacuno y ovino; razón por la cual son de alto interés económico en la región [40].

Clasificaciones de los mallines patagónicos

Según Luque [42], los mallines patagónicos pueden clasificarse de acuerdo a su forma en:

- **Compactos:** son aquellos que rodean típicamente a una vertiente.
- **Alargados:** se encuentran asociados a cursos de agua, siguiendo su forma en el terreno.
- **Ramificados o dendríticos:** similar al anterior, pero asociados a un cauce con afluentes.

En lo que respecta a su forma de abastecimiento de agua, se pueden clasificar en[42]:

- mallines alimentados por aguas superficiales, ya sean lagunas, ríos o arroyos;
- aquellos abastecidos por aguas del subalveo que afloran en distintos puntos generando una falsa capa freática que se mantiene gran parte del año; o bien,
- por vertientes o manantiales, es decir, aguas subterráneas que afloran en esos puntos. Generalmente, estos se dan en menor medida en la región; pero, mantienen en forma más permanente el flujo de agua de alimentación debido al deshielo nival.

Finalmente, la última clasificación que será de relevancia para este PFI es aquella en función del período de saturación[42]. De acuerdo a este criterio, los mallines se clasifican en:

- **Mallines de período extendido:** ubicados en latitudes y altitudes bajas que pueden manifestarse activos por un período de 5 meses, habitualmente de octubre a febrero. Se encuentran principalmente en las provincias de Neuquén y Río Negro y en partes bajas de la provincia de Santa Cruz.
- **Mallines de período corto:** asociados a latitudes mayores hacia el sur de la región. Su período activo es de tres meses, durante el período de noviembre a enero. La mayoría de estos mallines se encuentran ubicados en las provincias de Santa Cruz y Chubut.

Vegetación característica

El principal factor que determina la composición y la estructura de los ensambles de hidrófitas es el hidroperíodo. Sin embargo, estos ensambles también se ven influenciados por la posición en el paisaje, el sustrato, las concentraciones de nutrientes, el clima, el estrés ambiental y el disturbio, así como por una variedad de interacciones bióticas como competencia, facilitación y herbivoría [43].

La mayoría de los mallines estudiados hasta el momento tienen un hidroperíodo permanente o semipermanente [6, 44]; por lo que, la biota está adaptada para tolerar

tanto el anegamiento como la alternancia con períodos de sequía. La capa freática se relaciona íntimamente con la vegetación, siendo esta relación determinante en la variación florística espacial del mallín [44]. En lo que respecta a la vegetación de los mallines patagónicos, se diferencian dos zonas de acuerdo a la proximidad de la capa freática a la superficie [6]:

1. **Zona central o mallín húmedo:** el nivel freático en dicha zona se encuentra por encima de la superficie del suelo en forma temporaria o permanente, siendo habitual que la napa se encuentre próxima a la superficie durante una gran parte del año. Los suelos de esta zona se caracterizan por pertenecer a clases texturales en las que predominan las granulometrías muy finas y por ser de color muy oscuro o negro ya que poseen muy alto contenido de MOS. Debido a esto último, se constituyen como suelos muy fértiles en los cuales la vegetación se encuentra dominada por especies vegetales hidrófitas, como juncáceas (*Juncus balticus*) y ciperáceas (*Carex sp.*).
2. **Zona periférica o mallín mésico:** esta región del mallín se encuentra ubicada en una posición relativa más elevada en el relieve, en la cual la capa freática está por debajo de la superficie del suelo la mayor parte del año. Particularmente, el nivel freático en esta zona suele estar en los primeros 50 cm del perfil del suelo durante la temporada invernal; pero, baja rápidamente durante la primavera. En esta región, las clases texturales del suelo esperables son aquellas en las que predominan materiales finos (limos y arcillas) sin pedregosidad a lo largo del perfil. En esta zona, se observa la presencia de especies que pertenecen en su mayoría a las familias de las gramíneas y las leguminosas. Cabe destacar particularmente la predominancia del coirón blanco (*Festuca pallescens*) en la zona periférica de mallines de estepa.

Hidrología de mallines

Los mallines pueden encontrarse constituyendo pequeños ecosistemas en áreas muy localizadas del paisaje y relativamente aisladas, o bien, conformando un sistema de humedales asociados entre sí. Estos sistemas ocupan las líneas de drenaje en sierras y mesetas o en las planicies de inundación de los grandes valles, cauces fluviales y depresiones, formando pequeños cuerpos de agua superficial como charcas y lagunas someras. En la Patagonia, los mallines se distribuyen bajo una amplia variedad de geoformas: laderas o pendientes, ribera de ríos, arroyos y lagos, o en posiciones topográficas deprimidas o planas, siendo éstos los más conspicuos e importantes. En la cordillera y precordillera, los mallines se destacan sobre ambientes geomorfológicos glacifluviales,

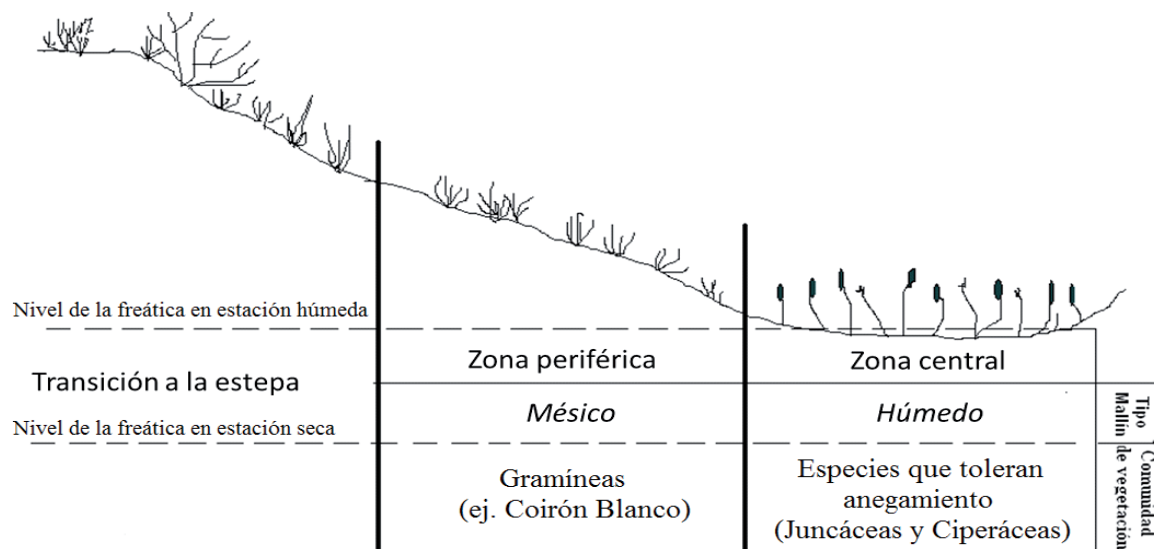


Figura 3.2: Corte transversal de un mallín en el cual se presentan las zonas características de un mallín. **Fuente:** [6].

que conforman valles con perfiles en forma de “U”, o en ambientes glacialacustres, que constituyen amplias planicies y depresiones [43].

La hidrología de los mallines está asociada a zonas de concentración de humedad en el suelo, con un nivel freático alimentado por la precipitación directa más el escurrimiento superficial, subsuperficial y subterráneo proveniente de vastas áreas colindantes, pertenecientes o no a la misma cuenca superficial. En algunos casos, existen mallines que además presentan una conectividad superficial estacional con ríos o lagos en períodos de crecidas [43].

En su formación estratigráfica, los mallines presentan, a profundidad variable, un estrato de baja conductividad hidráulica relativa que actúa funcionalmente como hidroapoyo, sobre el cual se asientan materiales finos y gruesos de diverso origen que conforman un medio saturado, con características propias de un acuífero no confinado. El aporte hídrico, cualquiera sea su origen, se almacena en ese acuífero libre cuyo nivel freático fluctúa estacionalmente en función del balance entre entradas y salidas de agua al mallín, donde su cauce central funciona como condición de borde del acuífero, fijando el nivel freático a lo largo de su recorrido. Cuando el mallín es recargado lateralmente por los bordes externos o por precipitación directa, el cauce central se transforma en el drenaje del mallín; mientras que, durante los períodos de bajante del nivel freático, el cauce puede, al menos en algunos tramos, operar como fuente de recarga del acuífero. La interacción entre las entradas/salidas de agua subterránea, superficial y atmosférica en los humedales, produce fluctuaciones estacionales en el nivel de agua, que posibilitan la alternancia de períodos de sequía-inundación [43].

La principal fuente de variación del suelo de un mallín típico proviene de su interacción con la capa freática, más que de sus características pedogenéticas y morfológicas.

Por consiguiente, el papel de ésta y su fluctuación es determinante en la degradación de los humedales. Debido a ello, un mal manejo de estos ecosistemas que ocasione una disminución en el nivel freático conduciría a su degradación [40].

En la región Patagónica, las precipitaciones se concentran en el otoño-invierno, correspondiéndose con la época en la que la vegetación se encuentra en reposo y, por lo tanto, tiene poca capacidad de utilizar dicha agua. Por esta razón y por la existencia de suelos arenosos en las zonas altas del terreno circundante con poca capacidad de almacenar el agua, sobre un paisaje quebrado, se generan excedentes que escurren superficial y subsuperficialmente a zonas más bajas donde sí existen suelos con capacidad de retenerla, recargando las napas freáticas de los mallines patagónicos. Es por eso que se puede decir que los mallines son el resultado de una interacción del agua con el relieve [6].

Durante la primavera, cuyo inicio en el hemisferio sur se corresponde con el mes de septiembre, las precipitaciones cesan; pero, los mallines conservan por un tiempo más prolongado la humedad hasta que comienza el drenaje hacia zonas topográficamente más bajas. Esto coincide con el período de crecimiento de la vegetación y, por consiguiente, se produce un aumento en el consumo de agua. Debido a esto, los niveles freáticos comienzan a descender hasta alcanzar su mínimo valor en la estación seca del año que se condice con la temporada de verano (ver Fig. 3.3) [6].

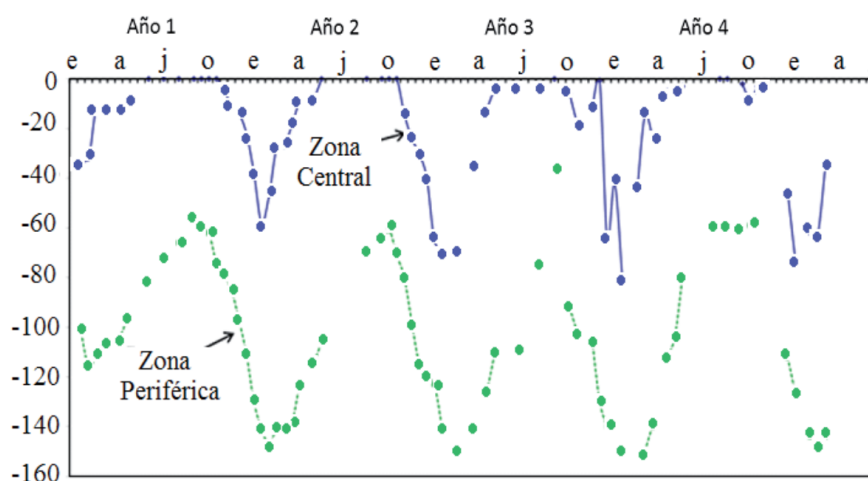


Figura 3.3: Dinámica del nivel freático de las zonas centrales y periféricas de un mallín durante un período de 4 años. **Fuente:** [6].

Esta dinámica del nivel freático es muy variable de acuerdo a las precipitaciones, la dimensión y conformación de la cuenca de aporte de agua al mallín, y el estado de conservación del pastizal, pero en todos los casos permiten a estos ambientes disponer de buena cantidad de agua en el verano y sostener, en la época de temperaturas favorables para el desarrollo de la vegetación, una productividad vegetal mucho más elevada que la de la estepa circundante [6].

Estudios realizados por Chimner et al. [7] arrojaron que la hidrología, la química del agua y la vegetación varían a lo largo del gradiente de precipitaciones Oeste-Este que se observa en la Patagonia argentina. Sus resultados constataron que los sitios de la región occidental que reciben una cantidad significativamente mayor de precipitación se caracterizan por un nivel freático más alto y constante (ver Fig. 3.4).

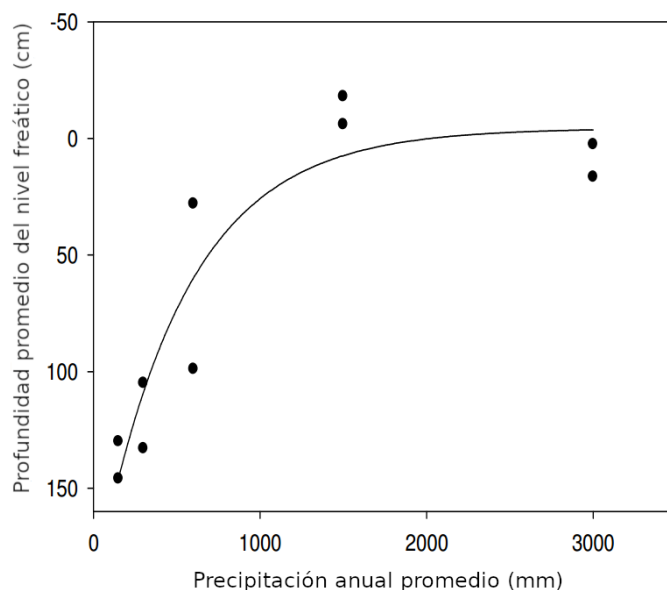


Figura 3.4: Relación entre la precipitación media anual y la profundidad del nivel freático promedio. **Fuente:** Adaptación de [7].

Más aún, según López et al. [45], este gradiente no sólo genera mallines con cuerpos de agua de menor profundidad, sino que plantea que está relacionado además con la acumulación de sales ocasionada por los aportes del lavado de rocas sedimentarias de la cuenca. Esto último en conjunción con la escasez de agua para su drenaje provoca la permanencia de éstas sales a lo largo del perfil del suelo [46]. Estas características se ven reflejadas en las variables fisicoquímicas del agua, derivando en cambios significativos en la estructura de las comunidades vegetales [7, 47].

Por todo lo anteriormente expuesto, es posible afirmar que los procesos químicos y (micro) biológicos determinantes del estado y calidad ambiental de un mallín están fuertemente influenciados por el contenido de agua en la región no saturada del suelo y la profundidad de la capa freática. En particular, la dinámica hidrológica está gobernada por: la precipitación, la infiltración, la escorrentía, la evapotranspiración, entre otros, siendo los valores de estos componentes del ciclo hidrológico muy variables. Esto imposibilita efectuar un seguimiento preciso de dicho sistema dinámico con un número limitado de observaciones a campo. Es por ello que la utilización de modelos que permita caracterizar el régimen hídrico de la región no saturada del suelo de los mallines se vuelve relevante.

3.2. Definición del problema

3.2.1. Ubicación geográfica y clima

El mallín seleccionado para este estudio se encuentra ubicado en la Estancia Perito Moreno ($41^{\circ}02'S - 71^{\circ}04'W$), a aproximadamente 40 km de la ciudad de San Carlos de Bariloche sobre la Ruta Nacional N°23, 20 km antes del acceso a la localidad de Pilcaniyeu. En la Fig. 3.5, se presenta la ubicación del mallín en el mapa de isoyetas elaborado para valores de precipitación media anual. En particular, el sitio de estudio presenta un régimen de precipitación de 470 mm anuales, siendo la evapotranspiración potencial de 580 mm.

El mapa anteriormente mencionado fue elaborado a partir de las capas ráster mensuales proporcionadas por Cravero et al. [8] en su atlas climático digital. Estas capas fueron generadas a partir de una base de datos amplia y heterogénea, aunque el número más importante de datos se obtuvo para el período de 1921-1950, proporcionado por el Servicio Meteorológico Nacional. Además, los autores consultaron las Estadísticas Climáticas publicadas por el SMN, aquella correspondiente a la década de 1991-2000 e información en formato digital proporcionada por el Banco de Datos Hidrológicos de la Secretaría de Recursos Hídricos de la Nación.

La Fig. 3.6 presenta los sitios seleccionados para la toma de muestras y análisis de los perfiles de suelo, siendo el S1 correspondiente a la zona central del mallín y el S2 a la periferia del mismo. A partir de la descarga del modelo digital del terreno provisto por la Misión Topográfica Shuttle Radar (*SRTM*, por sus siglas en inglés), se elaboró el mapa topográfico presentado en la Fig. 3.6 (b). De su análisis, se tiene que ambos sitios de muestreo se encuentran ubicados entre las cotas 990 – 1000 msnm, siendo una zona de pendientes suaves.

Esta topografía en conjunción con el clima semiárido de la zona dan como resultado un paisaje dominado por captaciones cerradas y drenaje superficial prácticamente inexistente. Si bien el mallín presenta intervenciones antrópicas, estas consisten principalmente en canalizaciones que respetan bastante bien las curvas de nivel del terreno que no alteran significativamente los flujos laterales. En base a estas consideraciones, simplificamos el análisis suponiendo que el flujo neto de recarga y descarga de aguas superficiales y subsuperficiales es mucho menor que los flujos asociados a precipitación y evapotranspiración. Esto significa simplificar el balance (3.2) a:

$$\Delta S = P - ET + \underbrace{(H_o - S_o + Gwd - Gwr)}_{\approx 0} \approx P - ET. \quad (3.2)$$

Esta aproximación no quiere decir que no existan flujos laterales, sino que el presente análisis se restringe a mallines en los que la acumulación de agua está dominada por el

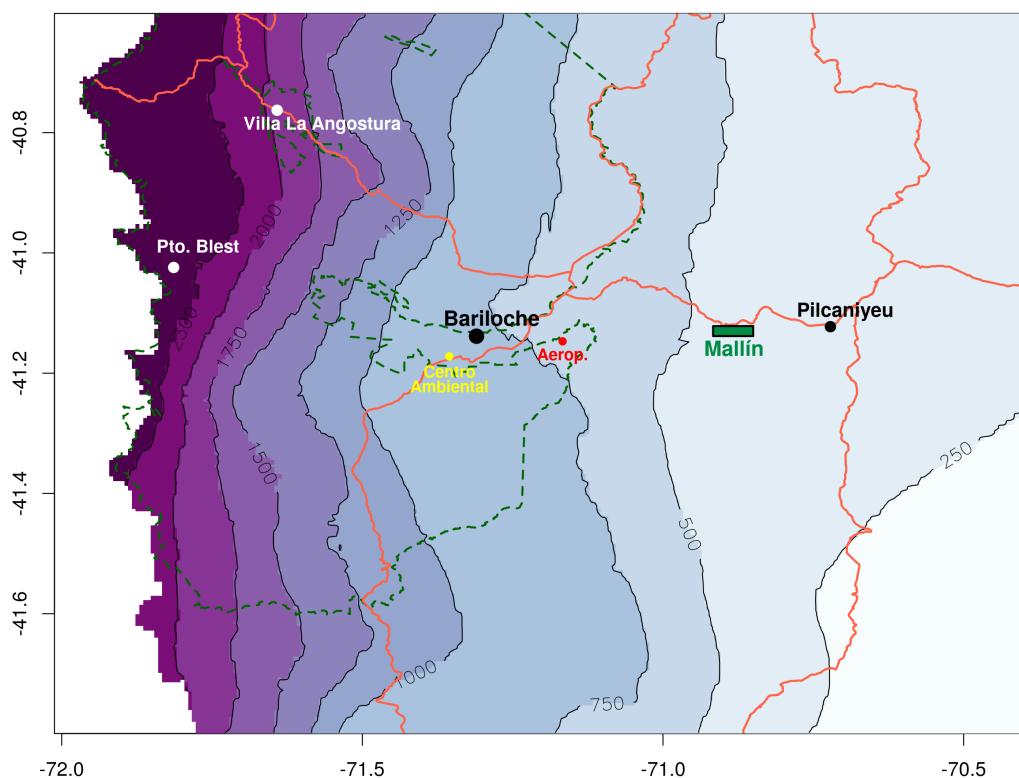


Figura 3.5: Mapa de isoyetas de la región y ubicación del mallín bajo estudio. Se presenta también la red de rutas nacionales (naranja) y el límite del Parque Nacional Nahuel Huapi (línea de trazos verde). Los colores y contornos indican el régimen de precipitación media anual calculado a partir de las capas ráster mensuales de Cravero et al. [8]. **Fuente:** Elaboración propia.

régimen de precipitación. Notar que la Fig. 3.4 [7] muestra que nivel freático medio, uno de los principales indicadores del contenido de agua, correlaciona en forma monótona con el nivel de precipitación para cinco mallines estudiados en la región patagónica.

En cuanto al forzado atmosférico, en la Fig. 3.7 (a) y (b), se observan los patrones de precipitación para enero y junio, respectivamente, en la región. Para obtener el régimen de precipitación y ET potencial en cualquier punto del país, se elaboró un código en R que busca automáticamente estos datos en las 24 capas ráster de Cravero et al. [8], a partir de las coordenadas espaciales del punto de interés. De esta forma, se obtuvo la evolución mensual que se presenta en la Fig. 3.7 (c) empleando las coordenadas del sitio de muestreo S1 (ver Fig. 3.6), el cual se considera representativo de todo el mallín.

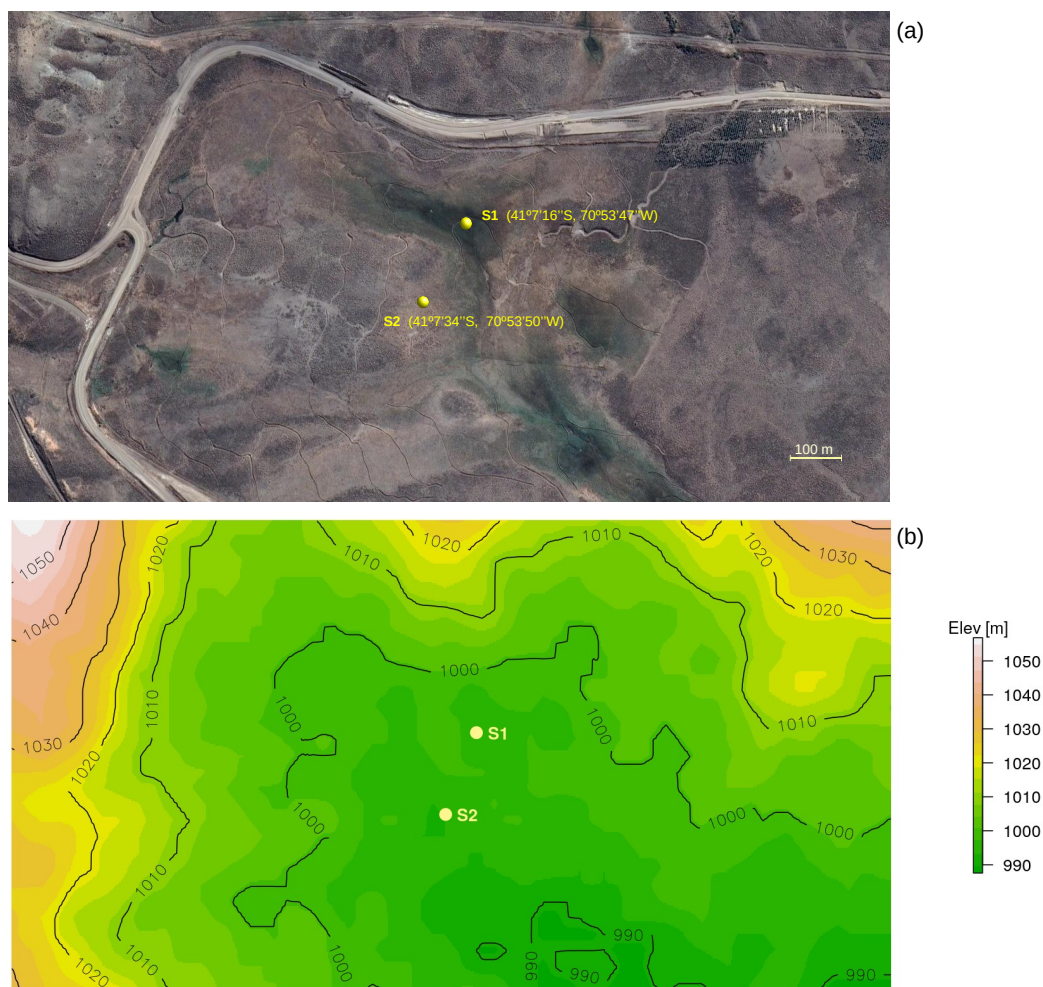


Figura 3.6: (a) Imagen satelital del mallín estudiado, indicando los sitios de muestreo: S1 en el centro del mallín y S2 en la periferia. (b) Topografía del terreno. La elevación fue obtenida del modelo digital de terreno de la Agencia Espacial Europea (capas raster) [9]. **Fuente:** Elaboración propia.

3.2.2. Horizontes de suelo y determinación de las propiedades hidráulicas

Caracterización de los suelos en la salida a campo

Para cada sitio de muestreo, se contó con el análisis del perfil del suelo *in situ* realizado por el Lic. Carlos López junto con la Dra. Graciela Calabrese, identificándose los distintos horizontes presentes en el mismo y detallando las características propias del sitio [48]. A partir de ello, se describen a continuación brevemente los horizontes identificados en cada sitio de muestreo.

Como ya se mencionó previamente, el sitio de muestreo S1 se encuentra ubicado en la zona central del mallín, observándose a campo un anegamiento muy frecuente asociado con un drenaje pobre. A partir del análisis de agua del mallín *in situ*, se determinó que la conductividad eléctrica para el sitio era $< 50 \mu\text{S cm}^{-1}$ y el pH era levemente ácido.

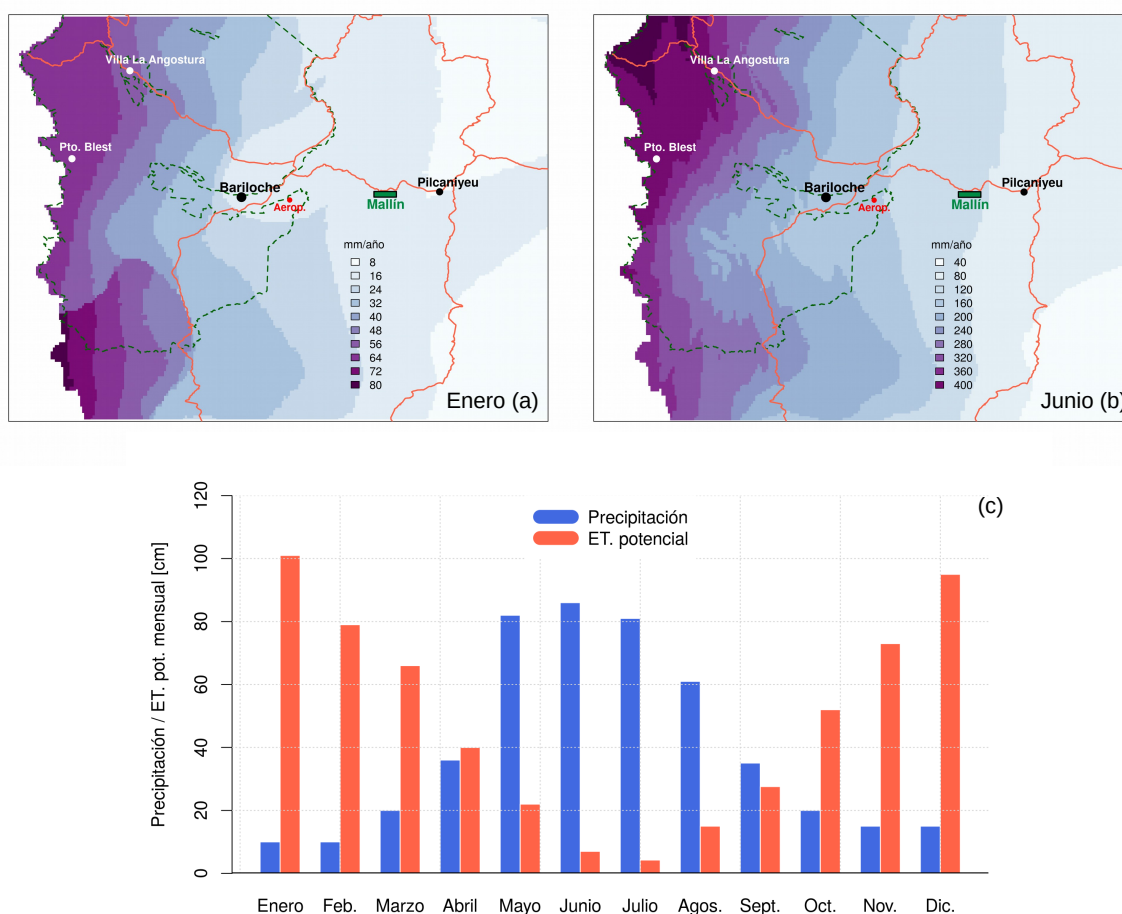


Figura 3.7: Régimen mensual de precipitación y evapotranspiración potencial. Promedios históricos obtenidos de los mapas digitales de Cravero et al. [8] para la posición del mallín indicada en la Fig. 3.6. **Fuente:** Elaboración propia.

Se identificó un hidromorfismo muy alto en este perfil, así como la presencia de raíces y MOS muy abundantes en toda su extensión. Se clasificó al material originario como aluvial, y tanto la permeabilidad como el escurrimiento en el sitio se clasifican como lentas o muy lentas. El suelo se corresponde con un Endoacuístico y la fisionomía de la vegetación en el sitio se definió como pradera higrófila con una cobertura del 100 % [49].

A continuación, se detallan los horizontes identificados a campo para el perfil S1 [48]:

- Horizonte O suprayacente de 10 cm de profundidad, compuesto de material orgánico sin presencia de fragmentos gruesos. Su color puede clasificarse como pardo grisáceo muy oscuro en húmedo (10YR 3/2).
- Horizonte A1 de 0 – 24 cm, de color grisáceo muy oscuro en húmedo (10YR 3/1); textura determinada a campo franca con estructura en bloques débiles con consistencia friable; presencia muy abundante de raíces y MOS; no se observan fragmentos de granulometría gruesos.

- Horizonte 2A2 entre 24–54 cm, siendo clasificado como negro su color en húmedo (10YR 2/1); textura a campo franco-limosa con estructura en bloques débiles con consistencia friable; presencia abundante de raíces y MOS; no se observan fragmentos de granulometría gruesos.
- Horizonte A3 de 54 – 77 cm, de color pardo muy oscuro (10YR 2/2); textura a campo franco-limosa y estructura en bloques débiles con consistencia friable. Se observa la presencia moderada de raíces y MOS, sin fragmentos de granulometría gruesos.
- Horizonte 3AC entre 77 – 112 cm, de color pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); textura a campo franca y estructura suelta; escasa presencia de raíces y MOS.
- Horizonte C de 112 – 140 cm, siendo su color pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2); textura a campo franca y estructura suelta; escasa presencia de MOS.

En cuanto al sitio S2, el mismo se corresponde con la zona periférica del mallín bajo estudio, siendo su anegamiento ocasional y su drenaje moderado. En este caso, la conductividad eléctrica determinada a campo es $< 50 \mu\text{S cm}^{-1}$; mientras que el pH asociado a este punto, es levemente alcalino. El perfil presenta un hidromorfismo leve, con presencia moderada de raíces y provisto de MOS. Al igual que el sitio S1, el material originario es de tipo aluvial y el escurrimiento es muy lento. El perfil de suelo analizado se clasificó como Haploxerol ácuico. La fisonomía de la vegetación es correspondiente a la de pradera gramínea, presentando una cobertura del 80 – 90 % [49].

La descripción de cada uno de los horizontes que conforman al perfil del sitio S2 se listan a continuación [48]:

- Horizonte A1 entre 0 – 26 cm de profundidad, siendo su color clasificado como pardo muy oscuro (10YR 2/2); su textura determinada a campo es franca y su estructura es correspondiente a bloques débiles con consistencia friable; presencia de raíces y de MOS moderada, sin fragmentos de granulometría gruesa observables.
- Horizonte A2 de 26 – 52 cm, de color pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); textura franca determinada a campo y estructura de bloques débiles y consistencia friable; presencia de raíces y MOS moderada, sin fragmentos de granulometría gruesa observables.
- Horizonte AC de 52 – 78 cm, cuyo color correspondiente es pardo oscuro (10YR 3/3); su textura determinada a campo se clasifica como franca con estructura

de bloques débiles y consistencia friable; escasa presencia de raíces y MOS, sin fragmentos de granulometría gruesa presentes.

- Horizonte 2C1 entre 78 – 100 cm, su color se clasifica como pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2); su clase textural determinada a campo es franco-arenosa de consistencia friable; escasa presencia de raíces y MOS, observándose fragmentos de granulometría gruesos clasificados como gravilla.

Análisis de las muestras en el laboratorio

Dado el contexto de aislamiento social por la pandemia por COVID-19, se analizaron en el Laboratorio de Química de la Sede Andina de la UNRN únicamente las muestras disponibles para cada perfil hasta el momento del inicio de la ASPO. Estas muestras de suelo correspondientes a los distintos horizontes del perfil para cada sitio fueron sometidas al método del densímetro para su análisis de tamaño de partícula (*PSA*, por sus siglas en inglés), según lo establecido por la Sociedad Americana de Ciencias del Suelo [50].

El PSA es usualmente empleado en las ciencias del suelo para evaluar la textura del mismo. Sus principales características son la destrucción o la dispersión de los agregados del suelo en unidades discretas mediante medios químicos, mecánicos o ultrasónicos y la separación de las partículas de acuerdo a límites de tamaño ya sea por sedimentación o por tamizado.[50] En este caso, se utilizó la clasificación granulométrica propuesta por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (*USDA*, por sus siglas en inglés) que se presentó en la Fig. 2.1.

En la tabla 3.1, se presentan los resultados obtenidos para los diferentes horizontes de cada sitio de muestreo. A partir de estas determinaciones, se puede observar en la Fig. 3.8 las posiciones relativas para cada horizonte de los sitios S1 y S2 en el diagrama triangular que relaciona clases texturales con porcentajes de arenas, limos y arcillas.

Sitio	Horizonte	Arenas [%]	Limos [%]	Arcillas [%]	Clase textural
S1	A1	25,7	62,3	12,0	Franco-limoso
	2A2	33,6	51,9	14,5	Franco-limoso
	3AC	24,1	53,0	22,9	Franco-limoso
S2	A1	74,5	19,4	6,1	Franco-arenoso
	A2	60,5	34,5	5,0	Franco-arenoso
	AC	66,3	28,7	5,0	Franco-arenoso

Tabla 3.1: Resultados obtenidos a partir del método del densímetro para los diferentes horizontes de los sitios de muestreo S1 y S2 correspondientes a la Ea. Perito Moreno. **Fuente:** Elaboración propia.

Código Rosetta para determinación de las propiedades hidráulicas

A partir de las clases texturales y las composiciones determinadas experimentalmente, se estimaron los parámetros hidráulicos de cada horizonte utilizando el código Rosetta [51]. Este fue desarrollado por el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos (*USSL*, por sus siglas en inglés) con el objetivo de estimar los parámetros hidráulicos en condiciones de no saturación a partir de datos de suelo “sustitutos” fácilmente determinables, tales como: la textura del suelo y su densidad aparente. Este tipo de modelos son usualmente llamados funciones de pedotransferencia (PTF’s, por sus siglas en inglés), dado que traducen información básica del suelo en parámetros hidráulicos (ej.: parámetros de retención de agua en la ecuación de Van Genuchten).

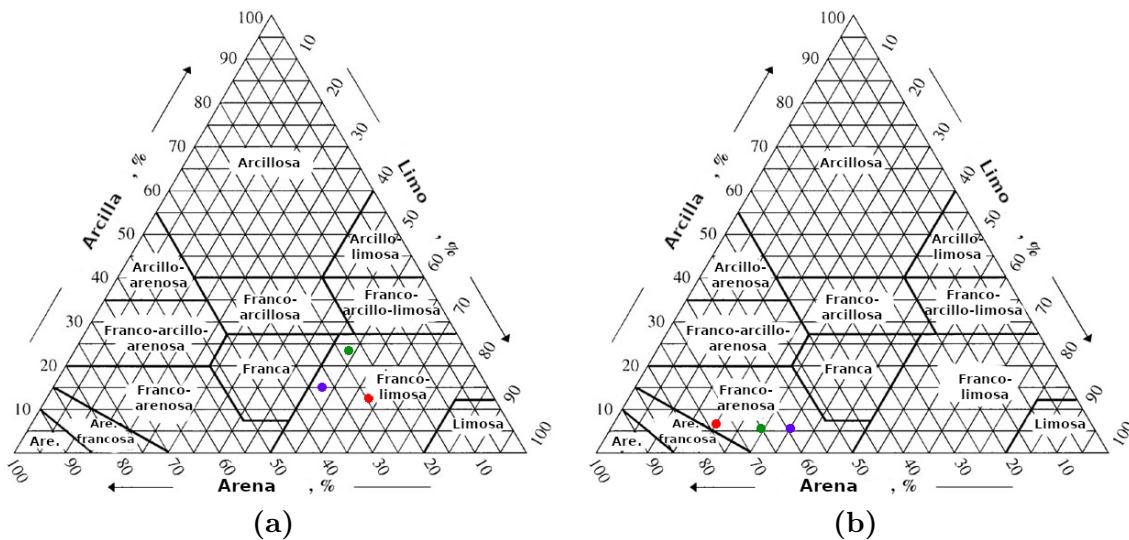


Figura 3.8: Clase textural de los horizontes del suelo para los sitios S1 (a) y S2 (b): horizontes A1 (rojo); A2 (azul); AC (verde). **Fuente:** Elaboración propia, haciendo uso de la herramienta Soil Texture Calculator de la USDA [10].

El código Rosetta ofrece 5 PTF’s que permiten la predicción de los parámetros hidráulicos con conjuntos de datos de entrada progresivamente más complejos. Los cinco modelos jerárquicos incluidos en Rosetta utilizan el siguiente input en orden de complejidad ascendente: (1) clases texturales del suelo; (2) porcentajes de arenas, limos y arcillas; (3) porcentaje de arena, limos y arcillas y densidad aparente; (4) porcentaje de arena, limo y arcilla, densidad aparente y el punto de retención de agua a 33 kPa y, (5) todos los datos del punto anterior en adición a otro punto de retención de agua a 1500 kPa . El primero de estos modelos se basa en la búsqueda en una tabla que provee parámetros hidráulicos promediados para cada clase textural de suelo de las categorías propuestas por la USDA; mientras que, los otros cuatro restantes se basan en un análisis de redes neuronales y proveen predicciones más precisas a medida que se utilizan más variables de datos de entrada.

El modelo jerárquico incluido en Rosetta que se utilizó en el marco de este PFI

fue aquel que utilizaba como input los porcentajes de arenas, limos y arcillas. En la tabla 3.2, se presentan los valores de las propiedades hidráulicas determinadas para cada horizonte de suelo analizado en cada sitio de muestreo.

Sitio	Horizonte	θ_r [cm cm ⁻¹]	θ_s [cm cm ⁻¹]	α_v [cm ⁻¹]	n [-]	K_s [cm d ⁻¹]
S1	A1	0,0543	0,4267	0,0043	1,6990	30,64
	2A2	0,0551	0,4089	0,0055	1,6220	24,47
	3AC	0,0718	0,4305	0,0058	1,5888	13,85
S2	A1	0,0372	0,3877	0,0408	1,5120	66,76
	A2	0,0318	0,3966	0,0260	1,4168	56,64
	AC	0,0322	0,3932	0,0344	1,4218	60,18

Tabla 3.2: Parámetros hidráulicos obtenidos para los horizontes de los sitios S1 y S2 a partir del código Rosetta. **Fuente:** Elaboración propia.

3.2.3. Dominio y condiciones de borde

En la Fig. 3.9, se presenta en forma esquemática los dominios que serán considerados para las simulaciones de movimiento de agua y transporte de solutos. Estos se corresponden con los sitios de muestreo S1 (a) y S2 (b).

En ambos casos, se puede observar que el mismo está subdividido en 3 regiones principales, delimitadas por los espesores propios de cada uno de los horizontes cuyas muestras fueron analizadas en el laboratorio y posteriormente determinados sus parámetros hidráulicos. Los perfiles fueron truncados en los horizontes 3AC y AC, según corresponda, dada la disponibilidad de muestras para su procesamiento.

Cabe aclarar que, en el caso del perfil S1, se encontraba faltante también la muestra correspondiente al horizonte A3 para su análisis en laboratorio. Por lo que, se agrupó junto con la extensión del horizonte 3AC por presentar la misma clasificación textural determinada a campo. De esta forma, se obtiene una representación lo más adecuada posible de los procesos físicos para dicho horizonte.

Los dominios fueron extendidos hasta alcanzar una profundidad total de 2 m, empleando para el sitio S1 las propiedades del horizonte 3AC y para el sitio S2 las del horizonte AC correspondiente.

En lo que respecta a las condiciones de contorno, se definió como condición de contorno inferior para ambos sitios una condición de flujo constante igual a cero (condición de Neumann). Con esta condición de contorno, estamos despreciando el efecto de la percolación respecto al flujo neto de agua a través de la interfaz suelo-atmósfera. En casos en los que se disponga de información detallada que permita una estimación del flujo a través del extremo inferior del dominio, se podría incluir modificando esta condición.

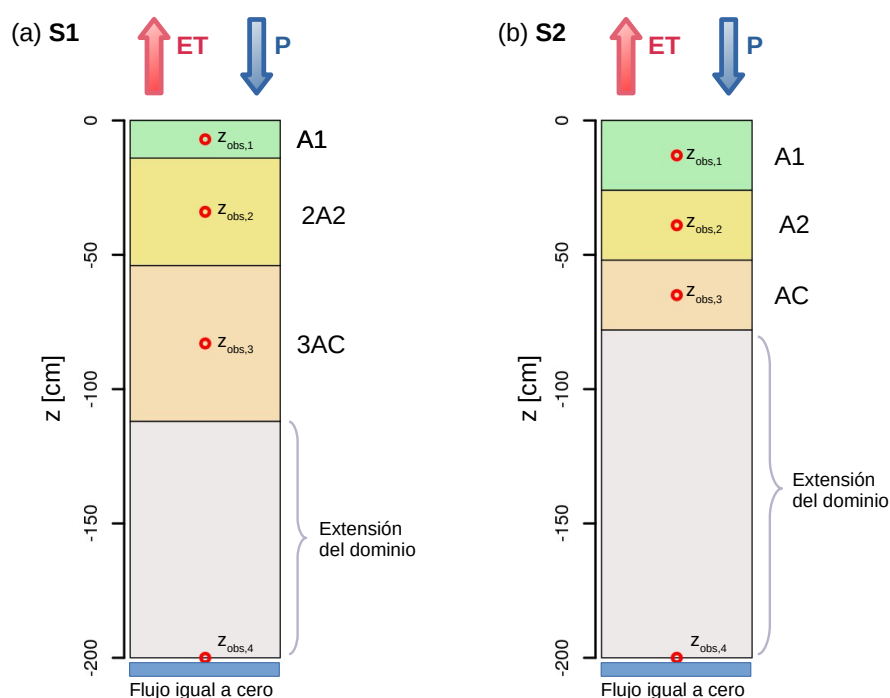


Figura 3.9: Esquema de los dominios y condiciones de contorno utilizados para la simulación en los perfiles de suelo relevados en el centro (a) y la periferia (b) del mallín. **Fuente:** Elaboración propia.

En cuanto a las condiciones de contorno superior para ambos sitios, éstas se definieron como condición de contorno atmosférica con acumulación superficial. Para ello, se especificaron en primer lugar valores diarios de precipitación y evaporación potencial para ambos sitios para el período 1990-2014. Para las precipitaciones se utilizaron dos series temporales, una periódica obtenida del Atlas Climático digital elaborado por Cravero et al. [8] y otra variable obtenida a partir de los datos de la Estación Meteorológica correspondiente al Aeropuerto Internacional Tte. Luis Candelaria, mediante solicitud al Departamento Provincial de Aguas. Estos valores fueron adecuados al sitio de estudio mediante el mapa digital de isohietas [8]. Para la evaporación potencial del sitio se utilizó la serie periódica provista por el Atlas Climático, estimada en base mensual mediante el método de Thornthwaite [8].

Finalmente, se debieron establecer los valores correspondientes a los parámetros h_{CritA} y h_{CritS} en el modelo HYDRUS. El primero de ellos, que corresponde a la mínima presión permitida en la superficie, que se fijó en -15000 cm para todo el período simulado. El segundo parámetro determina a la cantidad de agua que se puede acumular sobre la superficie del suelo y fue variado entre 10 y 50 cm en distintas corridas para evaluar el efecto de la capacidad de acumulación de agua en el sistema. Cuando la columna de agua sobre la superficie supera este umbral es eliminada del sistema, lo cual puede considerarse como un escurrimiento superficial (o subsuperficial) desde el lugar de la simulación hacia los cursos de agua cercanos.

3.2.4. Discretización espacial y temporal

El dominio de 2 m fue discretizado en ambos casos en 500 nodos de cálculo distribuidos homogéneamente a lo largo del perfil. Los puntos rojos en la Fig. 3.9 representan los nodos de observación establecidos para cada perfil. Estos se corresponden con los puntos en el dominio para los cuales se guarda la evolución temporal de todas las variables simuladas. En el caso del sitio S1, los nodos de observación fueron establecidos a 7 cm, 34 cm, 83 cm y 200 cm de la superficie del suelo; mientras que los del sitio S2, se establecieron a 13 cm, 39 cm, 65 y también a 200 cm de la superficie.

En cuanto a la discretización temporal, el paso de tiempo inicial fue establecido en 0.001 d. Posteriormente, el HYDRUS-1D ajusta automáticamente el paso de tiempo de acuerdo a la condición de Courant-Friedrichs-Lewy, dentro de los pasos temporales mínimo y máximo establecidos: 0.0001 d y 0.1 d, respectivamente. En algunos casos fue necesario disminuir el paso de tiempo máximo permitido para asegurar la convergencia de la corrida.

3.2.5. Condición inicial

Dado que no se disponía de información relevada a campo para el potencial de presión a lo largo del perfil, se realizó una primer simulación estableciendo una función lineal para la definición del perfil de potencial de presión. Esta varía de -30 cm en la superficie del perfil hasta 170 cm en la parte inferior del mismo para el sitio S1. Esta primera aproximación se realizó teniendo en cuenta el nivel de la capa freática identificada en las salidas de campo para el sitio para el mes de febrero, correspondiente a 30 cm desde la superficie del suelo. A partir de esta primera simulación para el período de 25 años contemplado, se recuperó el perfil de potencial de presión generado por el HYDRUS-1D para el día 1 de enero de 2014 y se lo asignó como condición inicial en las simulaciones posteriores para el mismo período temporal de 1990-2014.

Este proceso se realizó en forma análoga para el sitio S2. En este caso, el perfil de potencial de presión varía entre -120 cm en la superficie hasta 80 cm en su parte inferior. Esto contempla el valor de la profundidad del nivel freático para dicho sitio determinada en 120 cm desde la superficie del perfil para el mes de febrero.

3.3. Resultados y discusión

3.3.1. Evolución periódica en base a promedios históricos

Como primera aproximación al estudio del movimiento de agua en los suelos caracterizados, comenzamos por simular la evolución ante un forzado periódico como se muestra en la Fig. 3.10 (a). Esta serie temporal se obtuvo repitiendo los promedios

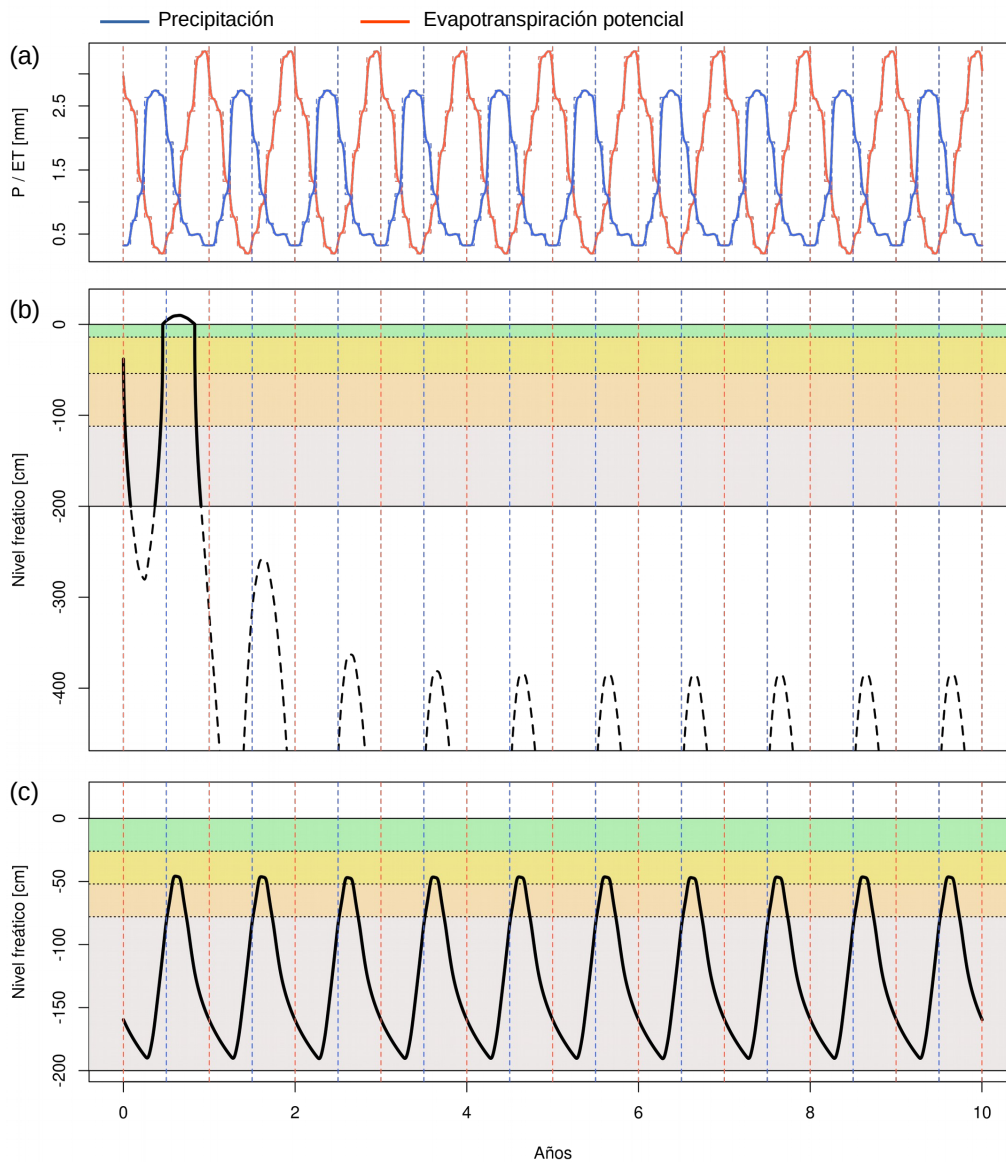


Figura 3.10: (a) Secuencia periódica de precipitaciones y ET potencial. Evolución del nivel freático para el sitio S1 (b) y S2 (c) utilizando los parámetros hidráulicos obtenidos mediante el código Rosetta 3.2. Cuando el valor cae por debajo de $z = -200$ cm, el nivel freático queda fuera del dominio. La aproximación de su valor para estos casos se muestra en línea de trazos.

mensuales calculados por Cravero et al. [8], que para el sitio considerado se muestran en la Fig. 3.7 (c), a lo largo de 10 años. A estos datos se le aplicó un suavizado que conserva los valores totales, para lograr un forzado continuo, sin saltos de un mes a otro. Las propiedades hidráulicas de los suelos son las mostradas en la tabla 3.2.

A partir del potencial matricial obtenido en la simulación para el punto inferior del dominio ($z = -200$ cm) se puede inferir el nivel freático (simplemente restando 200 cm). Que este valor se vuelva negativo indica que la región inferior del dominio está subsaturada y el nivel freático es menor a -200 cm, es decir, está fuera del dominio considerado. La evolución del nivel freático obtenida de esta forma para los sitios S1 y S2 se muestran en la Fig. 3.10 (b) y (c), respectivamente. En los casos en que el potencial

matricial en el extremo inferior es negativo, el resultado sólo puede considerarse una aproximación del nivel freático y por eso se muestra en línea de trazos.

Para el centro del mallín (S1) se observa un rápido descenso del nivel freático inicial seguido de un período de saturación durante la época invernal para el primer año de simulación. A continuación el contenido de agua disminuye rápidamente y el sistema alcanza un equilibrio con un nivel freático muy por debajo del límite inferior del dominio de la simulación. Esta evolución no es adecuada para representar la fenomenología en el centro del mallín y se deben encontrar las causas de esta mala representación. En la sección 3.3.3 se discute el efecto de la recarga y en la sección 3.3.3, el efecto de las propiedades hidráulicas y la curva de retención resultante para los suelos considerados.

En la periferia del mallín el resultado obtenido es mucho más acorde al comportamiento esperado y observado en mallines de la zona (Fig. 3.3), con un nivel freático que oscila entre -190 cm, al fin de la época seca y -50 cm hacia fines de la época húmeda. En este caso se obtuvieron resultados satisfactorios sin necesidad de corregir ningún dato de entrada o hipótesis del modelo. Los resultados que se muestran en la Fig. 3.10 (c) corresponden a una evolución perfectamente periódica porque corresponden a la segunda corrida, obtenida tomando como condición inicial el estado final de una primera corrida. Para la periferia del mallín esta simulación se consideró como definitiva y se analiza en más detalle a continuación.

3.3.2. Resultados en la periferia del mallín

La evolución obtenida para la zona periférica del mallín (S2) se muestra con mayor detalle en la Fig. 3.11. Además del nivel freático en función de los meses del año, se muestra la evolución de la saturación efectiva en el centro de cada horizonte.

Como resultado del forzado periódico obtenido de los promedios climáticos [8], se observa que la recarga del suelo comienza en abril, alcanzando su punto máximo en julio. Durante ese mes, el horizonte AC alcanza la saturación que se mantiene hasta fines de septiembre (Fig. 3.11 d). Por su parte, el horizonte A2 queda muy cerca de la saturación durante agosto (Fig. 3.11 c). El mínimo contenido de agua obtenido para estos horizontes se alcanza en abril, con un valor $S_e \approx 0,5$ en ambos casos. El horizonte más superficial (A1) permanece no-saturado durante todo el año con valores de saturación efectiva que oscilan entre 0,3 y 0,7 aproximadamente, y un valor medio anual levemente superior a 0,4.

También se puede observar que la dinámica de secado, a partir del mes de septiembre, tiene dos etapas. La etapa inicial evidencia un secado rápido que dura hasta el mes de noviembre, seguida de un descenso cada vez más lento que finaliza en abril con el comienzo de la recarga. Notar que la evapotranspiración potencial es mayor durante este período (noviembre-marzo, ver Fig. 3.7), pero la evapotranspiración real es bas-

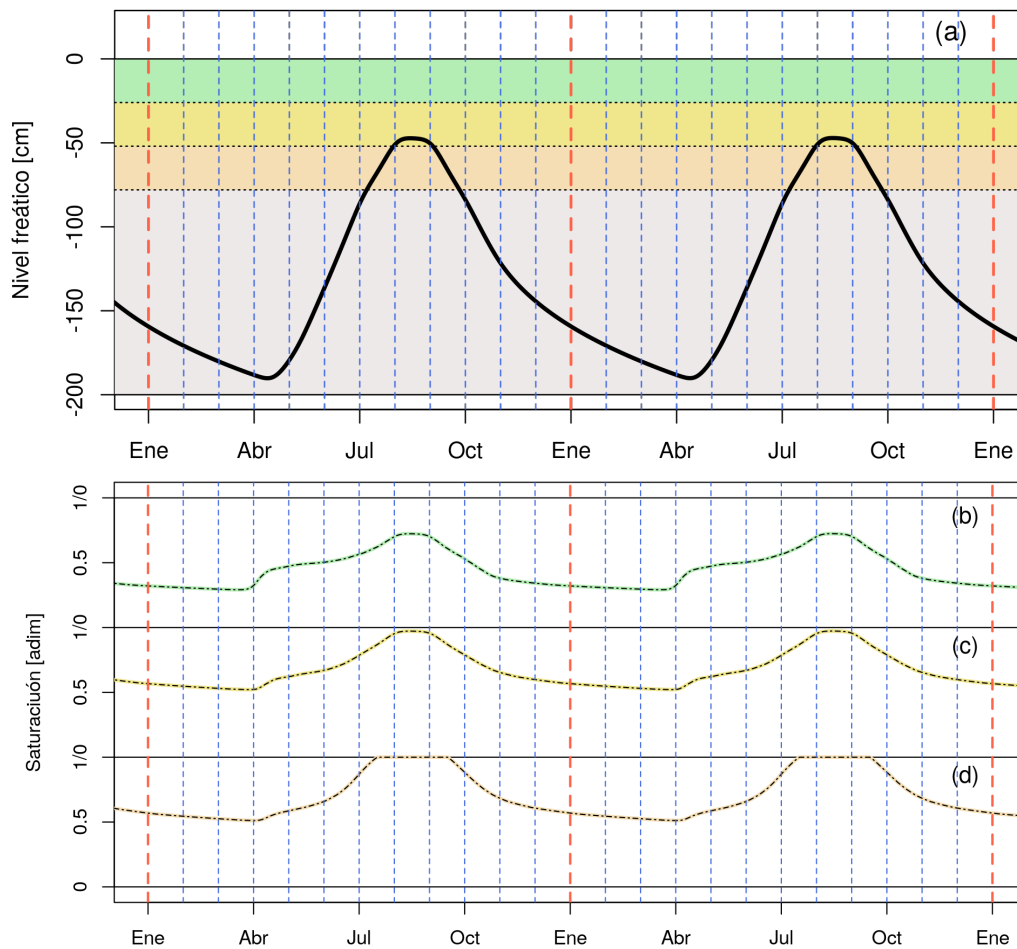


Figura 3.11: (a) Evolución del nivel freático en la periferia del mallín. (b-d) Evolución de la saturación efectiva en los puntos de observación $z_{obs,1}$, $z_{obs,2}$ y $z_{obs,3}$ mostrados en la Fig. 3.9 (b).

tante menor debido al bajo contenido de agua en suelo. Como veremos en la Sec. 3.3.3, esta dinámica está fuertemente influenciada por la curva de retención del suelo.

Los perfiles de contenido de agua obtenidos para los meses de enero, abril, julio y mediados de agosto se muestran en la Fig. 3.12. El nivel freático se encuentra en la posición en que el suelo deja de tener el contenido máximo de agua. Este punto se indica con un triángulo en cada caso. Si bien el contenido de agua medio en los tres horizontes tiene un mínimo en abril (Fig. 3.11 b-d), podemos ver que el punto más seco ocurre, como era de esperar, en enero cerca de la superficie ($z \approx 0$). En abril, si bien el contenido de agua total es mínimo, se observa que el proceso de recarga de agua ha comenzado porque el contenido de agua en la superficie va en aumento. Este proceso alcanza su máximo en julio y se mantiene durante un mes aproximadamente.

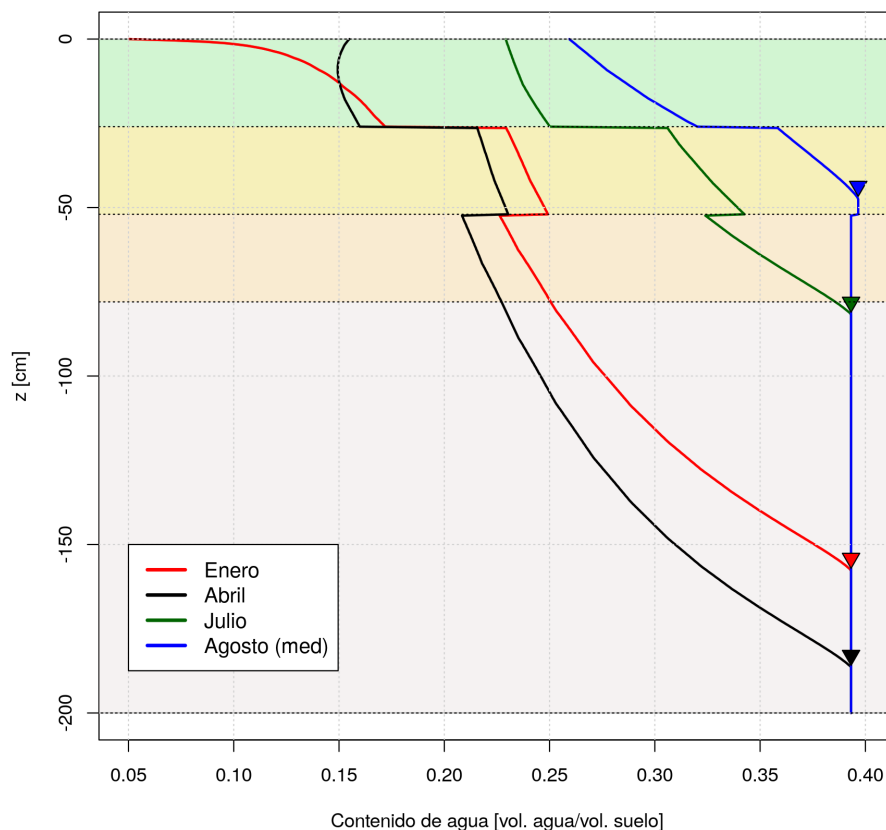


Figura 3.12: Perfiles de contenido de agua en suelo para cuatro instantes durante el año en la periferia del mallín: primero de enero, abril y julio y mediados de agosto. El triángulo indica la posición del nivel freático obtenido durante la simulación en cada caso.

3.3.3. Resultados en el centro del mallín

Como se discutió en la sección 3.3.1, los resultados de la simulación para el centro del mallín (S1) utilizando los datos de precipitación y evapotranspiración potencial del atlas climático [8] y los parámetros hidráulicos obtenidos con el código Rosetta (tabla 3.2) no son satisfactorios. Considerando que los datos del atlas climático son confiables, nos enfocamos en verificar, en primer lugar, la hipótesis expresada por la ec. (3.2) en la Sec. 3.3.3 y, en segundo lugar, los valores de las propiedades hidráulicas y la curva de retención obtenidas para el sitio S1 (Sec. 2.2.4).

Efecto de la recarga

En la Fig. 3.10 (b), se observa que la evolución del nivel freático obtenida en la simulación para el centro del mallín cae muy por debajo de los valores reales. Este déficit hídrico podría ser atribuible a la hipótesis de balance de flujos superficiales y subsuperficiales expresado por la ec. (3.2). Por tratarse de la zona central del mallín, es decir, una depresión del terreno esta hipótesis podría ser inapropiada. Para verifi-

car esto, repetimos la simulación incrementando gradualmente, en forma artificial, el régimen de precipitación, multiplicando todo el conjunto de datos por un factor mayor a uno, emulando una contribución positiva del término $(H_o - S_o + Gwd - Gwr)$. Los resultados se muestran en la Fig. 3.13.

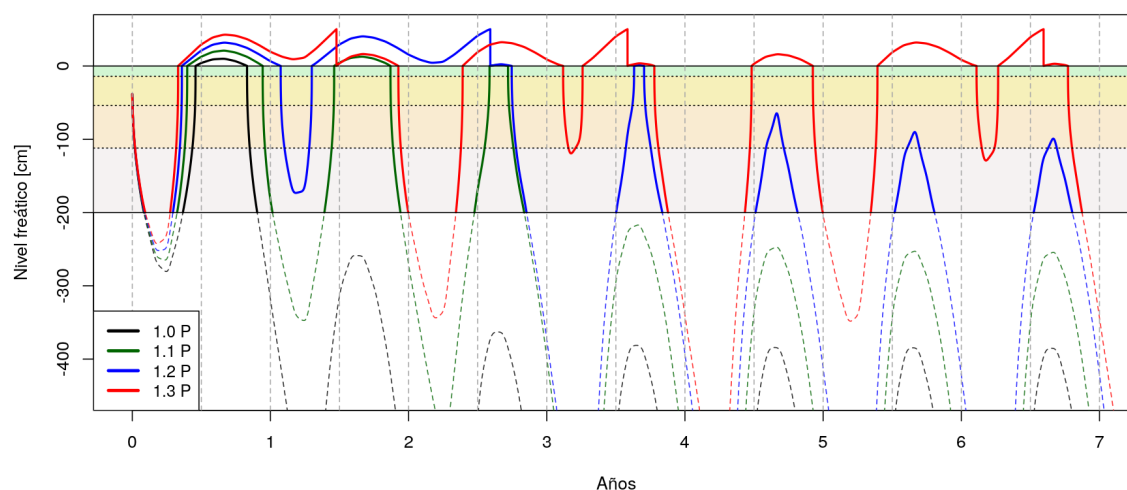


Figura 3.13: Evolución del nivel freático en el centro del mallín incrementando el régimen de precipitaciones en un factor mayor a uno.

La curva negra muestra el resultado original. Incrementando un 10% el ingreso de agua se obtiene la curva verde. En este caso la saturación es más prolongada el primer año y se repite dos años más por períodos más cortos y finalmente el nivel cae por debajo de 2 m cuando se alcanza el estacionario.

Al incrementar el régimen de precipitaciones un 20%, el nivel de precipitación se vuelve similar al de evapotranspiración potencial y se empieza a acumular más agua de la que se puede evaporar, como muestra la curva azul. En ese caso se alcanza, tras un prolongado período de saturación, el umbral crítico de acumulación de agua en superficie (h_{CritS} , fijado en 50 cm) a los dos años y medio de simulación, aproximadamente. Cuando se alcanza este umbral, HYDRUS-1D está programado para eliminar instantáneamente el exceso hídrico. Esta disminución puede ser interpretada como una erogación desde el mallín en forma de escorrentía superficial o subsuperficial. Luego de este evento, el sistema se estabiliza con un nivel freático máximo de un metro de profundidad, y un nivel muy inferior a 2 m en la estación seca.

Finalmente, la curva roja muestra la evolución para el caso en que la precipitación es 30% mayor que el valor del atlas climático, superando al de ET potencial. En este caso, el umbral de acumulación superficial se alcanza periódicamente, de acuerdo al régimen de exceso hídrico impuesto. Cabe destacar que aún en este caso, de marcado exceso hídrico, se alternan períodos de saturación prolongados, con períodos excesivamente

secos (nivel freático menor a 2 m) comparado con los valores esperables.

Los resultados mostrados en esta sección, indican que no es posible encontrar un régimen hídrico adecuado, modificando únicamente los flujos de entrada y salida, es decir, balance hídrico.

Análisis y ajuste de la curva de retención

Como vimos en la Sec. 3.3.2, el proceso de secado depende del forzado externo (balance precipitación-ET potencial), pero depende más fuertemente del contenido de agua y la capacidad de retención del suelo. En esta sección analizamos el efecto de la curva de retención sobre el régimen hídrico, en la zona central del mallín.

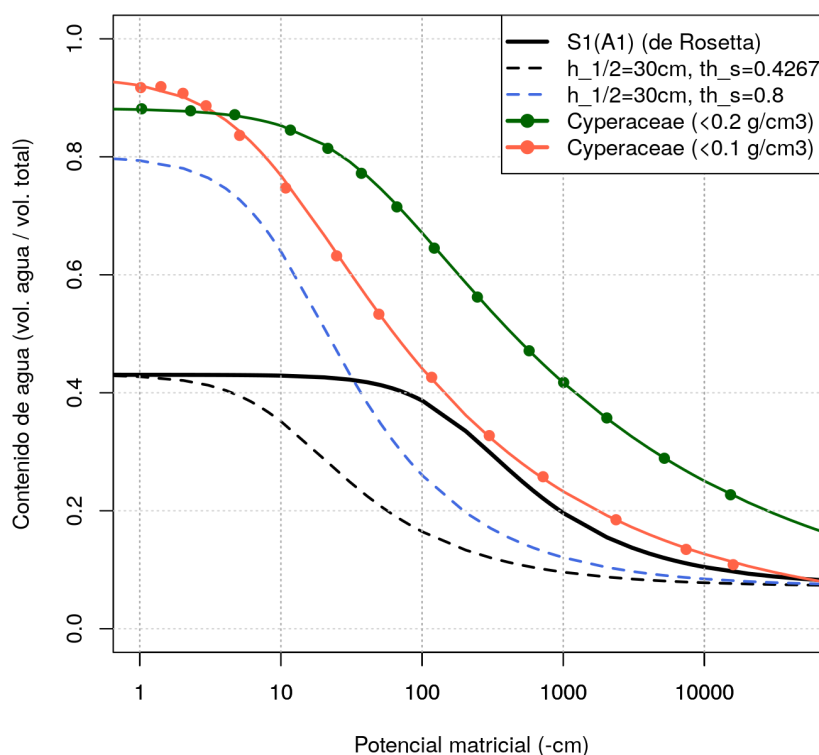


Figura 3.14: Curvas de retención para el horizonte A1 del sitio S1 (obtenida mediante Rosetta y las modificadas) comparadas con las curvas de retención determinadas experimentalmente por Liu et al. [11] para suelos cubiertos por plantas de la familia *Cyperaceae* con distintos valores de densidad aparente.

Según el modelo utilizado en este trabajo, la curva de retención queda especificada por los cuatro parámetros que intervienen en la ec. (2.11), a saber, θ_r , θ_s , α_v y n . Utilizando los valores obtenidos para el horizonte A1 del sitio S1 (tabla 3.2) obtenemos la curva negra de la Fig. 3.14.

Para poner en perspectiva la curva de retención inferida a partir de nuestras determinaciones experimentales, agregamos a esta figura los valores obtenidos recientemente

Caso	θ_r [cm cm ⁻¹]	θ_s [cm cm ⁻¹]	α_v [cm ⁻¹]	$h_{1/2}$ [cm]	n [-]
S1(A1)	0,0543	0,4267	0,0043	555,6	1,622
Cip. (< 0,2g/cm ³)	0,01	0,882	0,027	739	1,23
Cip. (< 0,1g/cm ³)	0,02	0,935	0,129	75	1,3
S1(A1) bajo $h_{1/2}$	0,0543	0,4267	0,0796	30	1,622
S1(A1) alto θ_s	0,0543	0,8	0,0796	30	1,622

Tabla 3.3: Parámetros hidráulicos para las curvas de retención mostradas en la Fig. 3.14. El valor de $h_{1/2}$ se obtiene a partir de α_v y n mediante la ec. (3.3). **Fuente:** Elaboración propia.

por Liu y Lennartz [11], en forma experimental, para suelos de humedales y turberas con el mismo tipo de cobertura (plantas de la familia *Cyperaceae*) que el mallín considerado en este trabajo, y para distintos valores de densidad aparente. Los puntos verdes y rojos en la Fig. 3.14 muestran los resultados experimentales (Fig. 5 f y g de la Ref. [11]) y las líneas correspondientes muestran el ajuste que hicimos de esos puntos, utilizando la ec. (2.11). Los parámetros obtenidos en el ajuste se muestran en la tabla 3.3 (junto con los valores del horizonte A1 para facilitar la comparación).

Por un lado, vemos que el contenido de agua máximo (θ_s) para suelos similares es mucho más alto que el obtenido mediante Rosetta en este trabajo. Por otro lado, al comparar las curvas verde y roja, vemos que la densidad aparente tiene una gran influencia en la curva de retención. En particular, se observa que una menor densidad aparente (mayor contenido de MOS) produce un desplazamiento de la curva de retención hacia la izquierda, lo que implica que para un contenido de agua dado la succión ejercida por la matriz porosa del suelo será menor.

Este desplazamiento es capturado, principalmente, por el parámetro α_v que determina el descenso de la curva, como puede inferirse de la ec. (2.11). Una forma más intuitiva de determinar el desplazamiento horizontal de la curva de retención puede lograrse definiendo el parámetro $h_{1/2}$ como

$$h_{1/2} = \frac{(2^{1/m} - 1)^{1/n}}{\alpha_v}, \quad (3.3)$$

que da la posición, es decir el potencial matricial, cuando la saturación efectiva vale un medio ($S_e = 0,5$).

En base a estas observaciones, procedemos a repetir la simulación para el centro del mallín variando los dos parámetros que más influyen en la curva de retención: θ_s y $h_{1/2}$. Los otros parámetros se dejan fijos, de modo que n es conocido y α_v puede determinarse directamente de $h_{1/2}$ mediante (3.3). La curva de retención obtenida para $h_{1/2} = 30$ cm, se muestra con línea de trazos negra en la Fig. 3.14. Si además elevamos el contenido de agua en saturación, se obtiene la curva de retención mostrada en línea

de trazos azul claro. Los valores de todos los parámetros para estos casos también se detallan en la tabla 3.3.

Resultados para el centro del mallín variando la curva de retención

En la Fig. 3.15 se muestra la evolución para el centro del mallín con todos los datos originales excepto α_v en los tres horizontes (A1, 2A2, 3AC) que fue ajustado para que todos tengan un valor dado de $h_{1/2}$ (el mismo para los tres horizontes). El valor original, correspondiente a los valores obtenidos con Rosetta, es cercano a 500 cm para los tres horizontes. En la figura 3.15 vemos que disminuyendo ese valor hasta 150 cm, es posible obtener una evolución con períodos breves de saturación de la superficie.

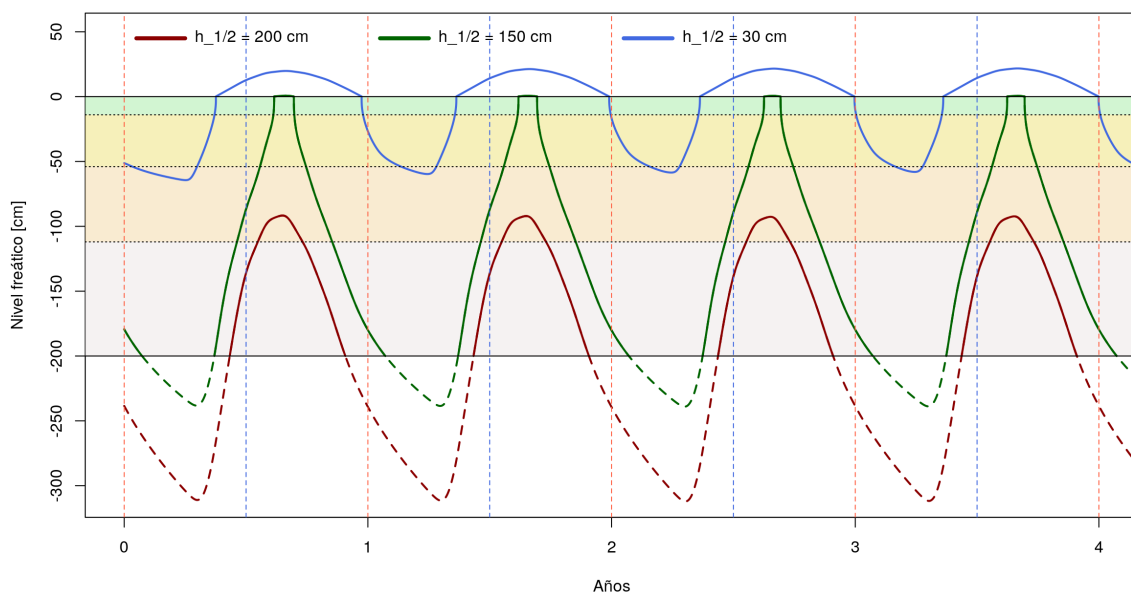


Figura 3.15: Evolución del nivel freático en el centro del mallín para distintos valores de $h_{1/2}$ manteniendo el resto de los datos en su valor original.

Si el valor de $h_{1/2}$ se baja hasta 30 cm (correspondiente a la curva de retención en línea de trazos negra de la Fig. 3.14), se obtiene una evolución del nivel freático acorde a la esperada inicialmente, con largos períodos de saturación en la estación húmeda y un descenso moderado del nivel freático durante la época estival. Recalamos que el único parámetro variado para obtener esta familia de soluciones es el α_v (por medio del $h_{1/2}$ por ser más fácil de interpretar) que da un desplazamiento hacia la izquierda de la curva de retención. De acuerdo a la mediciones de Liu et al [11], este desplazamiento está asociado a una disminución en la densidad aparente del suelo.

El hecho que la disminución de $h_{1/2}$ (o el desplazamiento a la izquierda de la curva de retención) produzca un aumento del nivel freático de la evolución estacionaria se debe a que el proceso de secado se hace más lento. La evapotranspiración comienza a

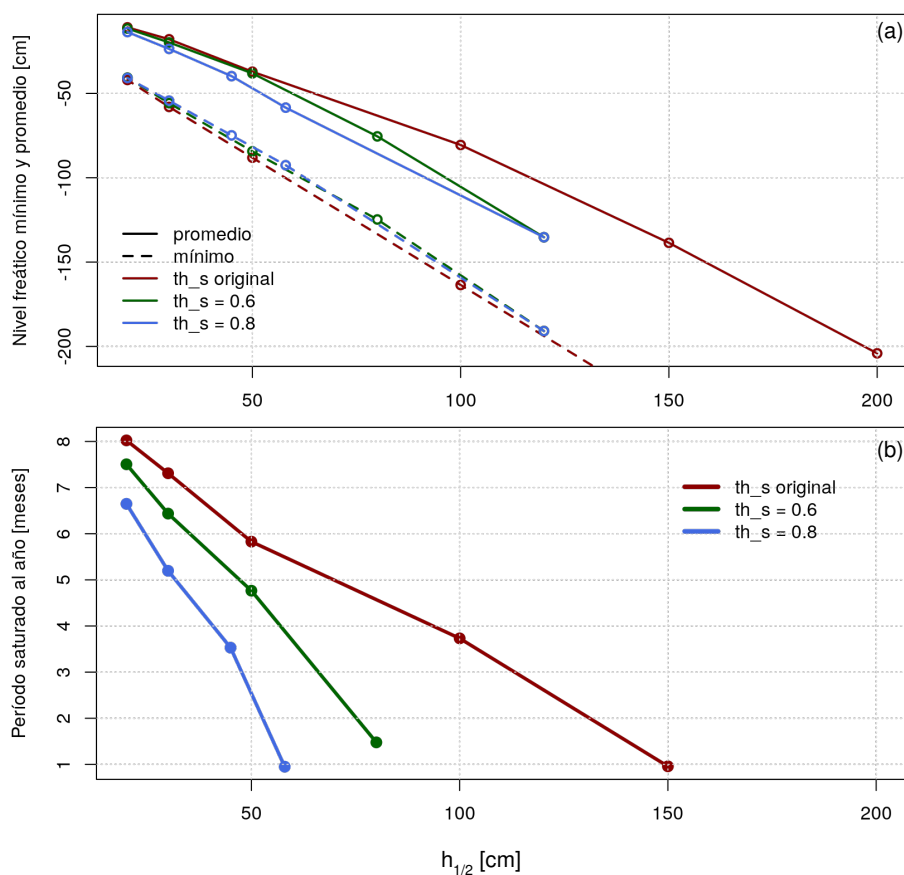


Figura 3.16: (a) Nivel freático (mínimo y promedio) y (b) período de saturación del suelo en función de $h_{1/2}$ para distintos θ_s .

remover agua de las capas más superficiales del suelo (ver perfil rojo en la Fig. 3.12). Esta disminución del contenido de agua produce un aumento en la succión capilar del agua de las capas inferiores hacia arriba. El valor de esta succión está dado por la curva de retención, y vemos en la Fig. 3.14, que para un valor fijo de contenido de agua, la succión es menor para aquellas curvas con menor $h_{1/2}$ (las más desplazadas hacia la izquierda).

Otro fenómeno potencialmente relevante que aparece en los casos con largos períodos de saturación (como la curva celeste de la Fig. 3.15, por ejemplo) es la acumulación de agua en superficie que se evidencia por valores del nivel freático superiores a 0. Permitir que este valor sea mayor que cero, puede considerarse asociado a la capacidad de acumulación de agua de la zona de captación aledaña al punto considerado. En otras palabras, un exceso en la acumulación de agua en superficie no tiene que ser asociado necesariamente a un proceso de encharcamiento real, sino que puede considerarse un recurso del modelo matemático para representar la captación de agua más allá del sitio de estudio, y que termina fluyendo hacia éste por gravedad. En términos de la ec. (3.2), este efecto sería similar a una resultante positiva de los flujos superficiales y subsuperficiales durante la época de mayor precipitación. Se indaga más sobre este

aspecto en la sección 3.3.4.

Queda claro que la posición de la caída en la curva de saturación, medida a través de $h_{1/2}$, tiene una influencia muy grande en la dinámica del sistema. Otro parámetro que puede diferir significativamente al obtenido mediante Rosetta, para suelos del tipo considerado, es θ_s (al comparar con las mediciones de Liu et al [11]). En la Fig. 3.16 se muestra el nivel freático promedio anual y su valor mínimo en función de $h_{1/2}$ para distintos valores de θ_s . Cada punto en este gráfico representa una simulación. También se muestra la dependencia del período en que el mallín permanece saturado durante el año con $h_{1/2}$ para distintos θ_s .

Se observa que las tres familias de corridas dan la misma dependencia del nivel freático mínimo con $h_{1/2}$, indicando que esta variable es prácticamente independiente del contenido de agua en saturación. Algo similar ocurre con el nivel freático medio, aunque la dependencia con el valor de θ_s es mayor. Esto quiere decir que la determinación experimental de alguna de estas magnitudes (preferentemente el nivel mínimo) permitiría inferir mediante simulaciones el valor de $h_{1/2}$ para el suelo del mallín en estudio. Esto sería hacer una calibración del modelo para el régimen hídrico del mallín (aplicable a otros tipos de suelo en principio). Con la estimación de $h_{1/2}$, se podría inferir el valor de θ_s si es posible determinar además el período de saturación del mallín (se requiere una estimación de la media histórica, en realidad).

3.3.4. Evolución con precipitación variable

Hasta aquí hemos considerado, por simplicidad, la evolución del sistema ante un forzado periódico. Para analizar un caso más representativo de la realidad, aplicamos como condición de precipitación la serie temporal (diaria) desde 1990 hasta 2014, registrada en el aeropuerto de Bariloche (Fig. 3.17 a). El valor registrado fue renormalizado para que el promedio anual sea 470 mm, respetando el valor obtenido del atlas climático para el sitio S1. En la Fig. 3.17 (b) se muestra también el balance mensual de precipitación, es decir, la diferencia entre la precipitación acumulada y el promedio histórico correspondiente a ese mes, obtenido del atlas climático. Los meses que hay un nivel de precipitación superior (inferior) a la media histórica se muestran con línea roja (azul oscuro).

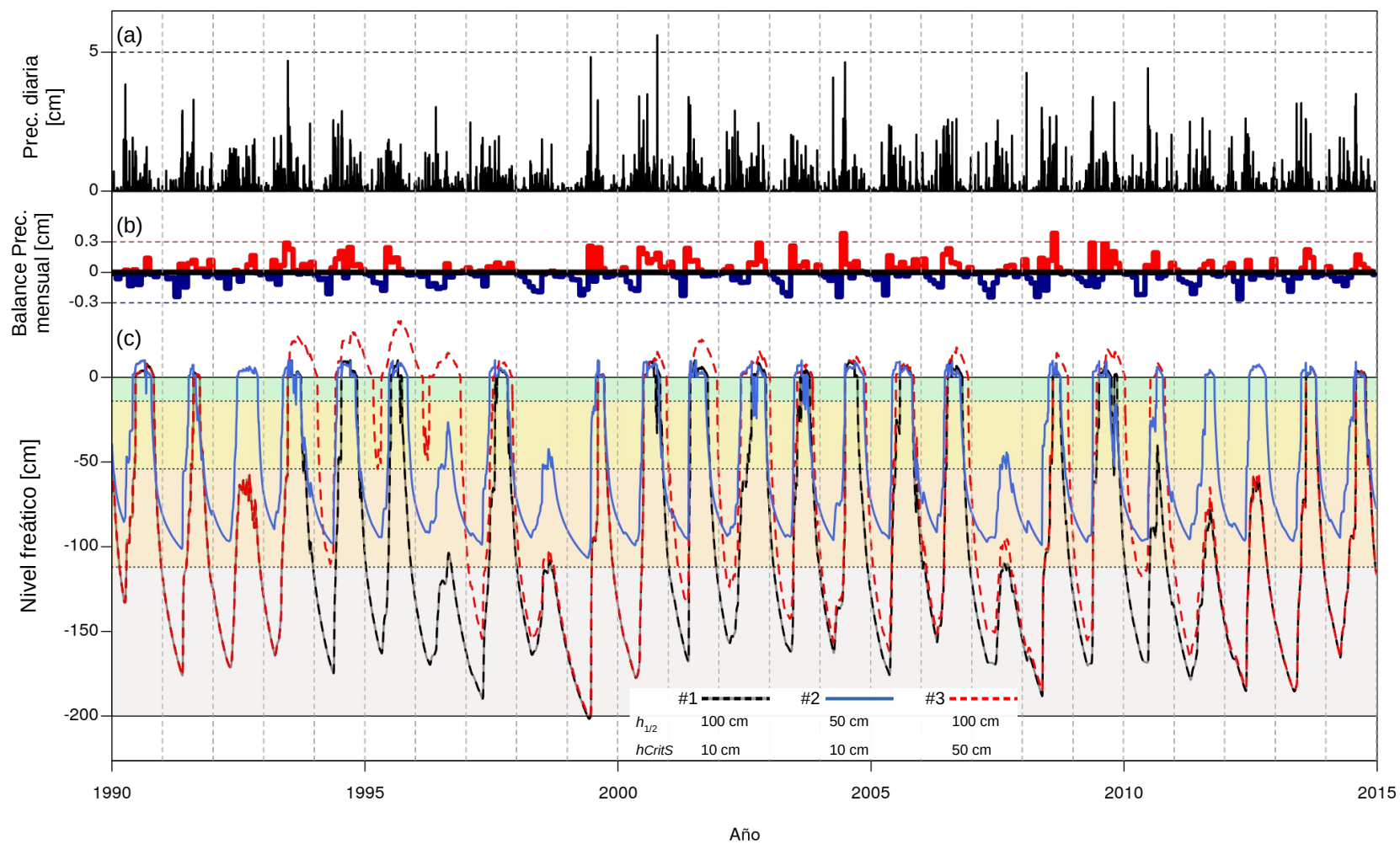


Figura 3.17: (a) Precipitación diaria registrada en el aeropuerto de Bariloche, corregida a 470 mm anuales. (b) Exceso (rojo) y déficit (azul oscuro) mensual de precipitación, respecto al promedio histórico. (c) Evolución del nivel freático para tres casos.

La Fig. 3.17 (c) muestra la evolución del nivel freático para tres casos, dos de ellos con $h_{CritS} = 10$ cm, uno con $h_{1/2} = 100$ cm (#1) y el otro con $h_{1/2} = 50$ cm (#2). Tal como se observó anteriormente, el valor de $h_{1/2}$ de la curva de retención, correlaciona muy bien con el mínimo nivel freático medio (promedio de los mínimos alcanzados durante la estación seca), y los valores obtenidos están en buen acuerdo con los resultados mostrados en la Fig. 3.16 (a). La otra diferencia notable es que el caso #2 mantiene un nivel freático mayor durante toda la evolución y satura en años con precipitación tardía (1992, 2010, 2011, 2012), mientras que el primero no lo hace. En los años más secos del período considerado (1996, 1998, 2007), ninguno de los dos casos alcanza la saturación en la época invernal.

El tercer caso considerado (#3) tiene $h_{CritS} = 50$ cm y $h_{1/2} = 100$ cm. Esto permite evaluar el efecto de una mayor capacidad de acumulación del sistema (podemos pensar en la microcuenca alrededor del sitio), comparando los casos #1 y #3. La mayor diferencia se puede ver cuando se dan varios años muy húmedos en forma consecutiva, como en 1993, 1994 y 1995. En este caso un alargamiento significativo del período de anegamiento del mallín, junto con la ocurrencia de saturación en el año posterior que fue seco (1996) y los otros casos no alcanzaron la saturación.

Otra diferencia de comportamiento apreciable se da en los años 2009, 2010 y 2011. Durante 2009, los tres casos se comportan en forma similar. En 2010, el caso #3 satura debido a que tiene disponible parte exceso hídrico del año anterior, y el #2 por tener un comportamiento más regular gracias a su bajo valor de $h_{1/2}$ y elevado nivel freático. Como 2010 no fue un año con exceso hídrico, el exceso que tenía el caso #3 se pierde y en 2011 vuelve a comportarse como el caso #1. Hay que tener en cuenta que los excesos hídricos que no son acumulados en los casos #1 y #2 son erogados del sitio, y si bien no hacemos ningún seguimiento de esa erogación en este trabajo, tenemos todos los elementos para estimarla. Mediante consideraciones que exceden este análisis, esa masa de agua puede ser considerada como una fuente de recarga de acuíferos más profundos, o bien, como un aporte de flujo superficial que podría estar asociada a un cauce natural observable en los alrededores.

En conclusión, vemos que un mayor nivel freático mínimo medio ($h_{1/2}$ bajo) otorga una mayor regularidad y estabilidad al sistema, mientras que una mayor capacidad de acumulación de agua se evidencia en el alargamiento del período de saturación durante los años húmedos, así como la ocurrencia de saturación en años secos que se dan a continuación de años con alto nivel de precipitaciones.

3.3.5. Transporte de solutos

Para el análisis de transporte de solutos mediante los tres mecanismos descritos en la Sec. 2.4 se hicieron varias hipótesis simplificadoras. En primer lugar, retomamos

el forzado periódico en base a los promedios históricos de precipitación y ET potencial (Fig. 3.10a). Se consideran sólo dos casos, $h_{1/2} = 50$ cm y $h_{1/2} = 100$ cm, con el valor de θ_s obtenido de Rosetta. Como concentración inicial del soluto se adoptó un perfil uniforme igual a 1. Los coeficientes de difusión total ($D_{d,tot}$) y dispersión hidrodinámica (D_L) también se tomaron iguales a uno (no se consideró la tortuosidad). Finalmente, se adoptaron condiciones de flujo cero (Neumann) en los extremos del dominio y no se consideraron fuentes o sumideros, de forma que la cantidad total de soluto se mantiene constante. La idea es estudiar cómo es la redistribución del perfil uniforme bajo dos regímenes hídricos diferentes.

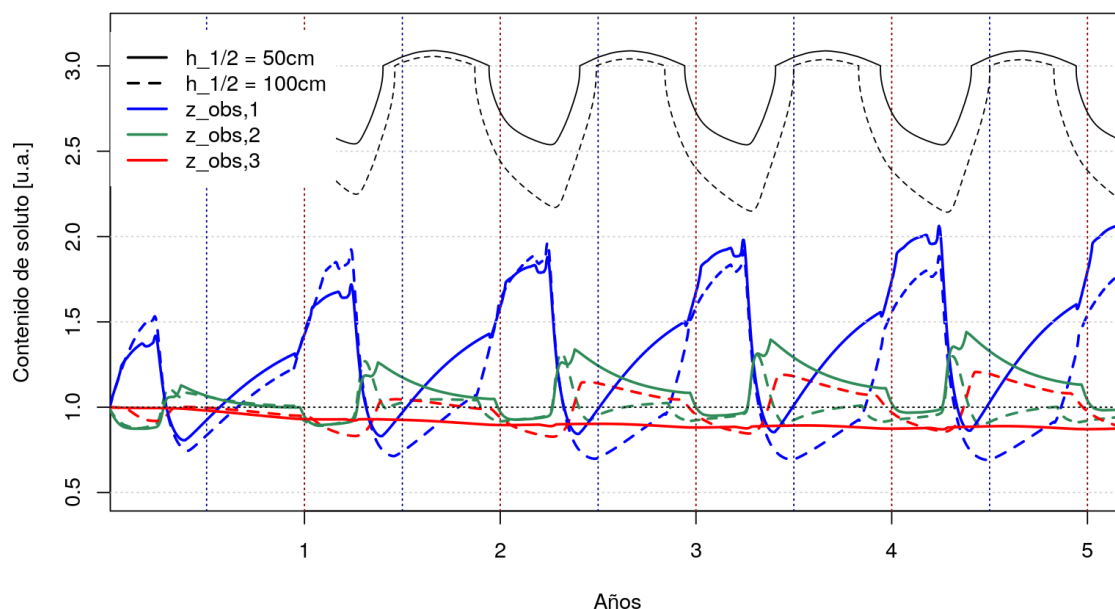


Figura 3.18: Evolución del contenido de soluto en los tres puntos de observación para los dos casos. La evolución del nivel freático se muestra (fuera de escala) en líneas negras para relacionar los períodos de recarga, saturación y secado con la evolución del soluto en cada caso.

En la Fig. 3.18 se muestra la evolución del contenido de soluto ($c\theta$) en los tres puntos de observación superiores ($z_{obs,1}$, $z_{obs,2}$, $z_{obs,3}$ ver Fig. 3.9a) para dos dinámicas de flujo con distinto valor de $h_{1/2}$. Se observa una secuencia compleja de intercambios de masa entre los distintos niveles que en pocos años alcanza un régimen cuasi-estacionario. Para dilucidar esta dinámica conviene considerar también la evolución de los perfiles de concentración, cuyo gradiente impulsa los procesos de difusión y dispersión hidrodinámica. Esta evolución se muestra en la Fig. 3.19.

Iniciando el análisis al comienzo del período de saturación, vemos que el contenido de soluto es mínimo en la zona superior (perfiles azules en la Fig. 3.19). Durante la saturación completa del perfil, el soluto acumulado en las capas inferiores asciende por difusión. A continuación, ocurre el período de secado en el que pueden distinguirse dos

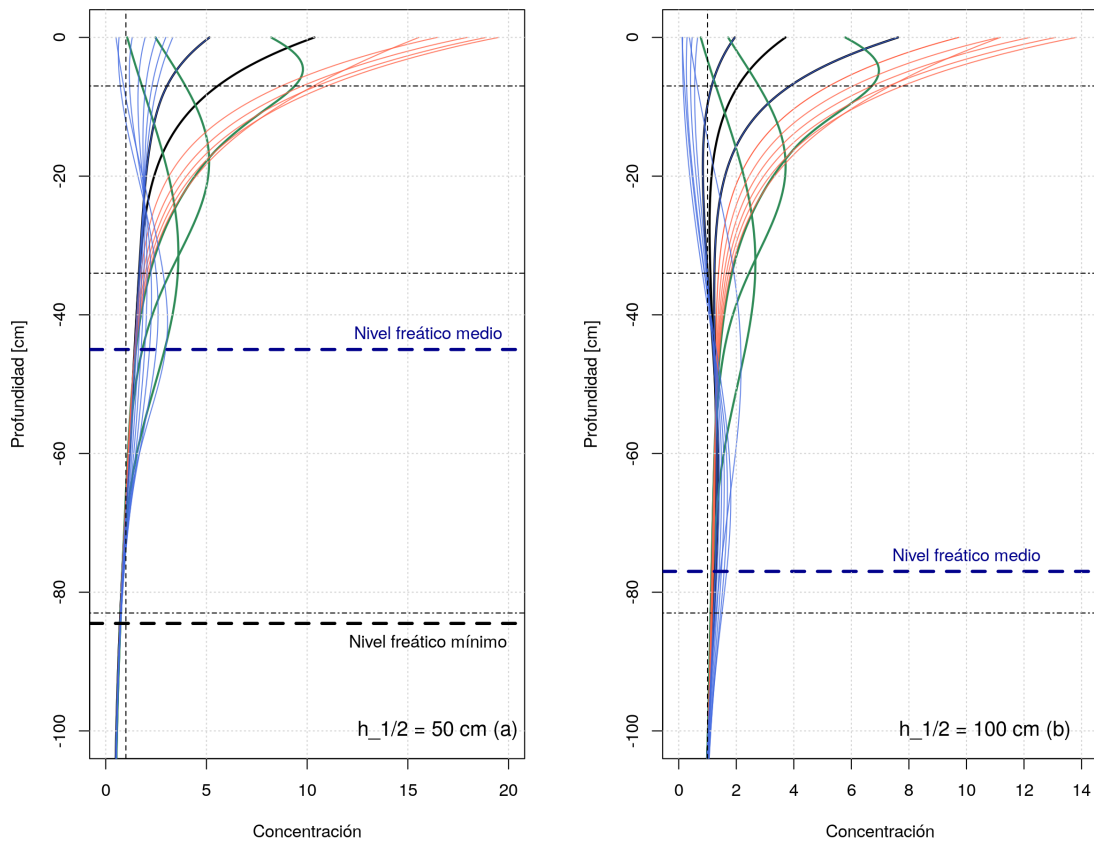


Figura 3.19: Perfiles de concentración durante un año para los dos regímenes hídricos considerados. La condición inicial está representada por la línea vertical en $c = 1$. Los perfiles en azul muestran el período de saturación. Los perfiles en negro y rojo, muestran la etapas temprana y tardía, respectivamente, del proceso de secado. Finalmente, los perfiles en verde muestran la etapa de recarga por precipitación.

etapas: primero, un rápido crecimiento de la concentración debido al ascenso de agua con gran contenido de soluto (perfiles negros en la Fig.3.19) y segundo, un crecimiento más lento (perfiles rojos) debido a la disminución del contenido de agua (es importante distinguir concentración con contenido de soluto; esta última es la cantidad conservada). Finalmente, en la época de mayor precipitación ocurre un rápido transporte hacia las capas inferiores como lo muestran los perfiles verdes de la Fig.3.19.

Para conocer el efecto neto de estos procesos alternados de transporte ascendente y descendente, calculamos la cantidad de soluto acumulado en cada punto de observación. Los resultados se muestran en la Fig. 3.20. Para el caso $h_{1/2} = 50$ cm se observa claramente un transporte neto desde el horizonte inferior hacia los superiores. En el caso de menor nivel freático, el efecto neto es significativamente menor, observándose una disminución en el horizonte central, y una leve acumulación (neta) en las capas inferior y superficial.

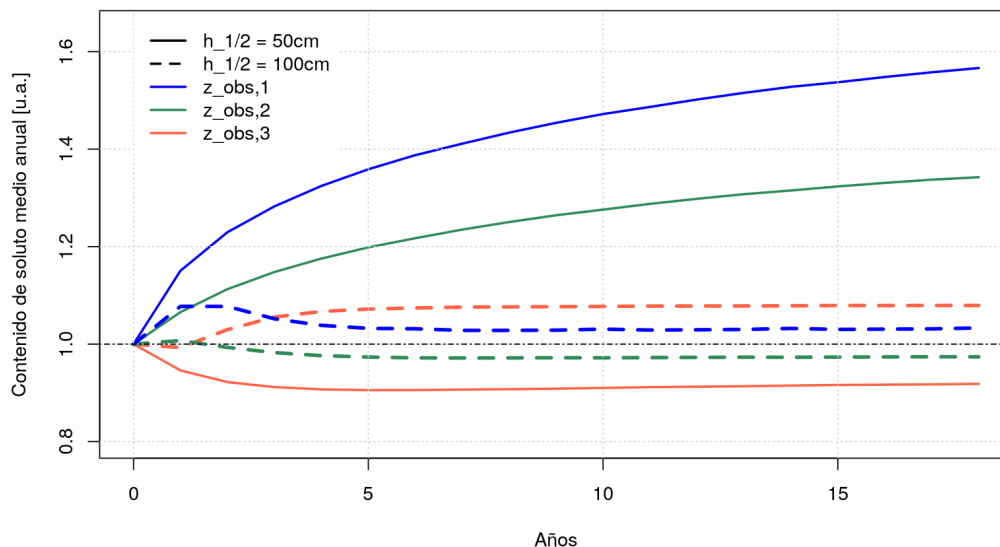


Figura 3.20: Cantidad de soluto acumulada anualmente en cada punto de observación. La línea continua (de trazos) corresponde al caso con $h_{1/2} = 50\text{ cm}$ (100 cm).

3.4. Conclusiones parciales

A partir de la obtención y análisis de las muestras de suelo en el mallín seleccionado para el estudio, pudimos estimar las propiedades hidráulicas mediante Rosetta, un código ampliamente difundido por la USDA. Aplicando un forzado atmosférico (precipitación y ET potencial) periódico adecuado al sitio, fue posible recuperar el comportamiento del nivel freático en la zona periférica del mallín en forma satisfactoria, sin necesidad de hacer ningún ajuste al modelo de balance hídrico planteado ni los datos obtenidos para el sitio. La situación contrasta para la simulación en el centro del mallín. En este caso, encontramos que es necesario modificar los parámetros que definen la curva de retención para obtener una dinámica similar a la que se observa en los mallines de la zona. Esta diferencia puede deberse a que la base de datos a partir de la cual se elaboraron las funciones de pedotransferencia que utiliza el Rosetta para asociar las propiedades hidráulicas a cada clase textural, se compone principalmente de suelos minerales. Por ello los parámetros determinados resultan adecuados para la zona periférica del mallín, pero no para la zona central que se trata de un suelo mucho más desarrollado y con mayor contenido de MOS.

El contenido de materia orgánica afecta la densidad aparente y de forma no trivial las propiedades hidráulicas que determinan la curva de retención [11]. Al simular la dinámica del movimiento de agua variando la posición ($h_{1/2}$) y altura (θ_s) de la curva de retención, encontramos que la primera característica correlaciona directamente con el nivel freático mínimo, y ambas afectan el período de saturación del mallín. Es-

tos resultados sugieren que se podría diseñar un método de calibración de estos dos parámetros a partir de una estimación del nivel freático mínimo y el período anual de saturación medios. El primero podría obtenerse de salidas a campo hacia fines de la época seca, y el segundo a partir de series de imágenes satelitales, por ejemplo.

Al analizar la dinámica ante un forzado con variabilidad temporal realista, aparece la capacidad de acumulación de agua del sitio y su entorno cercano como un nuevo factor a considerar. El parámetro con que cuantificamos este efecto es la constante $hCritS$ del modelo HYDRUS-1D. Este parámetro podría ajustarse analizando la respuesta del sistema, en términos de los períodos de saturación, a una serie de precipitaciones conocida. Al analizar la variabilidad temporal del forzado atmosférico se debería incluir también una variación realista de la evapotranspiración en base diaria. Sin embargo, no resulta sencillo obtener la serie temporal en dicha base de todas las variables atmosféricas necesarias en el sitio (como humedad relativa, velocidad del viento, irradiación solar, entre otros). Además, hemos observado que las simulaciones tienden a desarrollar inestabilidades numéricas cuando la evapotranspiración potencial impuesta fluctúa mucho. Debido a estas dos dificultades, en este trabajo se optó por mantener la base mensual de evapotranspiración potencial determinada por Cravero *et al.* [8], pero en desarrollos futuros se podría intentar refinar la resolución temporal de este término.

Una vez calibrado este parámetro de acumulación $hCritS$, se podrían estimar mejor los caudales que eroga el mallín ante eventos de precipitación intensa. Este es un factor de interés, pues los humedales en general se consideran “amortiguadores” naturales del ciclo hidrológico. Más aún, en principio, sería posible estimar cómo varía esta capacidad de retención ante cambios de manejo que den lugar a compactación y degradación del suelo.

Por último analizamos la dinámica de la redistribución de un perfil inicialmente uniforme de soluto. Consideramos advección, difusión y dispersión hidrodinámica, pero no reacciones químicas o decaimiento. Encontramos que el régimen hídrico afecta en gran medida esta redistribución. Para las condiciones de borde aplicadas (flujo cero en ambas caras) encontramos que la evolución con niveles freáticos más altos produce un transporte neto hacia arriba, aumentando la concentración media anual de soluto en las capas superiores y disminuyendo en las capas inferiores, al cabo de algunos años.

Es importante notar que este estudio está limitado a un solo valor para los coeficientes de difusión y dispersión hidrodinámica. Distintas relaciones entre estos coeficientes podrían dar lugar a dinámicas muy diferentes. Finalmente, mencionamos que sólo se consideraron los procesos físicos del transporte de solutos. La inclusión de reacciones químicas entre distintas especies, con relaciones de producción, destrucción y decaimiento podrían agregarse para enriquecer el análisis. Particularmente, se podría avanzar sobre el estudio de la adsorción/desorción de solutos en las partículas del suelo y el consumo por parte de las plantas modelado en forma de sumideros.

Capítulo 4

Caracterización hidrológica de rellenos sanitarios

En este capítulo se analiza y calcula el balance hidrológico en distintos diseños de relleno sanitario mediante el código HELP. En primer lugar se introducen los aspectos generales, la estructura, los componentes básicos y el balance hidrológico de los rellenos sanitarios, incluyendo las referencias de las normativas vigentes. En segundo lugar se presenta el modelo HELP, para caracterización hidrológica de rellenos sanitarios con distintos diseños de cobertura, barreras y sistemas de drenaje. A continuación se describen los diseños de coberturas superiores y barreras basales considerados en este trabajo, así como los datos necesarios para este tipo de simulaciones, incluyendo el forzado climático y el dimensionamiento del cuerpo del relleno. Finalmente, se muestran y discuten los resultados obtenidos para los flujos de percolación, drenaje y pérdidas a través de los distintos sistemas de barreras propuestos.

4.1. Rellenos sanitarios

En Argentina, la Ley N° 25.916 establece los presupuestos mínimos de protección ambiental referidos a la gestión integral de los residuos sólidos urbanos de origen domiciliario (RSU). Se denomina *gestión integral de RSU* (GIRSU) al conjunto de actividades interdependientes y complementarias entre sí que conforman un proceso de acciones para el manejo de RSU con el objeto de proteger el ambiente y la calidad de vida de la población [52].

De acuerdo con dicha normativa, la GIRSU comprende las siguientes etapas:

- **Generación:** corresponde a la actividad que comprende la producción de los RSU.
- **Disposición inicial:** refiere a la acción efectuada por el generador por medio

de la cual se depositan o abandonan los RSU. Ésta debe ser realizada según lo dispuesto en cada jurisdicción específica y puede ser a su vez clasificada como: *general*, cuando se realiza sin clasificación y separación previa, o bien, *selectiva*, cuando se realiza una clasificación y separación de los RSU en origen.

- **Recolección:** esta etapa involucra el conjunto de acciones que comprende el acopio y carga de los RSU en los vehículos recolectores. La recolección puede ser: *general*, cuando se realiza sin tener en cuenta los distintos tipos de RSU; o, *diferenciada* cuando se discrimina por tipo de residuo de acuerdo a su tratamiento y posterior valoración.
- **Transferencia:** comprende las actividades de almacenamiento transitorio y/o acondicionamiento de residuos para su transporte.
- **Transporte:** refiere a los viajes de traslado de los RSU entre los diferentes sitios comprendidos en su gestión integral.
- **Tratamiento:** comprende el conjunto de operaciones tendientes al acondicionamiento y valorización de los residuos.
- **Disposición final:** engloba al conjunto de operaciones destinadas a lograr el depósito permanente de los RSU, así como de las fracciones de rechazo inevitables resultantes de los métodos de tratamiento adoptados. Asimismo, quedan comprendidas en esta etapa las actividades propias de la *clausura* y *postclausura* de los centros de disposición final.

Particularmente, en lo que respecta a la disposición final, los *rellenos sanitarios* se han constituido como una de las opciones más ampliamente utilizadas. Estos se definen como una obra de ingeniería que implica la disposición de RSU a través de su confinamiento bajo tierra en sucesivas capas cubiertas con material inerte de modo de minimizar el deterioro ambiental y los posibles impactos negativos a la salud pública [53]. En otras palabras, un relleno sanitario puede considerarse como un macrosistema compuesto por una combinación adecuada de barreras, entendiéndose por barrera a una herramienta para prevenir o reducir el transporte de contaminantes desde el relleno sanitario hacia el ambiente. Su diseño y construcción es una actividad continua que finaliza solamente cuando toda la capacidad disponible o permitida del sitio ha sido colmatada con RSU [54]. Una vez que se alcanza una de estas condiciones, se da inicio al proceso de clausura del relleno sanitario y, posteriormente, a las tareas de monitoreo y mantenimiento del mismo.

Las barreras mencionadas representan entonces las interfaces entre los depósitos de RSU y el ambiente, generalmente asociadas con la atmósfera y el subsuelo. Por

ello, la transferencia de masa advectiva y difusiva es controlada por estas barreras. En particular, se pueden distinguir dos tipos principales [12]:

- **Cobertura superior:** regula la transferencia de masa entre la atmósfera y el depósito de RSU mediante el control de la entrada de agua al sistema en forma de precipitaciones, irrigación, deshielo, entre otros y la minimización de la dispersión de emisiones gaseosas.
- **Barrera basal:** regula la transferencia de masa entre el depósito de RSU y el subsuelo, minimizando tanto la intrusión de aguas subterráneas como la dispersión de los lixiviados, y maximizando su captación mediante los sistemas de drenaje.

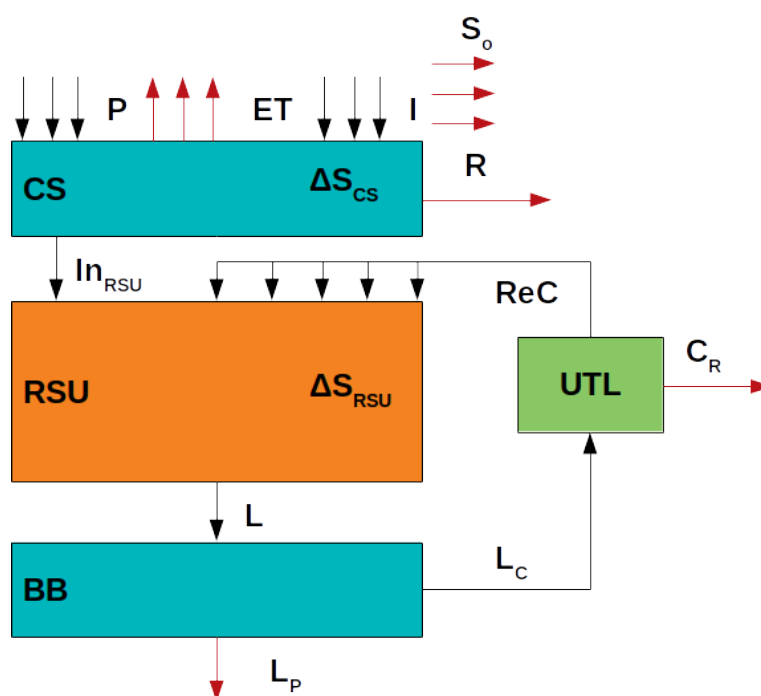


Figura 4.1: Esquema del flujo de materia en fase líquida en un relleno sanitario. CS = Cobertura Superior; BB = Barrera Basal; UTL = Unidad de Tratamiento de Lixiviados. Los flujos se detallan en la Sec. 4.1.2. **Fuente:** Elaboración propia.

En la Fig. 4.1, se presenta un esquema del flujo de materia en fase líquida en un relleno sanitario una vez que el mismo ha sido clausurado. Independientemente de la calidad de la instalación de las barreras correspondientes, cualquier depósito de RSU en el suelo se comporta como un reactor de tres fases. El agua y el aire ingresan al reactor como entradas externas. Dependiendo del tipo de RSU dispuestos en el relleno sanitario, se producen diversos tipos de reacciones físico-químicas y biológicas que contribuyen a su degradación y, en consecuencia, se generan y emiten gases y líquidos. Tanto la cinética de estas reacciones como el transporte de compuestos a través del RSU dependen fuertemente del contenido de agua y su movimiento en el cuerpo del

relleno. Debido a esto, una parte fundamental del diseño de rellenos sanitarios está asociada a la caracterización hidrológica del sistema de cobertura superior, relleno y barrera basal propuesto, siendo éste el punto de principal interés del presente Capítulo.

4.1.1. Generación de lixiviados

En el contexto de este PFI, se entiende por lixiviado a aquel fluido en estado líquido que ha percolado a través de las capas de RSU en un relleno sanitario y que ha extraído contaminantes de él ya sea por disolución o suspensión. En general, los lixiviados se encuentran compuestos de fluidos que ingresan al sistema de fuentes externas, como son las precipitaciones, irrigación, o bien desde el agua producida del metabolismo de los microorganismos que degradan a los RSU [55].

Los lixiviados son el resultado entonces de dos fenómenos principales que ocurren dentro de un relleno sanitario: la infiltración de agua en la masa de RSU depositada, y la transferencia de masa de sustancias desde los RSU hacia el agua que filtra. Estos dos fenómenos impulsan la mayoría de los desafíos técnicos y ambientales en la ingeniería de rellenos sanitarios. La generación de lixiviados influye tanto en el diseño como en el manejo de estas obras de ingeniería, incluyendo particularmente los siguientes aspectos: balance hídrico para las reacciones bioquímicas cuando se realiza la disposición final de RSU biodegradables; solubilización y remoción de contaminantes del relleno sanitario; diseño y tecnologías implementadas en las coberturas basales y finales; manejo de lixiviados (recirculación, tratamiento, etc.); operación y apariencia del sitio post-clausura [12].

Como se mencionó previamente, los lixiviados representan una de las principales emisiones de los rellenos sanitarios; por lo que, las prácticas de diseño actuales están orientadas a minimizar dichas emisiones no controladas para proteger las fuentes de aguas superficiales y subterráneas. Sin embargo, en forma paralela a lo planteado anteriormente, se entiende que el flujo de lixiviados transporta y hace circular sustancias orgánicas y nutrientes biodegradables a través del cuerpo del relleno sanitario, contribuyendo a acelerar la degradación biológica de los RSU y, por consiguiente, se propicia la estabilización de dicho sistema. Por ello, los procesos adecuados de extracción, tratamiento y recirculación de lixiviados pueden proporcionar una contribución sustancial al concepto de relleno sanitario sostenible al controlar la generación y remover los contaminantes solubles, evitando al mismo tiempo las pérdidas al ambiente. De esta forma, se logra en un período temporal correspondiente a una generación un estado de repositorio geológico de sustancias inorgánicas y residuos orgánicos no degradables en el relleno sanitario [12].

El conocimiento de los mecanismos de generación de lixiviados es fundamental para evaluar adecuadamente y abordar diferentes aspectos del diseño y la gestión de sitios

de disposición final. En este sentido, se requieren modelos predictivos de generación de lixiviados para definir, diseñar y dimensionar las obras, los cuales están conectados con todos los aspectos antes mencionados [12].

4.1.2. Balance hidrológico

Los principales factores que regulan la generación de lixiviados en rellenos sanitarios pueden agruparse en [12]:

- **Factores climáticos:** incluye la frecuencia e intensidad de las precipitaciones, la temperatura y la radiación solar. Generalmente, las precipitaciones se constituyen como el principal factor contribuyente a la generación de lixiviados y, por ello, es usual estimar los lixiviados generados como una fracción de las precipitaciones del sitio.
- **Características del relleno sanitario:** aquellas que afectan a la producción de lixiviados son la forma del relleno sanitario, la composición de los materiales y las pendientes de las estructuras de la cobertura superior, los procedimientos de deposición y la compactación de los RSU.
- **Características de los RSU:** estos afectan principalmente la calidad del lixiviado generado; sin embargo, es importante mencionar el efecto sobre la generación de los mismos de: la densidad de los RSU, la distribución del tamaño de partículas que lo componen, el contenido de humedad y los parámetros hidráulicos específicos de los mismos.
- **Procesos en el cuerpo del relleno sanitario:** en particular, refiere a los procesos biológicos de degradación de los RSU que producen o consumen agua; el asentamiento del relleno sanitario con el paso del tiempo que puede favorecer el movimiento de agua a través de los poros; y, la generación de calor durante el proceso de degradación que puede promover la evaporación de agua que posteriormente puede ser removida del relleno sanitario mediante los sistemas de venteo.

Las ecuación (4.1) describe el balance hídrico para la cobertura superior de un relleno sanitario,

$$\Delta S_{CS} = P + I - ET - R - S_o - In_{RSU}, \quad (4.1)$$

es decir, el *cambio en el almacenamiento de agua de la cobertura superior* (ΔS_{CS}) es igual al balance entre la suma de las entradas asociadas a las *precipitaciones* (P) y la *irrigación* (I), y la suma de las salidas, que incluyen los términos de *evapotranspiración*

(ET), la *escorrentía superficial* (S_o), el *flujo de agua subsuperficial saliente* (R), y la *infiltración efectiva hacia el cuerpo del relleno sanitario* (In_{RSU}) [12].

Para el cuerpo del relleno sanitario, la ecuación que describe el balance hidrológico se presenta a continuación:

$$\Delta S_{RSU} = In_{RSU} + ReC - L, \quad (4.2)$$

en la cual se plantea que el *cambio en el almacenamiento de agua en los RSU* (ΔS_{RSU}) es igual al balance entre la suma de las entradas, In_{RSU} y la *recirculación de lixiviados* (ReC) menos la *generación de lixiviados* (L) [12]. En este caso, es importante notar que ΔS_{RSU} se encuentra compuesta, a su vez, por dos términos: el *balance entre la producción y el consumo de agua ocasionado por los procesos bioquímicos* (ΔS_{bio}) y el *cambio en el contenido de agua en los RSU* (ΔS_w).

De la combinación de las ecuaciones (4.1) y (4.2) y despejando para L , se obtiene la ecuación que permite estimar la generación de lixiviados en un relleno sanitario:

$$L = P + I + ReC - R - S_o - ET - \Delta S_{CS} - \Delta S_{RSU}. \quad (4.3)$$

Finalmente, el total de lixiviados generados, L , puede separarse en la fracción que será captada por los sistemas de drenaje dispuestos en el relleno sanitario, L_C , y la fracción que se pierde como emisión no controlada a través de la barrera basal, L_p . En un relleno sanitario moderno, estas emisiones así como la intrusión de agua subterránea a las capas de RSU se intentan minimizar mediante el uso de barreras de baja permeabilidad en conjunto con sistemas de drenaje adecuados [12].

Por otra parte, la fracción denominada L_C es típicamente desviada a una Unidad de Tratamiento de Lixiviados (UTL, en la Fig. 4.1), a partir de la cual se obtiene la fracción a recircular, ReC , con una carga de contaminantes reducida luego de los tratamientos adecuados y una fracción de contaminantes removidos, C_R . La recirculación de lixiviados puede ser utilizada para asegurar tanto un contenido de humedad adecuado como la disponibilidad de nutrientes en las capas de residuos para propiciar la degradación biológica de los mismos [12].

4.1.3. Contenido de agua de los RSU

El contenido de agua de un relleno sanitario varía en el tiempo debido a los procedimientos implementados para la disposición de los RSU, los procesos de manejo del relleno sanitario (ej.: recirculación de lixiviados), a la compactación y a la degradación de los RSU.

La determinación del contenido de agua en estas obras de ingeniería y su capacidad de acumular y retener dicho fluido permite estimar el tiempo requerido para que se

produzca la generación del lixiviado y para que éste fluya hacia el sistema de drenaje. Por ello, para describir estas propiedades de los RSU dispuestos en un relleno sanitario dado, se deben tener en cuenta parámetros hidráulicos típicos del movimiento de fluidos a través de medios porosos que fueron presentados con anterioridad en este PFI: contenido de agua inicial de los RSU al momento de ser recibidos en el sitio para su disposición final, la capacidad de campo y el contenido de agua saturado. Cabe aclarar que, en el caso de los RSU, en ocasiones se prefiere el término capacidad de adsorción en lugar de capacidad de campo. Esto se debe a que, a diferencia del suelo, las capas de RSU suelen ser heterogéneas lo cual favorece que el fluido infiltre previo a que se alcance la capacidad de campo a través de rutas preferenciales en la masa de RSU [12].

En lo que respecta a los mecanismos de retención de agua, en los RSU, se deben tener presente la adsorción física, que implica la retención de agua debido a fuerzas capilares, y la adsorción aparente, que está asociada a la retención de fluido en espacios vacíos los cuales generan ZS localizadas.

El contenido inicial de agua de los RSU suele estar lejos de la capacidad de adsorción; por lo que, después de la disposición final, los RSU pueden continuar adsorbiendo agua que infiltra a través de las capas superiores. Cuando se alcanza la capacidad de adsorción, comienza a producirse la percolación y el agua se mueve hacia el interior del perfil bajo la influencia de la fuerza gravitatoria. Las capas de RSU más profundas en el perfil son susceptibles de alcanzar el contenido de agua saturado cuando el nivel de lixiviados aumenta [12].

4.1.4. Componentes básicos de las coberturas superiores y las barreras basales

Los materiales utilizados para construir las barreras de los rellenos sanitarios poseen una vida útil limitada; por lo que, a largo plazo, perderán sus propiedades y su eficacia. Por esta razón, la protección medioambiental ofrecida por un relleno sanitario no debe depender de barreras físicas de contención únicamente. En el contexto de este tipo de obras de ingeniería pensadas como sistemas de barreras múltiples (o multi-barrera), su función debe ser la de proporcionar un desempeño eficiente al contener la emisión de contaminantes durante el tiempo requerido por otras capas del sistema para reducir el potencial de emisión de los residuos depositados durante el período de vida útil de los materiales que la componen [12].

Por ello suelen emplearse sistemas multi-capa con los siguientes componentes,

- una **barrera de baja permeabilidad**: tiene el objetivo de minimizar el flujo advectivo de los líquidos y gases asociados a los rellenos sanitarios;
- una **capa de drenaje**: promueve la captación y la remoción de los fluidos blo-

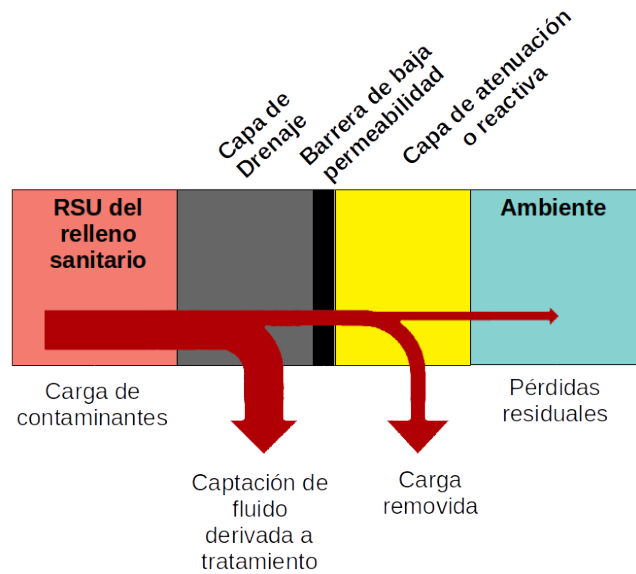


Figura 4.2: Esquema del rol de cada uno de los componentes principales de un sistema multicapa para cobertura superior o barrera basal en el control de las emisiones de los rellenos sanitarios. **Fuente:** Adaptación de Cossu & Stegmann [12].

queados por la barrera de baja permeabilidad mediante flujo lateral, por lo que, evitan las acumulaciones de los fluidos en la capa de RSU; y,

- una **capa reactiva**: su objetivo es el de atenuar la carga de contaminantes asociados con los lixiviados y los gases generados.

Cada uno de estos componentes juegan un rol específico en controlar las emisiones potenciales no controladas de contaminantes, siguiendo los principios ilustrados en la Fig. 4.2.

En la medida de lo posible, las barreras basales deben ser impermeables al lixiviado y al biogás, deben incluir sistemas de drenaje y captación de lixiviados y deben proveer de sistemas de drenaje para el control de la migración del biogás, particularmente en la dirección de la pendiente. La capa de atenuación tiene la función de reducir las cargas de contaminante asociadas con el flujo difusivo que ocurren a través de las barreras de baja permeabilidad. Además, las barreras basales deben estructurarse para brindar protección mecánica a los diferentes componentes, soporte a la masa de residuos y resistencia a la presión hidráulica esperada [12].

En la construcción de estos sistemas multicapa, se pueden utilizar diferentes tipos de materiales, ya sean naturales o sintéticos, en forma individual o formando compuestos, dependiendo de las funciones requeridas para cada capa. Entre los materiales naturales más ampliamente utilizados, se tienen: suelos de clase textural arcillosa, bentonita, arenas y gravas; mientras que, los categorías de geosintéticos utilizados en el diseño de rellenos sanitarios son: geomembranas, típicamente de polietileno de alta densidad (PEAD), geotextiles, geodrenes, geomallas, geocompuestos y tuberías [12].

Funciones de las diferentes componentes de los rellenos sanitarios

Las diversas funciones de las capas constitutivas de los rellenos sanitarios son [12]:

- **Revestimiento de contención:** esta es la principal función de un relleno sanitario y se basa en la utilización de materiales de baja permeabilidad. Entre ellos, cabe mencionar: geomembranas, mezclas de bentonita, suelo arcilloso compactado, geocompuestos.
- **Filtración de lixiviados:** esta debe ser homogénea a través de todo el perfil del relleno sanitario para evitar la acumulación de agua en la masa de RSU. Para este fin, es habitual la utilización de materiales de granulometría gruesa, como las gravas, tanto para las barreras basales como para las coberturas superiores.
- **Drenaje y captación de lixiviados:** para evitar su acumulación, los lixiviados deben ser transferidos directamente, lo más rápidamente posible, a través de los sistemas de drenaje y captación. Para este propósito, se utilizan materiales granulares de origen natural en combinación con tuberías de drenaje apropiadas.
- **Refuerzo del suelo:** es fundamental para consolidar la base y la pendiente del relleno sanitario para asegurar condiciones estables para la instalación del sistema de revestimiento. Las geomallas pueden ser convenientemente utilizadas como materiales para el soporte mecánico del suelo, geotextiles, geodrenes y geomembranas.
- **Protección mecánica:** en particular, los revestimientos sintéticos como las geomembranas deben protegerse mecánicamente de posibles perforaciones ocasionadas por objetos cortantes contenidos en los RSU, por la presión del material de drenaje granular y por la acción de vehículos y equipos móviles en el relleno sanitario. La protección mecánica de los geosintéticos se puede lograr mediante capas de arena o grava redondeada de tamaño pequeño. Estos materiales pueden ser acoplados o sustituidos por diferentes tipos de geosintéticos, tales como geotextiles o geocompuestos.
- **Separación:** cuando se combina materiales de distinto tamaño granulométrico, se debe proveer de una capa de separación para evitar la intrusión de un material en el otro. Para ello, los geotextiles no tejidos suelen ser los materiales más adecuados para este tipo de función.
- **Control de procesos erosivos:** la capa final de las coberturas superiores debe ser protegida en un principio contra la erosión hídrica y eólica. En estos casos, se pueden utilizar biomantos, como aquellos de fibra de coco, para proveer de soporte vegetal.

- **Filtración de agua:** puede ser necesario interceptar y desviar el agua (subterránea, superficial o precipitaciones) de la intrusión en el relleno sanitario a través de la barrera basal y de la cobertura superior. En este caso, se pueden utilizar materiales naturales, geotextiles tejidos y no tejidos y geocompuestos.
- **Drenaje y captación de agua:** el agua que infiltra debe ser removida para: evitar su intrusión en la capa de RSU, disminuir la presión hidráulica en las geomembranas y prevenir la acumulación de agua en general. Para tal fin, se pueden utilizar materiales granulares en combinación con tuberías y/o geodrenes.
- **Migración de biogás y control de emisiones:** el biogás generado en los rellenos sanitarios es extraído y captado mediante pozos específicos perforados en el relleno sanitario. Sin embargo, para controlar la migración lateral de biogás y las emisiones superficiales, se deben instalar capas de drenaje. Estas capas puede ser conectadas al sistema de extracción y transporte forzado de gas siempre que estos estén presentes y activos.
- **Atenuación de emisiones de biogás:** el biogás residual en rellenos sanitarios maduros, o las emisiones no controladas que no son interceptadas por sistemas de extracción y transporte de gas, pueden ser convenientemente atenuadas por capas activas instaladas dentro del sistema de barreras de la cobertura superior.
- **Atenuación de emisiones de lixiviados:** la atenuación de contaminantes orgánicos, amonio y metales pesados presentes en los lixiviados realizada por los suelos arcillosos ocurren en el interior de estas barreras minerales en mayor o menor medida dependiendo de la calidad del lixiviado y de las características individuales del suelo (ej.: su capacidad de intercambio catiónica). Los procesos de atenuación involucrados incluyen: adsorción, precipitación, intercambio iónico y biodegradación.

4.1.5. Normativa vigente

En Argentina, no hay actualmente disponible ningún tipo de lineamientos establecidos para el diseño de los sistemas multi-barrera de los rellenos sanitarios en lo que respecta a sus especificaciones técnicas asociadas a su caracterización hidrológica. Por ello, se contemplaron para el diseño del sistema multi-barrera los lineamientos presentados en las tablas 4.1 y 4.2 definidos por las Agencias de Protección Ambiental de diversos países para la barrera basal y la cobertura superior, respectivamente.

País	Tipo de Relleno Sanitario	Capa de drenaje de lixiviados	Capa impermeable adicional	Capa de baja permeabilidad
Italia	Residuos No Peligrosos	$\geq 0,5$ m	Obligatoria (geomembrana - contacto íntimo con la capa mineral compactada)	Capa mineral compactada ≥ 1 m, $K \leq 10^{-9}$ m s ⁻¹
Alemania	Clase I y II	$\geq 0,5$ m	Obligatoria (geomembrana)	Capa mineral compactada ≥ 1 m, $K \leq 10^{-9}$ m s ⁻¹
Reino Unido	Residuos No Peligrosos	$\geq 0,5$ m	Obligatoria (geomembrana)	Capa mineral compactada ≥ 1 m, $K \leq 10^{-9}$ m s ⁻¹
China	Residuos No Peligrosos	$\geq 0,3$ m	Obligatoria (geomembrana o geomembrana de arcilla bentonítica -GCL-)	Capa mineral compactada $\geq 0,75$ m, $K \leq 10^{-9}$ m s ⁻¹
Japón	Residuos No Peligrosos	$\geq 0,5$ m	Obligatoria (geomembrana - contacto íntimo con la capa mineral compactada)	Capa mineral compactada $\geq 0,5$ m, $K \leq 10^{-9}$ m s ⁻¹
Estados Unidos	Residuos No Peligrosos	Obligatoria (diseñada y construida para mantener un nivel de lixiviados sobre la capa $< 0,3$ m)	Capa de membrana flexible de al menos 0,8 mm de espesor o PEAD de al menos 1,5 mm de espesor	Suelo compactado $\geq 0,60$ m, $K \leq 10^{-9}$ m s ⁻¹

Tabla 4.1: Requerimientos legales para la barrera basal de rellenos sanitarios para residuos sólidos municipales no peligrosos en diversos países. **Fuente:** Adaptación propia a partir de Cossu & Stegmann [12].

País	Tipo de Relleno Sanitario			Capa superficial	Capa de drenaje de agua	Capa de baja permeabilidad	Capa de drenaje de biogás	Capa de ecualización
Italia	Residuos No Peligrosos			≥ 1 m	$\geq 0,5$ m	Capa mineral compactada $\geq 0,5$ m, $K \leq 10^{-8}$ m s ⁻¹	$\geq 0,5$ m	Obligatoria
Alemania	Clase I			Obligatoria	$\geq 0,3$ m, $K \leq 10^{-3}$ m s ⁻¹	Obligatoria	-	Obligatoria en algunos casos
Alemania	Clase II			Obligatoria	$\geq 0,3$ m, $K \leq 10^{-3}$ m s ⁻¹	Obligatoria	Obligatoria en algunos casos	Obligatoria en algunos casos
Reino Unido	Residuos No Peligrosos			≥ 1 m	$\geq 0,5$ m	Obligatoria	Obligatoria	-
China	Residuos No Peligrosos			Capa con nutrientes para la vegetación ($\geq 0,15$ m) sobre una capa de soporte ($\geq 0,45$ m, $K \geq 10^{-6}$ m s ⁻¹)	$\geq 0,3$ m, $K \geq 10^{-4}$ m s ⁻¹	<ol style="list-style-type: none"> 1. Geomembrana sobre una capa mineral compactada, $\geq 0,45$ m, $K \leq 10^{-7}$ m s⁻¹; o, 2. capa mineral compactada $\geq 0,90$ m, $K \leq 10^{-9}$ m s⁻¹; o, 3. geomembrana de PEAD o PEBD $\geq 1 - 1,5$ mm, $K \leq 10^{-14}$ m s⁻¹, vida útil ≥ 30 años 	$\geq 0,30$ m, tamaño de partícula entre 25-50 mm	-
Japón	Residuos No Peligrosos			$\geq 0,5$ m	-	-	-	-
Estados Unidos	Residuos No Peligrosos			Suelo de espesor $\geq 0,15$ m	-	Suelo de espesor $\geq 0,45$ m; K menor que el del sistema de capas subyacente, en cualquier caso $K \leq 10^{-7}$ m s ⁻¹	-	-

Tabla 4.2: Requerimientos legales para la cobertura superior de rellenos sanitarios para residuos sólidos municipales no peligrosos en diversos países. **Fuente:** Adaptación propia a partir de Cossu & Stegmann [12].

4.2. El modelo HELP

4.2.1. Descripción general

El modelo HELP (*Hydrologic Evaluation of Landfill Performance*) fue desarrollado originalmente en 1982 a pedido de la US-EPA para estimar el balance hídrico de rellenos sanitarios tanto en estado operativo como aquellos ya clausurados, haciendo especial énfasis en el análisis de los sistemas de barreras diseñados para la cobertura superior y la barrera basal de los mismos. Su fin principal es el de asistir a ingenieros y autoridades de regulación en la comparación de las diversas alternativas de diseño disponibles [24].

La versión 4.0 del HELP fue publicada en junio de 2020 y fue desarrollada por la Oficina de Investigación y Desarrollo/Centro de Soluciones Ambientales y Respuesta a Emergencias de la US-EPA (*ORD/CESER*, por sus siglas en inglés). Esta nueva versión fue desarrollada empleando macros en Microsoft Excel [14].

A partir de un conjunto de ecuaciones de balance y correlaciones semi-empíricas, HELP modela los siguientes procesos en función del tiempo en base diaria (paso de tiempo igual a un día) [24]:

- Precipitaciones, siendo este ingresado por el usuario a partir de una base de datos histórica del sitio, o bien generados sintéticamente mediante el modelo WGEN.
- Acumulación de precipitaciones como nieve en la superficie; el deshielo se modela a partir del enfoque de Anderson [56].
- Escorrentía superficial utilizando el método del número de curva del ex-Servicio de Conservación de Suelos de los EEUU.
- Evapotranspiración: la evapotranspiración potencial es calculada empleando un enfoque de Penman simplificado; mientras que, la evapotranspiración real (ET_a) es calculada principalmente con un enfoque de Ritchie [57], utilizando un modelo de crecimiento y descomposición de plantas para cultivos perennes y anuales de Arnold et al. [58]; la ET_a está compuesta por: evaporación desde la superficie de agua acumulada (usualmente evaporación del agua interceptada, nieve y deshielo), evaporación de agua del suelo, y transpiración de las plantas; la ET_a está limitada a la zona de evaporación del suelo la cual es especificada como un dato de entrada por parte del usuario.
- Infiltración/percolación vertical no saturada para un espacio intersticial sin detalle espacial (un único volumen por capa), lo cual implica que el flujo a través de los macroporos no es considerado en forma separada; la conductividad hidráulica bajo condiciones de no saturación se calcula con el modelo de Brooks & Corey

[27] para un espacio intersticial con una distribución de tamaño de poros unimodal; en el cálculo del gradiente hidráulico, el potencial capilar es despreciado, excepto en la zona de evaporación (capa superior).

- Drenaje lateral saturado basado en el modelo de McEnroe & Schroeder [59].
- Infiltración/percolación saturada a través de las barreras de suelo basado en la ley de Darcy.
- Flujo a través de las geomembranas, ya sea a través de orificios producidos en el proceso de fabricación o bien por defectos en la instalación y por difusión de vapor, y flujo a través de los sistemas de revestimientos compuestos que consisten en una barrera mineral de suelo ya sea superpuesta o subyacente a una geomembrana basándose para ello en las correlaciones de Giroud y Bonaparte [60, 61].
- Suelo congelado siguiendo una modificación del modelo CREAMS [62] (sólo aplica a la zona de evaporación).

El modelo HELP se denota como “cuasi-bidimensional” debido a que varios procesos unidimensionales en la dirección vertical (precipitación, infiltración, evapotranspiración, percolación, etc.) son combinados con flujos laterales (escorrentía superficial, drenaje lateral). Sin embargo, estos procesos se cuantifican a través de relaciones integrales y correlaciones empíricas, sin modelar el flujo bidimensional empleando ecuaciones diferenciales. Por lo tanto, el flujo en la dirección vertical es modelado sin tener en cuenta la variación espacial dentro de cada capa. Esto quiere decir que cada capa se comporta como un volumen de control. Los procesos de flujo lateral se modelan directamente como salidas. Si bien no hay subdivisión en volúmenes en la dirección lateral, el drenaje es dependiente en la máxima distancia al drenaje colector. El flujo dentro de la capa superior del suelo y el flujo lateral no saturado a lo largo de una interfaz inclinada de una capa con un tamaño de poro fino suprayacente a una capa con un tamaño de poro grueso (efecto de barrera capilar) no son consideradas en el modelo HELP [24].

HELP permite modelar diversos tipos de diseños: especialmente cubiertas simples (ej.: capa de suelo con vegetación), sistemas de barreras estándar para la cobertura superior y la barrera basal de rellenos sanitarios tales como se especifican en las normativas y regulaciones de diversos países y también sistemas multi-capas en las cuales se especifica una secuencia de capas. Este tipo de barreras suele incluir una capa de baja permeabilidad como una barrera mineral de baja conductividad hidráulica (ej.: arcilla compactada), una geomembrana o bien, una barrera compuesta de una geomembrana suprayacente o subyacente a una barrera mineral. Tanto la secuencia de capas con

sus propiedades hidráulicas como el tipo de vegetación especificados por el usuario, se mantienen constantes durante el período de tiempo simulado [24].

En cuanto a la cobertura vegetal, el único tipo de vegetación modelada por HELP son pasturas. Alternativamente, se puede especificar suelo desnudo. Las pasturas son usualmente la vegetación de la que se provee a las coberturas de rellenos sanitarios en climas templados. Sin embargo, se ha discutido en la literatura la restauración de rellenos sanitarios utilizando vegetación típica de bosques de la zona en lugar de pasturas. Este tipo de vegetación posee varias ventajas con respecto a las pasturas, principalmente las altas tasas de evapotranspiración (particularmente, alta evaporación del agua interceptada). Más aún, en un sitio específico, un bosque podría suponer una opción más adecuada para acompañar el paisaje de la zona, o bien podría ser el estadio final de la sucesión natural. Por otra parte, también deben considerarse sus desventajas, tales como: la mayor dificultad en el control y la reparación de la cubierta y los posibles riesgos como la erosión eólica en etapas iniciales o la penetración de raíces y la desecación de las capas de barrera arcillosa [24].

4.2.2. Configuración del problema

El modelo de movimiento de agua en un relleno sanitario que utiliza HELP se esquematiza en la Fig. 4.3. El relleno se estructura en una secuencia de capas agrupadas en tres subperfiles (CS, RSU y BB) que a su vez suelen estar compuestos por sistemas multicapa. En HELP se pueden definir tres tipos de capas de acuerdo su rol hidráulico: percolación vertical, drenaje lateral o barrera (ver Fig. 4.3). En las capas de drenaje lateral de la cobertura superior, el agua escurre a través del medio poroso, mientras que en la barrera basal, estas capas suelen tener un sistema de drenaje con superficies de captación y tubos colectores. La longitud de estas superficies de captación y su ángulo de inclinación son parámetros de diseño especificados por el usuario. Por su parte, las barreras impermeabilizantes pueden estar compuestas por geomembranas, compuestos minerales de baja conductividad o una combinación de ambos.

La configuración del código para hallar la evolución temporal de estos flujos (excepto la precipitación que es un dato de entrada) y el almacenamiento de agua en el relleno requiere tres conjuntos de datos:

1. Definición del perfil del relleno como una secuencia de capas con espesores y propiedades hidráulicas predefinidas (dominio). La definición de los distintos perfiles del relleno evaluados en este capítulo se detallan en la Sec. 4.3.1.
2. Información del forzado ambiental (precipitación y datos para estimar la evapotranspiración) para determinar el ingreso de agua por el extremo superior del perfil (condición de contorno). Los datos meteorológicos cargados en HELP se

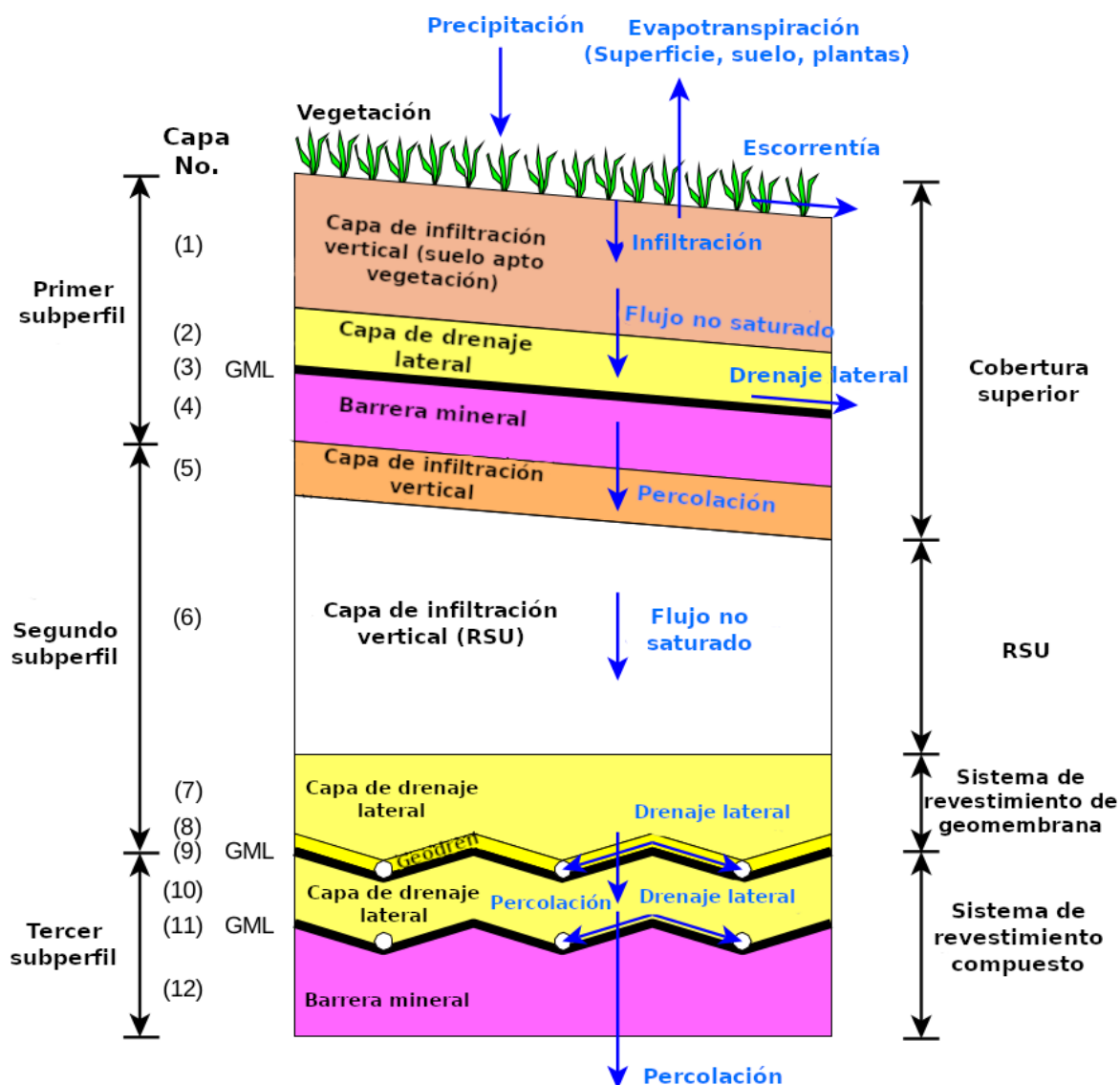


Figura 4.3: Esquema del modelo de capas de un relleno sanitario implementado en el código HELP. Fuente: Adaptación de [13].

describen en la Sec. 4.3.2.

3. Dimensiones (volumen y altura de RSU) y pendiente del relleno. Esta información permite convertir los flujos por unidad de área (como los realizados en el Capítulo 3) a caudales en m^3 que permitan diseñar los sistemas de drenaje y tratamiento, así como también estimar qué fracción del flujo percola y qué fracción drena lateralmente. Las elecciones tomadas para el dimensionamiento del relleno se enumeran en la Sec. 4.3.3.

4.2.3. Supuestos y limitaciones

El procedimiento de modelado del HELP considera varios supuestos a modo de simplificación. En general, estos supuestos son razonables y consistentes con los objetivos del programa cuando este es aplicado a diseños de rellenos sanitarios estándar. Sin embargo, algunos de estos pueden no ser razonables para diseños inusuales. Los principales supuestos y limitaciones del programa se presentan resumidos a continuación.

Escorrentía superficial

En el modelo HELP, la escorrentía se calcula empleando el método estándar denominado en inglés *runoff curve number method* del ex-Servicio de Conservación del Suelo de los Estados Unidos (ex-SCS), el cual se basa en valores diarios de precipitaciones y deshielo [63]. El programa supone que las áreas adyacentes al relleno sanitario no drenan hacia el sitio en el cual éste se encuentra emplazado. Sumado a ello, no se considera la distribución temporal de la intensidad de las precipitaciones. El programa no brinda estimaciones precisas respecto a los valores de escorrentía para eventos de tormentas individuales debido a que se basa en datos de precipitaciones diarios. Sin embargo, debido a que la relación de precipitaciones-escorrentía de la ex-SCS es determinada a partir de un número de datos de campo diarios considerables, las estimaciones a largo plazo de la escorrentía deberían ser razonables [13, 14].

El método de la ex-SCS no considera explícitamente la longitud y la pendiente de la superficie sobre la cual ocurre el flujo superficial. Esta limitación ha sido superada mediante el desarrollo e implementación en la rutina de datos de entrada del código HELP de un procedimiento de cálculo de los números de curva de escorrentía que tienen en consideración el efecto de los dos parámetros mencionados. En HELP v4.0, se provee de dos métodos de cálculo que tratan dicha limitación, denotados como Modelo 2 y 3 en la interfaz de usuario. Sin embargo, esta limitación continúa estando presente cuando el número de curva es directamente especificado por el usuario, al seleccionar el Modelo 1. Esta limitación no constituye un problema cuando la pendiente y la longitud en la dirección de la misma no difieren drásticamente de aquellas a partir de las cuales se basa el método de la ex-SCS para la elaboración de las curvas de prueba. El uso del método de la ex-SCS subestima la escorrentía cuando la longitud sobre la cual ocurre el flujo superficial es muy pequeña, cuando la pendiente es muy pronunciada o cuando la duración de la precipitación es muy corta y su intensidad muy alta [13, 14].

Flujo de agua y lixiviados

El modelo HELP supone flujo Darciano por influencia de la gravedad a través de capas homogéneas de suelo y RSU. No considera explícitamente flujo preferencial a través de macroporos, es decir, grietas, raíces y madrigueras de animales. El programa

permite la ocurrencia de flujo vertical no saturado únicamente cuando el contenido de agua se encuentra por encima de la capacidad de campo. Se supone que la tasa de drenaje que sale de un dado segmento es igual a la conductividad hidráulica no saturada del segmento para su contenido de agua correspondiente, dado que el segmento subyacente no sea una barrera y que no se encuentre saturado [13, 14].

Además de estos dos casos particulares, la tasa de drenaje saliente de un dado segmento puede verse limitada por la conductividad hidráulica saturada del segmento subyacente. Cuando este límite es alcanzado, el programa calcula un gradiente efectivo para flujo saturado a través del segmento inferior. Esto permite que las capas de percolación vertical o drenaje lateral se dispongan sin restricciones en sus propiedades siempre que se comporten como lo implica la descripción de la capa y no como barreras minerales o geomembranas [13, 14].

El modelo supone además que las propiedades de retención de agua del suelo y la conductividad hidráulica no saturada pueden ser calculadas a partir de la conductividad hidráulica saturada y de un conjunto acotado de parámetros de la curva de retención de agua del suelo (porosidad, capacidad de campo y punto de marchitez permanente). En adición a esto, se supone que las propiedades de retención de agua del suelo se ajustan a la relación propuesta por Brooks & Corey [27] definida por los tres parámetros de la curva de retención de agua mencionados. Al obtenerse dichos parámetros, el modelo asume que la relación de la conductividad hidráulica no saturada con el contenido de agua del suelo se encuentra bien descrita por la ecuación de Brooks & Corey [27] [13, 14].

El modelo no calcula explícitamente el flujo por gradientes de succión del suelo y, por consiguiente, no modela el movimiento de agua ascendente debido al fenómeno de capilaridad. Este ascenso del agua es modelado en períodos secos como extracción en vez de como transporte de fluido hacia arriba. Por ello, es importante que la profundidad de la zona de evaporación sea especificada como la profundidad de secado por capilaridad. El drenaje por succión del suelo, que es ejercido por aquellas capas más secas que se encuentran a mayor profundidad en el perfil del relleno sanitario, es modelado como flujo Darciano para cualquier suelo que posea un contenido de humedad relativo mayor que el de las capas subyacentes a él. La tasa de drenaje es igual a la conductividad hidráulica no saturada calculada como una función del contenido de agua del suelo. De tal forma, se supone que la tasa es independiente del gradiente de presión [13, 14].

Pérdidas a través de las barreras minerales y geomembranas

Las pérdidas a través de las barreras de suelo de baja permeabilidad o de arcillas es modelado como flujo saturado de acuerdo a la Ley de Darcy. Se supone que dichas barreras minerales se encuentran saturadas en todo momento y que las pérdidas a través

de ellas ocurrirán solamente cuando haya un potencial de presión positivo encima de la barrera. El modelo supone que el potencial que impulsa la percolación puede ser representado con el valor promedio del potencial a través de toda la barrera y que puede ser estimado a partir del almacenamiento de agua en el suelo. También se supone que la barrera subyace a toda el área del relleno sanitario y, por consiguiente, cuando ocurren pérdidas, se considera que las mismas ocurren sobre todo el sitio de disposición final. El modelo no considera el envejecimiento o el secado de la barrera mineral; por lo que, la conductividad hidráulica de dicha barrera no varía en función del tiempo [13, 14].

En cuanto a las geomembranas, se asume que estas sufren pérdidas principalmente a través de orificios. El flujo asociado a las pérdidas ocurre a través de estos orificios y se extiende entre la geomembrana y el suelo hasta que se disipa el potencial de presión. Posteriormente, estas pérdidas percolan a través del suelo a una tasa que depende de la conductividad hidráulica saturada y del gradiente de presión. Debido a esto, el efecto neto de la geomembrana es el de reducir el área de percolación a través del sistema multi-barrera. Al igual que lo mencionado para la barrera mineral, el modelo no contempla el envejecimiento de la geomembrana y por consiguiente el número y el tamaño de los orificios no varía como una función del tiempo. En adición a esto, se supone que el potencial sobre los orificios puede ser representado por el valor promedio de dicho parámetro en todo el revestimiento y que puede ser estimado a partir del almacenamiento de agua en el suelo. Finalmente, se supone que la geomembrana se encuentra cubriendo la totalidad del área del relleno sanitario [13, 14].

Drenaje lateral

El modelo de drenaje lateral se basa en el supuesto de que el perfil de profundidad saturado es característico del perfil de estado estacionario para la profundidad de saturación promedio dada. De esa forma, el modelo supone que la tasa de drenaje lateral para drenaje en estado estacionario a una profundidad promedio de saturación específica es representativa de la tasa de drenaje lateral transitoria para la misma profundidad saturada promedio. Sin embargo, la tasa de drenaje lateral transitoria será relativamente mayor en períodos en los que la profundidad de la capa saturada está aumentado y relativamente más pequeña para los períodos en que la capa está disminuyendo. El drenaje estacionario implica que la condición de saturación se da por encima de la superficie de la barrera en toda su extensión, lo cual está en concordancia con los supuestos realizados para pérdidas en barreras minerales o geomembranas [13].

La ecuación de drenaje lateral fue desarrollada para el rango especificado en el diseño de rellenos sanitarios destinados a la disposición final de residuos peligrosos. Los rangos permisibles para la pendiente de la capa de drenaje van entre 0-50 %. Debido a

la estructura adimensional de la ecuación de drenaje lateral, no existen límites prácticos en lo que respecta a la longitud máxima de drenaje. El modelo no puede simular un quiebre capilar o un drenaje lateral no saturado y, por consiguiente, no puede simular barreras capilares [13].

Crecimiento vegetal

El modelo supone que el crecimiento y la descomposición vegetal puede ser caracterizado por el modelo desarrollado para cultivos y pasturas perennes. Sumado a ello, se supone que la cobertura vegetal: transpira, cubre a la superficie del suelo, intercepta a las precipitaciones y reduce la escorrentía en cantidades similares a las pasturas o como una equivalencia ajustada por medio del índice de área foliar (*LAI*, por sus siglas en inglés) [13, 14].

Datos de diseño de coberturas

Cabe mencionar que el modelo HELP proporciona valores predeterminados para las características del suelo con los cuales puede especificarse el perfil basándose en las clases texturales propuestas por la USDA. El origen de dichos valores, junto con valores de referencia de geosintéticos, se encuentran descritos en la Documentación Técnica de HELP [64]. Sumado a ello, en cuanto a los parámetros a brindar al código HELP asociados a los orificios en las geomembranas debido a fallas en la fabricación o instalación de las mismas, los valores sugeridos para diversas condiciones pueden encontrarse en Berger & Schroeder [13]. Finalmente, los valores predeterminados para los coeficientes de evaporación del suelo se basan en resultados experimentales, siendo descripta la base del cálculo de estos valores también en Berger & Schroeder [13].

Datos meteorológicos

El código HELP provee de un generador de datos meteorológicos denominado WGEN. Se supone que las precipitaciones, la temperatura del aire y la radiación solar generados sintéticamente son representativos del clima del sitio. La temperatura diaria generada es una función de la temperatura mensual promedio normal y de la ocurrencia de precipitaciones. Mientras que, la radiación solar diaria generada es una función de la latitud, la ocurrencia de precipitaciones, el promedio diario de radiación solar en un día seco y el promedio diario de la radiación solar en un día húmedo [13].

Es importante mencionar además que una limitación que presenta el generador de datos meteorológicos es que está desarrollado principalmente para las latitudes correspondientes al hemisferio norte y validado originalmente para EEUU y Canadá [64]. Por lo que, hasta el momento, su uso en el hemisferio sur puede realizarse únicamente

mediante la provisión de datos de entrada históricos para las variables meteorológicas mencionadas.

4.3. Diseños de rellenos sanitarios evaluados mediante HELP

En esta sección se describen los diseños de cobertura superior y barrera basal, cuyos flujos de agua se calcularon mediante la versión 4.0 del programa HELP. También se detalla la obtención de los datos meteorológicos y ambientales relacionados al cálculo de la evapotranspiración y las precipitaciones. Finalmente, se presentan los lineamientos seguidos para el dimensionamiento del cuerpo del relleno.

4.3.1. Diseños de barrera basal y cobertura superior considerados

Estudiamos en forma independiente 5 diseños de barrera basal y 3 diseños de coberturas superior, algunos de barrera única y otros con estructura multi-capa. Los valores de los parámetros hidráulicos correspondientes a los tipos de textura utilizados en distintas capas fueron tomados de la base de datos del HELP v4.0 [14], e identificados por el número de textura según se detalla en la Tabla 4.3.

N° Textura HELP	Descripción	θ_s [vol vol ⁻¹]	θ_{CC} [vol vol ⁻¹]	θ_{PMP} [vol vol ⁻¹]	K_s [cm s ⁻¹]
1	Arena gruesa	0,417	0,045	0,018	$1,00 \cdot 10^{-2}$
6	Suelo franco-arenoso	0,453	0,190	0,085	$7,20 \cdot 10^{-4}$
9	Suelo franco-limoso	0,501	0,284	0,135	$1,90 \cdot 10^{-4}$
17	Bentonita	0,750	0,747	0,400	$3,00 \cdot 10^{-9}$
18	RSU	0,671	0,292	0,077	$1,00 \cdot 10^{-3}$
20	Geodren	0,850	0,010	0,005	$1,00 \cdot 10^{-1}$
21	Grava	0,397	0,032	0,013	$3,00 \cdot 10^{-1}$
25	Suelo franco-arcilloso	0,437	0,373	0,266	$3,60 \cdot 10^{-6}$
29	Suelo arcilloso	0,451	0,419	0,332	$6,80 \cdot 10^{-7}$
35	Geomembrana PEAD	-	-	-	$2,00 \cdot 10^{-13}$

Tabla 4.3: Valores de los parámetros hidráulicos proporcionados por la base de datos del HELP v4.0 para las diversas capas utilizadas en el diseño de las coberturas superiores y las barreras basales. **Fuente:** Adaptado de Tolaymat & Krause [14].

Previo a la descripción de los diversos sistemas de coberturas basales y superiores propuestas, es importante mencionar que sólo se consideran en el cálculo de flujos, según lo sugerido por la Documentación Técnica del HELP [64], las capas que tienen asociadas una función hidráulica específica. Por ello, los geotextiles, cuya función principal es típicamente la protección o soporte mecánico, no son incorporados en la descripciones de los perfiles a ser simulados. En cuanto a los espesores de cada una de las capas y los

materiales propuestos, se contemplaron los valores más conservativos para cada tipo de capa presentados en la tabla 4.1.

A continuación se describen los diseños considerados, y en la Sec. 4.4 se presentan los resultados obtenidos.

Barrera basal

A continuación, se presentan las configuraciones para la secuencia de los distintos componentes de los diseños de barrera basal propuestos. Estas configuraciones se presentan además en forma esquemática en la Fig. 4.4.

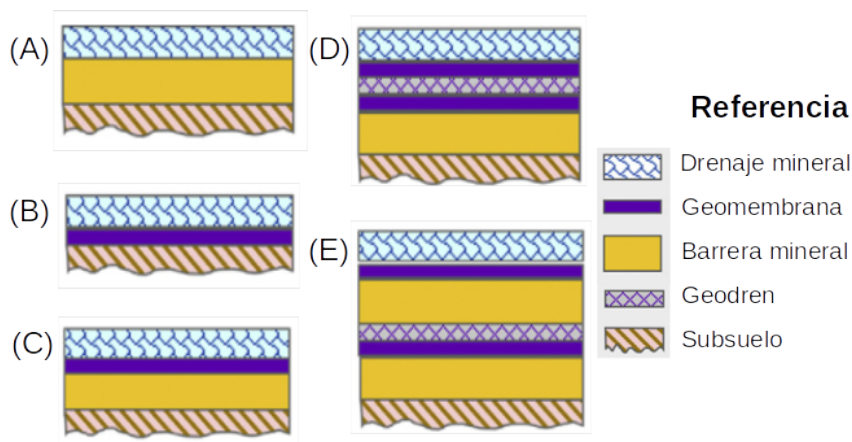


Figura 4.4: Esquemas de las diversas barreras basales propuestas para su caracterización hidrológica mediante el HELP v4.0. **Fuente:** Adaptado de Cossu & Stegmann [12].

- **(A) Barrera mineral única:** esta configuración es la más sencilla de todas y se presenta generalmente en rellenos sanitarios con un diseño de ingeniería no adecuado. Podría considerarse aceptable bajo condiciones hidrológicas seguras. Se considera recomendable típicamente un espesor mínimo de 1 m y un valor de $K \leq 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$ para la capa mineral. Para el diseño simulado, se consideraron:
 - barrera mineral: 1 m de espesor, textura de la base de datos del HELP N° 17;
 - geotextil no tejido;
 - drenaje mineral: 0,5 m de espesor, textura N° 21.
- **(B) Revestimiento de geomembrana simple:** esta configuración, en lo que respecta a barreras basales, falla en proveer un sistema de seguridad alternativo ante posibles fallas en la geomembrana. Dicho sistema consiste en:
 - geomembrana de PEAD de 2 mm de espesor, textura N° 35;
 - geotextil no tejido;

- drenaje mineral: 0,5 m de espesor, textura N° 21.
- **(C) Barrera compuesta única (suelo arcilloso + geomembrana):** esta configuración es la más ampliamente utilizada para barreras basales y es prescrita por varios lineamientos de las normativas gubernamentales. En general, se especifica un valor mínimo para el espesor del revestimiento de arcilla de 1 m con un máximo de permeabilidad de 10^{-9} m s⁻¹ típicamente. Las geomembranas debe ser instalada en contacto directo con la barrera mineral sin ningún tipo de material de drenaje interpuesto entre ellas. Esto permite, en el caso de falla en la geomembrana, que el suelo arcilloso actúe sellando dicha rotura.
 - geotextil no tejido;
 - barrera mineral: 1 m de espesor, textura de la base de datos del HELP N° 17;
 - geomembrana de PEAD de 2 mm de espesor, textura N° 35;
 - geotextil no tejido;
 - drenaje mineral: 0,5 m de espesor, textura N° 21.
- **(D) Barrera doble semicompuesta:** la misma se encuentra compuesta por una barrera sintética doble suprayacente a una única barrera natural de suelo arcilloso o bentonita. Esta estructura tiende a combinar las ventajas de la barrera compuesta única y de la barrera sintética doble, proveyendo de un nivel adicional de seguridad al sistema. La eficiencia global de la configuración depende del comportamiento a largo plazo de la geomembrana.
 - barrera mineral: 1 m de espesor, textura de la base de datos del HELP N° 17;
 - geomembrana de PEAD de 2 mm de espesor, textura N° 35;
 - geodren de 5 mm de espesor, textura N° 20;
 - geomembrana de PEAD de 2 mm de espesor, textura N° 35;
 - geotextil no tejido;
 - drenaje mineral: 0,5 m de espesor, textura N° 21.
- **(E) Barrera compuesta doble:** esta configuración aprovecha al máximo la posibilidad de control de drenaje del sistema de doble revestimiento en barreras basales. Esta suele ser la alternativa más costosa y suele ser utilizada para rellenos sanitarios de residuos peligrosos. Sin embargo, recientemente ha aumentado su aplicación en rellenos sanitarios de RSU con el objetivo de minimizar cualquier impacto ambiental adverso, particularmente cuando la barrera geológica

natural es pobre o inexistente. Las ventajas de aumentar el grado de seguridad del sistema (detección de fugas de lixiviados, drenaje y recolección de lixiviados filtrados, reducción de la altura de presión en el revestimiento secundario con la consiguiente reducción del riesgo de lixiviación) se compensan con la mayor complejidad de la construcción.

- barrera mineral: 1 m de espesor, textura de la base de datos del HELP N° 17;
- geomembrana de PEAD de 2 mm de espesor, textura N° 35;
- geodren de 5 mm de espesor, textura N° 20;
- barrera mineral: 1 m de espesor, textura de la base de datos del HELP N° 17;
- geomembrana de PEAD de 2 mm de espesor, textura N° 35;
- geotextil no tejido;
- drenaje mineral: 0,5 m de espesor, textura N° 21.

La evaluación de las distintas propuestas de barreras basales fue realizada suponiendo que el relleno sanitario alcanzó su máxima capacidad, siendo las propiedades hidráulicas de la capa de RSU iguales a las de la textura N° 18 de la base de datos del HELP v4.0. En todos los casos, se considera la instalación de una capa de material mineral de textura franco-limosa de 0,50 m de espesor y textura N° 9 a modo de cobertura superior sin vegetación.

Cobertura superior

En cuanto a los diseños propuestos para la cobertura superior, se evaluaron las configuraciones de barreras que se describen a continuación y se presentan esquemáticamente en la Fig. 4.5 [12]:

- **(A) Cobertura de sellado:** está diseñado principalmente para prevenir la infiltración de agua en la masa de residuos, minimizar la generación de lixiviados y promover la recolección eficiente del gas generado, evitando así su emisión descontrolada al ambiente. La cobertura simulada consiste de las siguientes capas descritas en orden de disposición ascendente desde la capa de RSU hasta la superficie en contacto con el ambiente:
 - capa de suelo no clasificado ecualizadora de 0,5 m de espesor, textura N° 9;
 - capa mineral de drenaje de gas: compuesta por una capa de material clasificado como arena gruesa de entre 0,5 m de espesor, textura N° 1;

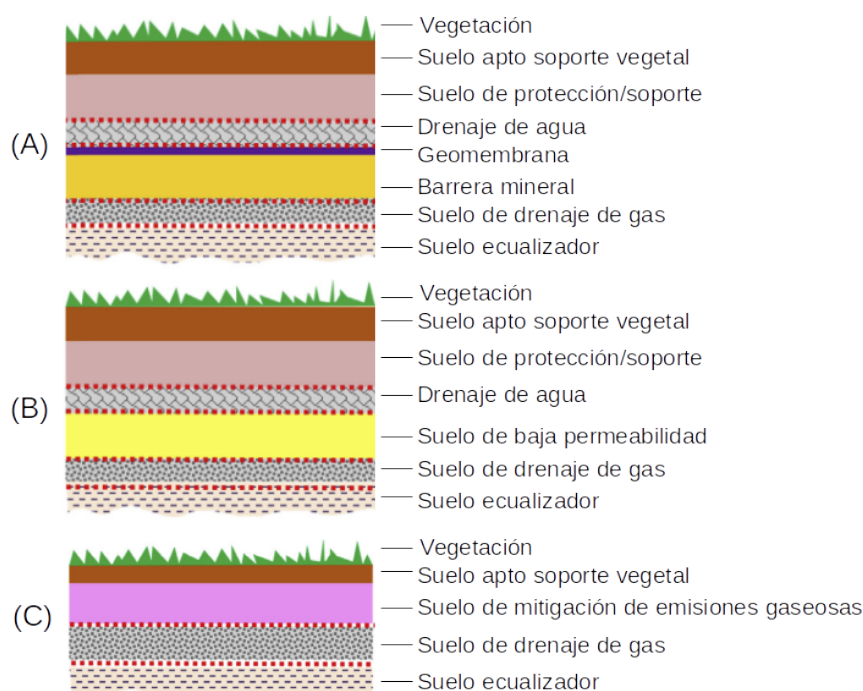


Figura 4.5: Esquemas de las diversas coberturas superiores propuestas para su caracterización hidrológica mediante el HELP v4.0. **Fuente:** Adaptado de Cossu & Stegmann [12].

- geotextil no tejido;
 - barrera mineral: 0,5 m de espesor, textura de la base de datos del HELP N° 17;
 - geomembrana de PEAD de 2 mm de espesor, textura N° 35;
 - geotextil no tejido;
 - capa de drenaje de agua: compuesta por grava de tamaño de partícula característica entre 16-32 mm y de 0,5 m de espesor, textura N° 21;
 - geotextil no tejido;
 - capa de suelo de protección/soporte de 0,5 m de espesor, textura N° 6;
 - capa de suelo apto para el soporte de la vegetación: espesor de 1,0 m y textura N° 9.
- **(B) Cobertura de baja permeabilidad:** presenta los mismos objetivos que los establecidos para la cobertura de sellado, pero permite una mayor infiltración de agua hacia las capas de RSU. Este sistema consiste de las siguientes capas descritas en orden de disposición ascendente desde la capa de RSU hasta la superficie en contacto con el ambiente:
- capa de suelo no clasificado ecualizadora de 0,5 m de espesor, textura N° 9;
 - capa mineral de drenaje de gas: compuesta por una capa de material clasificado como arena gruesa de entre 0,5 m de espesor, textura N° 1;

- geotextil no tejido;
- suelo de baja permeabilidad: espesor de 0,5 m, textura N° 29;
- geotextil no tejido;
- capa de drenaje de agua: compuesta por grava de tamaño de partícula característico entre 16-32 mm y de 0,5 m de espesor, textura N° 21;
- geotextil no tejido;
- capa de suelo de protección/soporte de 0,5 m de espesor, textura N° 6;
- capa de suelo apto para el soporte de la vegetación: espesor de 1,0 m y textura N° 9.

La combinación presentada previamente cumple con los requerimientos mínimos establecidos por las regulaciones de rellenos sanitarios italianas y alemanas.

- **(C) Cobertura permeable a gases - Biocobertura:** en este caso, el sistema consiste de las siguientes capas descritas en orden de disposición ascendente desde la capa de RSU hasta la superficie en contacto con el ambiente:
 - capa de suelo no clasificado ecualizadora de 0,5 m de espesor, textura N° 9;
 - geotextil no tejido;
 - capa mineral de drenaje de gas: compuesta por una capa de material clasificado como arena gruesa de entre 0,5 m de espesor, textura N° 1;
 - geotextil no tejido;
 - capa de suelo de mitigación de gas de 0,8 m de espesor compuesta por compost, textura N° 25;
 - capa de suelo apto para el soporte de la vegetación: espesor de 1,0 m y textura N° 9.

Para estos diseños de coberturas superiores, la evaluación de las distintas propuestas fue realizada suponiendo que la barrera basal instalada en el sitio se corresponde con una barrera compuesta única (tipo C, ver Fig. 4.4) y que la capa asociada a los RSU presenta las propiedades hidráulicas asociadas a la textura N° 18.

4.3.2. Datos meteorológicos

Para realizar la caracterización hidrológica de los distintos diseños de las coberturas superiores y de las barreras basales de rellenos sanitarios, es necesario incorporar datos meteorológicos del sitio. Si bien el HELP cuenta con la posibilidad de generar una serie

climática futura (para ubicaciones en el hemisferio norte), en este trabajo optamos por utilizar la serie histórica de los últimos 25 años.

En particular, para el caso de los valores diarios de precipitaciones y temperatura media, la información puede ser descargada de la página del NOAA correspondiente a los Centros Nacionales para la Información Ambiental [65]. Dicha solicitud de información se obtiene introduciendo las coordenadas del sitio de interés y seleccionando los datos de las estaciones meteorológicas más cercanas. Para este PFI, se descargaron los datos correspondientes a la estación del Aeropuerto Internacional Tte. Luis Candelaria para el período 1997-2020. Como ejercicio de validación, estos datos fueron posteriormente contrastados con los proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para el mismo sitio.

En cuanto a la radiación solar, se deben proporcionar los datos de entrada al modelo con el formato de los archivos de descarga de la base de datos de radiación solar del Laboratorio Nacional de Energías Renovables de los Estados Unidos (*NREL*, por sus siglas en inglés) [66]. En este caso, los datos históricos disponibles para descargar desde la página mencionada no cubrían la información para el área de estudio. Por ello, los datos de radiación solar fueron descargados a partir de la página referida a *The Power Project*, el cual es un proyecto impulsado por la NASA para la predicción acerca de los recursos energéticos a nivel mundial [67]. Para la descarga de datos en el período 1997-2020, se requirió simplemente el ingreso de las coordenadas del sitio. Particularmente, se seleccionó el parámetro correspondientes a *All sky insolation incident on a horizontal surface*, el cual en dicha plataforma se considera como la radiación solar total promedio diaria que incide sobre una superficie horizontal en la superficie terrestre [68]. Estos datos fueron posteriormente acondicionados siguiendo el formato de archivos de la NREL haciendo uso del lenguaje R.

Sumado a lo anterior, se debieron especificar los valores de la velocidad media del viento en la región y los valores de humedad promedio por trimestre. Estos fueron calculados a partir de los datos solicitados al SMN para la estación meteorológica del Aeropuerto Tte. Luis Candelaria. Los valores promedios calculados para el período 2000-2020 arrojan un valor promedio de la velocidad del viento de 20 km h^{-1} ; mientras que, los valores correspondientes a la humedad relativa se presentan en la tabla 4.4.

Período	Humedad relativa [%]
Ene-Mar	79,0
Abr-Jun	88,7
Jul-Sep	89,1
Oct-Dic	80,9

Tabla 4.4: Valores promedio para el período 2000-2020 de la humedad relativa para el Aeropuerto Internacional Tte. Luis Candelaria. **Fuente:** Elaboración propia a partir de datos brindados por el SMN.

Finalmente, el modelo HELP requiere el ingreso de datos para estimar el término de evapotranspiración asociado a la cubierta más externa que actúa como interfaz entre los RSU dispuestos en el relleno sanitario y la atmósfera. En esta línea, es necesaria la definición del período de crecimiento de las plantas en la región, la cual si bien varía para cada especie, puede ser establecida aproximadamente en el período comprendido entre el primer día de primavera y el último día de verano. Dado que se considera una cubierta superior con suelo de textura franco-limosa, la profundidad máxima de la zona sujeta al fenómeno de evaporación se fijó en 0,3 m de la superficie del relleno sanitario.

Para la determinación del término de transpiración, el código HELP requiere de la definición de las condiciones de la cobertura vegetal. En el caso de las evaluaciones de los sistemas de barreras basales, se consideró suelo desnudo dado que se desea realizar la caracterización hidrológica en las condiciones de mayor aporte de agua al sistema por infiltración. En cuanto al análisis de las coberturas superiores, se consideró que el relleno sanitario presentaría una cobertura vegetal de pasturas, cuyo valor máximo del índice de área foliar (LAI, por sus siglas en inglés) está definido en 2,0. Este valor se consideró adecuado para el sitio dado que está en el mismo rango de valores determinados por el proyecto Copernicus Global Land Service de la Unión Europea para el sitio [69].

4.3.3. Dimensionamiento del cuerpo del relleno sanitario

Para realizar el dimensionamiento del relleno sanitario, es necesario estimar en primer lugar el volumen total de RSU a disponer en el período operativo definido. Para ello, es importante conocer la producción per cápita diaria (PPC) de RSU, la densidad aparente de los RSU generados y la proyección poblacional estimada para el período operativo de la población a la cual se debe de proveer el servicio de disposición final. A continuación, se desarrolla al respecto de cada uno de estos parámetros.

Tanto la PPC como la composición porcentual en masa de RSU necesaria para realizar la estimación de la densidad aparente, fueron estimados por IATASA Ingeniería para el mes de mayo mediante el procedimiento estándar de muestreo para la determinación de la generación y la composición de RSU por parte de los Municipios de San Carlos de Bariloche y Dina Huapi [70, 71]. Cabe aclarar que, si bien es sabido que la PPC y la composición de los RSU generados varía a lo largo del tiempo con los patrones de consumo de la población y también en forma estacional, se trabajará únicamente con los datos disponibles para realizar las aproximaciones pertinentes a este trabajo.

En el Anexo II del Estudio de Impacto Ambiental del CAM de tratamiento y disposición final de la ciudad de San Carlos de Bariloche elaborado por IATASA Ingeniería [71], se presenta el estudio realizado acerca de la calidad de los RSU de los Municipios considerados en este PFI. En él, se menciona que la PPC promedio de RSU en la ciu-

dad de San Carlos de Bariloche y Dina Huapi es de $0,849 \text{ kg hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$. En cuanto a la densidad aparente de los RSU para ambas localidades, se estimó que su valor era de 125 kg m^{-3} . Dicha estimación se obtuvo a partir de la composición porcentual en masa obtenida del Anexo II mencionado [71] y considerando los valores de recuperación en masa estimados por la ARB para cada una de las corrientes de RSU [72]. La recuperación total para el período operativo de diseño del relleno sanitario se aproximó a partir de los datos disponibles en un 3,28% del total de la masa generada para el mismo período.

Finalmente, en la tabla 4.5, se presenta la estimación de la población total a abastecer por año durante el período de operación, contemplando tanto las proyecciones para la población permanente como flotante para ambos Municipios. En adición a ello, se presentan también los valores asociados a la masa total de RSU recuperados y a disponer en el relleno sanitario durante el período de operación establecido.

Año	Población total	Masa total recuperada [Tn]	Masa total a disponer [Tn]	Volumen total [m ³]
2021	154.053	1.566	46.173	369.383
2022	156.339	1.589	46.858	374.864
2023	158.584	1.612	47.531	380.247
2024	160.784	1.639	48.322	386.579
2025	162.943	1.656	48.837	390.699
2026	166.197	1.689	49.813	398.502
2027	168.656	1.714	50.550	404.398
2028	171.117	1.744	51.428	411.423
2029	173.576	1.764	52.024	416.195
2030	176.036	1.789	52.762	422.093
Total		16.763	494.298	3.954.382

Tabla 4.5: Estimaciones de la población total a proveer del servicio de disposición final de RSU, de las masas totales de RSU recuperados y a disponer, y del volumen total a disponer en el relleno sanitario. **Fuente:** Elaboración propia.

Teniendo presente el valor estimado para la densidad aparente de los RSU, se pudo determinar el volumen a disponer si no se considera la realización de ningún tipo de pretratamiento sobre los RSU. Este volumen puede reducirse hasta un 85% si se considera el triturado, compactación y enfardado sin recubrimiento de los RSU hasta alcanzar los valores típicos de densidad de 800 kg m^{-3} [12]. Considerando que se aplica ese proceso, el volumen final aproximado a disponer para el período considerado será de 617.872 m^3 .

En este trabajo adoptamos una profundidad de 20 m de residuos, lo que requiere una superficie de $176 \text{ m} \times 176 \text{ m}$ para satisfacer las necesidades de disposición final de la población de los Municipios de San Carlos de Bariloche y Dina Huapi para el período de 2021-2030. Esto se corresponde con una superficie cubierta de 3,09 ha. Sumado a

ello, se consideró una pendiente final en la cobertura superior de 2 %, según lo sugerido en la bibliografía consultada [12]. Finalmente, en lo que respecta a las capas de drenaje de la barrera basal, se consideró en todos los casos una longitud para las superficies de captación hacia la tubería colectora de 30 m con una pendiente de 3 % [12].

4.4. Resultados y discusión

4.4.1. Barreras basales

Se calculó usando HELP, la evolución de los flujos durante un período de 25 años post-clausura del relleno, para los cinco diseños de barrera basal y la información detallada en la Sec. 4.3. En la Fig. 4.6 (panel superior), se presenta el contenido de agua promedio diario para los años 10 a 15 de la simulación en la zona de evaporación del suelo, a 30 cm de profundidad dentro de la cobertura superior de clase textural franco-limosa propuesta (0-50 cm en el perfil simulado). La línea negra continua (0, 501 vol.agua/vol.suelo) superior indica el valor de la porosidad total de dicha capa, mientras que las líneas rojas delimitan el rango entre la capacidad de campo (0, 284 vol.agua/vol.suelo) y el punto de marchitez permanente (0, 135 vol.agua/vol.suelo) para el tipo de suelo considerado.

La variación del contenido de agua en la cubierta superior entre los dos valores umbrales asociados al contenido de agua saturado y al punto de marchitez permanente es un factor a tener presente para la revegetación del sitio. Como se ha discutido en secciones anteriores, el primero de estos valores umbrales establece un límite superior que determina la variación entre condiciones aeróbicas y anaeróbicas en la cobertura, mientras que el contenido de agua en el punto de marchitez permanente es un indicador para la detección de estrés hídrico para las plantas. En ningún momento durante la simulación se alcanza el valor de saturación. Por el contrario, la cobertura superior alcanza el valor de contenido de agua correspondiente al punto de marchitez permanente típicamente durante los meses de verano.

Por otra parte, en la Fig. 4.6 (panel inferior), se muestra la precipitación para el sitio junto con las estimaciones calculadas por el código HELP para la evapotranspiración y la escorrentía superficial, para todo el período simulado. Dado que las condiciones que determinan la evapotranspiración y la escorrentía son las mismas en los cinco diseños propuestos, estas tres componentes del balance hidrológico definen el flujo neto de agua a través de la cobertura superior. Como en todos los casos el flujo será el mismo, lo que variará con los diversos sistemas de barrera basal son las proporciones de flujo recolectado por el sistema de captación de lixiviados, perdido a través de la última barrera y almacenado en el perfil del relleno.

En las Figs. 4.7 y 4.8, se muestra la evolución del drenaje lateral y las pérdidas desde

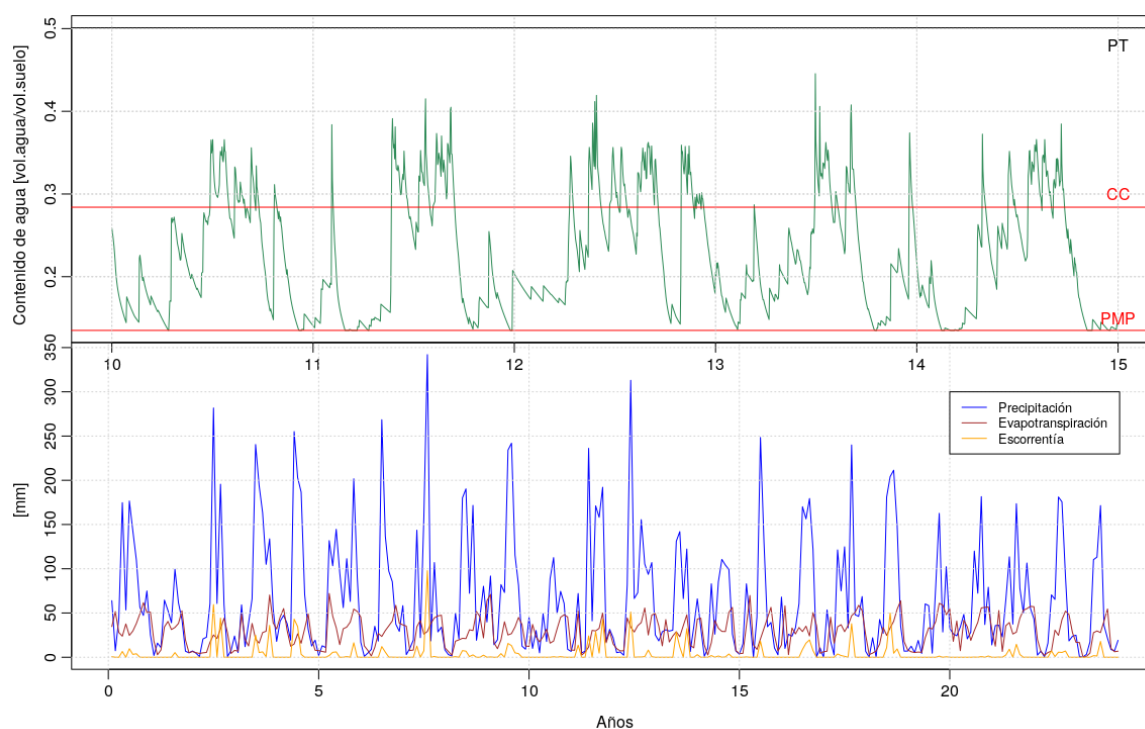


Figura 4.6: Variación del contenido de agua en la zona de evaporación de la cobertura superior (arriba). PT = porosidad total, 0,501 vol.agua/vol.suelo; CC = capacidad de campo, 0,284 vol.agua/vol.suelo; PMP = punto de marchitez permanente, 0,135 vol.agua/vol.suelo. Valores de precipitación, evapotranspiración y escorrentía empleados para analizar los diseños de coberturas basales (abajo). **Fuente:** Elaboración propia.

la capa inferior para los cinco diseños de barrera basal propuestos, respectivamente. Estas dos variables son de gran importancia en lo que respecta a la caracterización hidrológica del funcionamiento de los rellenos sanitarios. Los datos de la Fig. 4.7 arrojan una primera estimación del volumen de lixiviados a tratar o recircular en el caso que corresponda. Los últimos dos casos (D y E) tienen doble capa de drenaje y por eso hay dos curvas en cada caso. Por otro lado, los valores mostrados en la Fig. 4.8 dan una aproximación de los lixiviados que están siendo descargados al ambiente por límite inferior de cada diseño.

La tabla 4.6 presenta los valores medios, máximos y mínimos en base mensual recuperados mediante las capas de drenaje propuestas en cada uno de los sistemas. Se puede notar que los volúmenes recuperados para los casos A, C, D y E son comparables entre sí, mientras que para el caso B el volumen recuperado es significativamente menor.

En cuanto a la tabla 4.7, es importante tener en cuenta para su análisis que se han establecido en la normativa internacional valores límites del volumen de lixiviados máximo permitido que percole desde la capa inferior de un relleno sanitario al subsuelo. Como valor máximo se adopta $0,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ mes}^{-1}$, o bien, $0,01 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ [25].

Dado que en todos los diseños propuestos en este trabajo se contempla un relleno sanitario de 3,09 ha, el valor de referencia que no debería ser superado es de 0,93

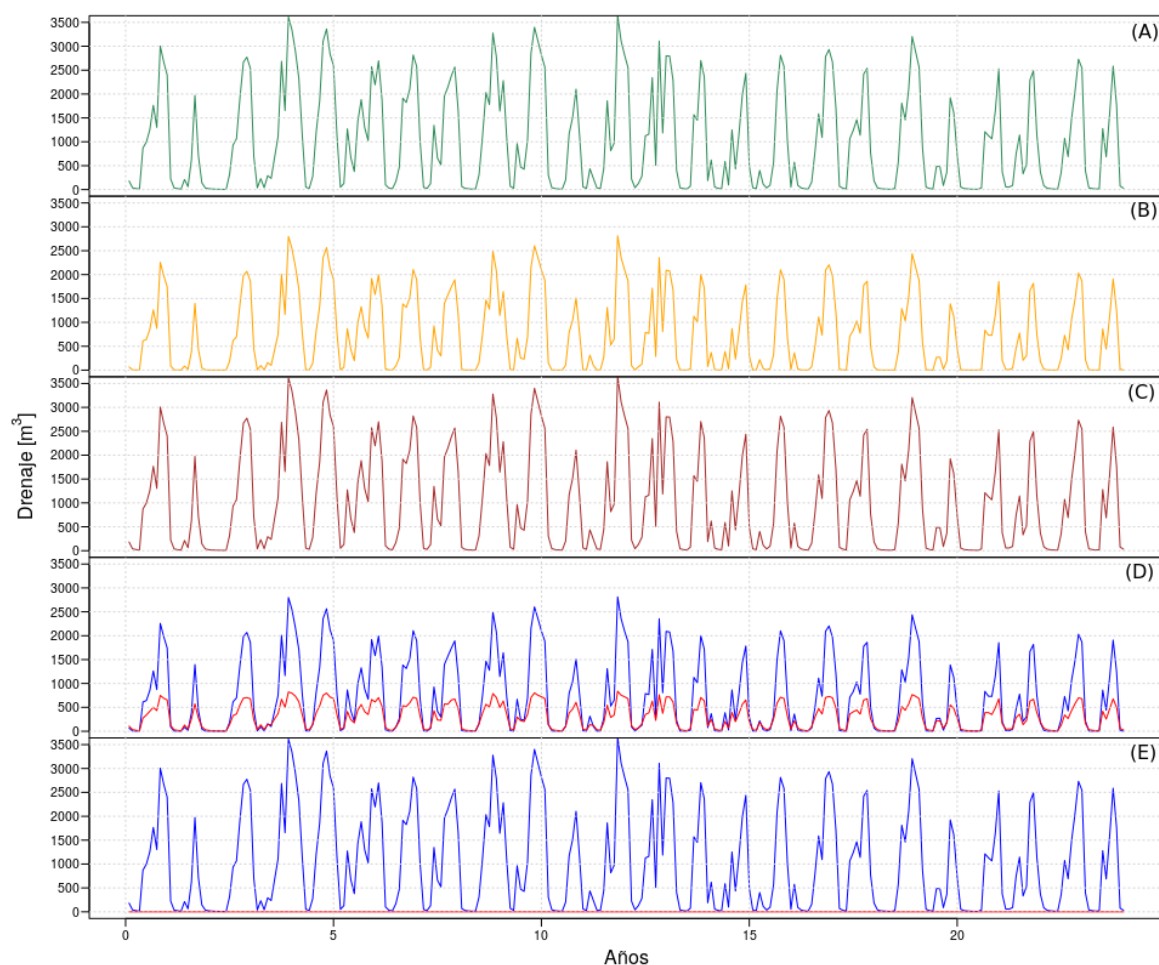


Figura 4.7: Captación de lixiviados total por mes mediante el/los drenaje/s lateral/es para cada diseño de barrera basal propuesto. Los últimos dos casos (D y E) tienen doble capa de drenaje, siendo las líneas azules las correspondientes a la captación del sistema primario y las líneas rojas las del secundario. **Fuente:** Elaboración propia.

Diseño	Volumen de lixiviados a tratar		
	Medio [$\text{m}^3 \text{mes}^{-1}$]	Mínimo [$\text{m}^3 \text{mes}^{-1}$]	Máximo [$\text{m}^3 \text{mes}^{-1}$]
A	1038	3, 21	3647
B	734	0, 47	2812
C	1041	5, 59	3649
D	1040	5, 50	3650
E	1041	5, 59	3649

Tabla 4.6: Volumen de lixiviados a tratar mensualmente para cada uno de los diseños de barrera basal propuestos. **Fuente:** Elaboración propia.

$\text{m}^3 \text{mes}^{-1}$. De acuerdo a los resultados presentados en la tabla 4.7, los diseños A y B superan dicho valor tanto en el mes de máxima descarga para toda la serie temporal considerada, incluso también con el valor mínimo mensual para ese período.

Dado que la opción más sencilla que cumple con los requerimientos de la normativa en lo que respecta a la descarga de lixiviados al ambiente es el diseño C, la decisión

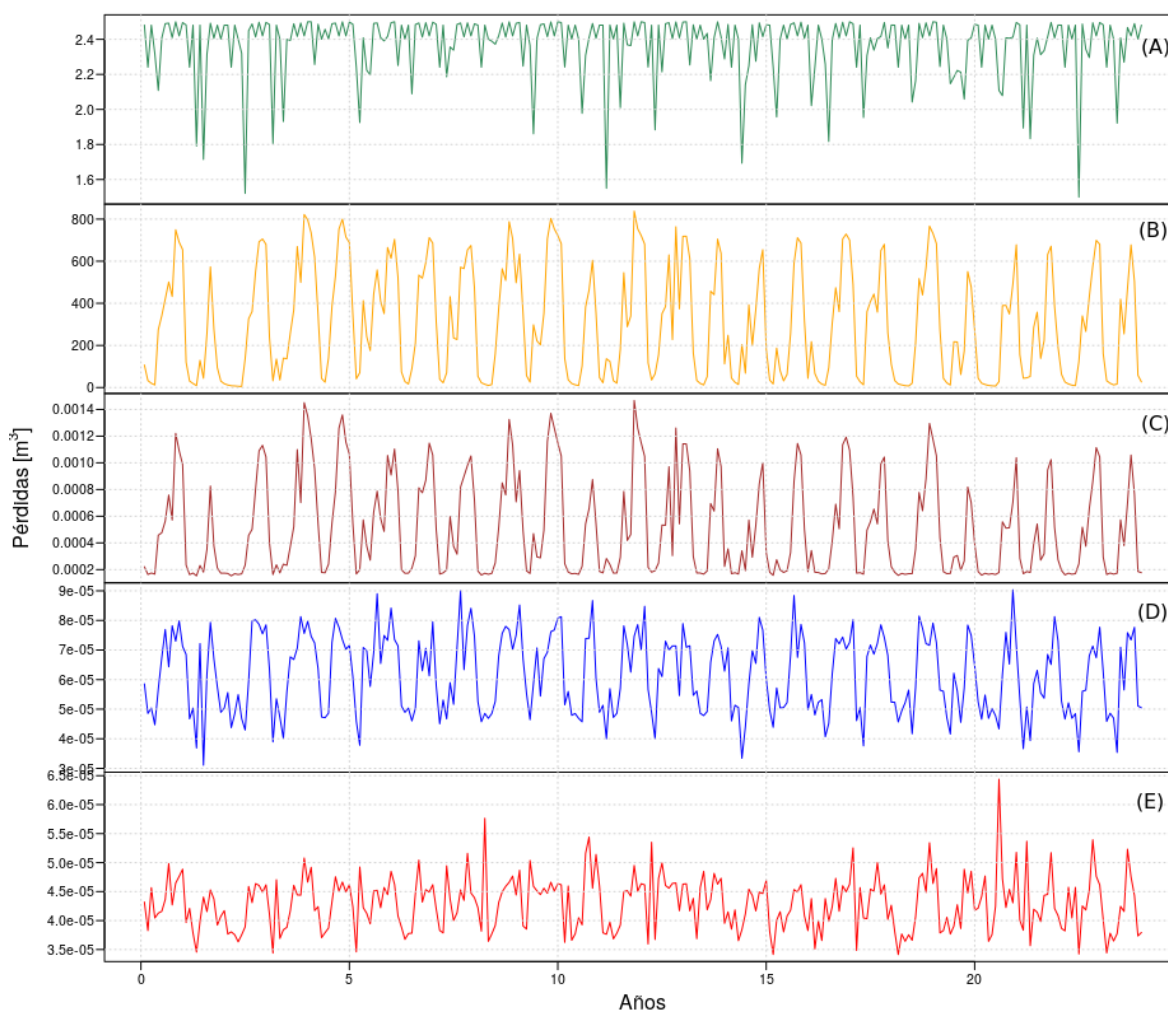


Figura 4.8: Pérdida de lixiviados total por mes por percolación a través de las barreras de baja permeabilidad de los distintos diseños de barrera basal. **Fuente:** Elaboración propia.

Diseño	Medio [$\text{m}^3 \text{mes}^{-1}$]	Descarga de lixiviados	
		Mínimo [$\text{m}^3 \text{mes}^{-1}$]	Máximo [$\text{m}^3 \text{mes}^{-1}$]
A	2,37	1,50	2,50
B	306,0	5,02	837,7
C	$5,14 \cdot 10^{-4}$	$1,53 \cdot 10^{-4}$	$1,47 \cdot 10^{-3}$
D	$6,15 \cdot 10^{-5}$	$3,11 \cdot 10^{-5}$	$9,03 \cdot 10^{-5}$
E	$4,30 \cdot 10^{-5}$	$3,41 \cdot 10^{-5}$	$6,44 \cdot 10^{-5}$

Tabla 4.7: Volumen de lixiviados descargados mensualmente al ambiente para cada uno de los diseños de barrera basal propuestos. **Fuente:** Elaboración propia.

de optar por ella podría parecer trivial. Sin embargo, si tenemos en cuenta que la zona de emplazamiento del relleno sanitario se encuentra ubicada sobre una posible unidad hidrogeológica definida como acuífero no confinado [73], lo cual debe ser confirmado por nuevas evidencias, consideramos que, de ser éste el caso, los diseños D y E podrían presentarse como las alternativas más apropiadas. Estos dos diseños se encuentran conformados por dos bloques cada uno de los presentados en la Fig. 4.2; por lo que,

estos diseños presentan redundancia, sumando un nivel más de seguridad al relleno sanitario.

Esto último puede corroborarse al analizar los tres gráficos presentados en la Fig. 4.9. En estos gráficos, se presentan las pérdidas al ambiente acumuladas que son emitidas a través de la barrera de baja permeabilidad inferior durante el período de simulación definido para tres condiciones diferentes de instalación de la geomembrana. Nótese el cambio de escala en cada uno de los gráficos lo cual denota una variación significativa entre los distintas condiciones de instalación, variando de izquierda a derecha de una colocación adecuada a una mala instalación de las geomembranas. Los distintos casos fueron considerados cambiando el valor de la variable “*placement quality*”, que tiene, en HELP, seis opciones predefinidas para caracterizar el huelgo remanente entre la geomembrana y la capa de drenado después de su instalación.

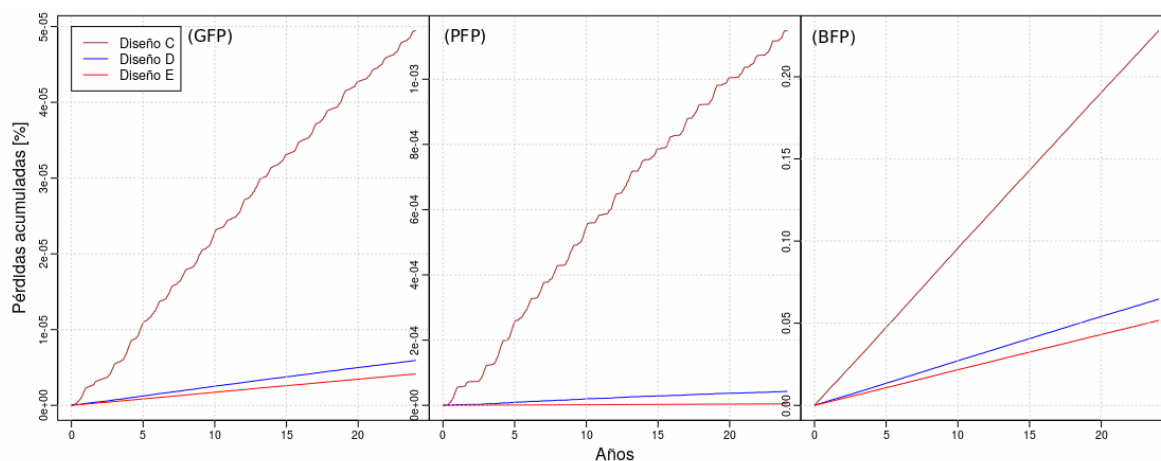


Figura 4.9: Pérdidas al ambiente acumuladas a través de la barrera de baja permeabilidad inferior durante el período de simulación para tres condiciones diferentes de instalación de la geomembrana. GFP = Good Field Placement; PFP = Poor Field Placement; BFP = Bad Field Placement. **Fuente:** Elaboración propia.

Si bien el desempeño hidrológico de las barreras D y E es similar, existen también otros aspectos que deberían considerarse. A modo de ejemplo, puede mencionarse la diferencia en la capacidad de atenuación de la carga de contaminantes emitidos al ambiente entre las dos capas de bentonita asociadas al diseño E, en comparación con la capa única en el diseño D. Para el ejemplo planteado, la configuración propia del diseño E estará asociada con una mayor capacidad de atenuación que el diseño D y, por consiguiente, disminuirá la carga de contaminante de las emisiones no controladas al ambiente.

Cálculo de costos

En las tablas 4.8 y 4.9, se muestran las estimaciones de los costos unitarios por unidad de superficie de los materiales involucrados en los perfiles evaluados y el costo

total para el caso particular analizado. Los precios sobre los que se elaboraron ambas tablas fueron consultados a las empresas: Bentonitas del Lago, para la bentonita; Coripa, para los geosintéticos; BG Excavaciones SRL., para las gravas; y, finalmente, en el caso de las tuberías, los mismos se estimaron a partir de precios internacionales considerando los requerimientos especificados para las mismas en Cossu & Stegmann [12, 74].

Componente	Precio unitario [US\$ m ⁻²]				
	A	B	C	D	E
Bentonita	267,4	-	267,4	267,4	534,8
Geodren	-	-	-	4,2	4,2
Geomembrana PEAD	-	6,8	6,8	13,6	13,6
Geotextil	1,5	1,5	3,0	1,5	1,5
Grava	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3
Tubería PEAD	2,5	2,5	2,5	5,0	5,0
Total	278,7	18,1	287,0	299,0	566,4

Tabla 4.8: Costos por unidad de superficie a cubrir asociados a los materiales necesarios para la implementación de los diversos diseños de barrera basal analizados. **Fuente:** Elaboración propia.

En lo que respecta a la inversión económica a realizar para llevar adelante la obra de ingeniería, es importante notar que el costo final está marcado fuertemente por el precio asociado a la bentonita. Los costos de este material granulométrico resulta muy elevado dado que el mismo se encuentra sometido a diversos ensayos de laboratorio para asegurar su calidad y propiedades hidráulicas, entre otras, a diferencia de lo que sucede con los materiales de granulometría gruesa.

Ahora bien, considerando el análisis del drenaje lateral de lixiviados y pérdidas al ambiente propuesto en la sección anterior, la diferencia en los costos de implementación de los diseños de barrera basal C, D y E sugieren que la opción más apropiada en lo que refiere a la relación costo-beneficio sería el diseño D.

Componente	Costo total [US\$]				
	A	B	C	D	E
Bentonita	8.262.660	-	8.262.660	8.262.660	16.525.320
Geodren	-	-	-	129.780	129.780
Geomembrana PEAD	-	210.120	210.120	420.240	420.240
Geotextil	44.867	44.867	89.734	44.867	44.867
Grava	224.025	224.025	224.025	224.025	224.025
Tubería PEAD	77.559	77.559	77.559	155.118	155.118
Total	8.611.830	559.290	8.868.300	9.239.100	17.501.760

Tabla 4.9: Costos totales asociados a los materiales necesarios para la implementación de los diversos diseños de barrera basal analizados. **Fuente:** Elaboración propia.

4.4.2. Cobertura superior

En el caso del análisis de la cobertura superior, se utilizó para todos los casos el diseño C como barrera basal presentado en la sección anterior, por ser el más ampliamente utilizado en diseños de rellenos sanitarios de países latinoamericanos [12]. En la Fig. 4.10, se puede observar la captación de drenaje por parte de cada sistema propuesto. En los casos A y B se muestra la captación de la cobertura superior (en verde y naranja) y en rojo la captación de la barrera basal. En el caso C, la captación se hace únicamente por el sistema de drenaje de la barrera basal. La Fig. 4.11 presenta el flujo de agua que atraviesa la cobertura superior en los casos A y B (verde y naranja, respectivamente) y la cantidad de lixiviado perdido a través de la barrera basal (rojo para A y B, y azul en C).

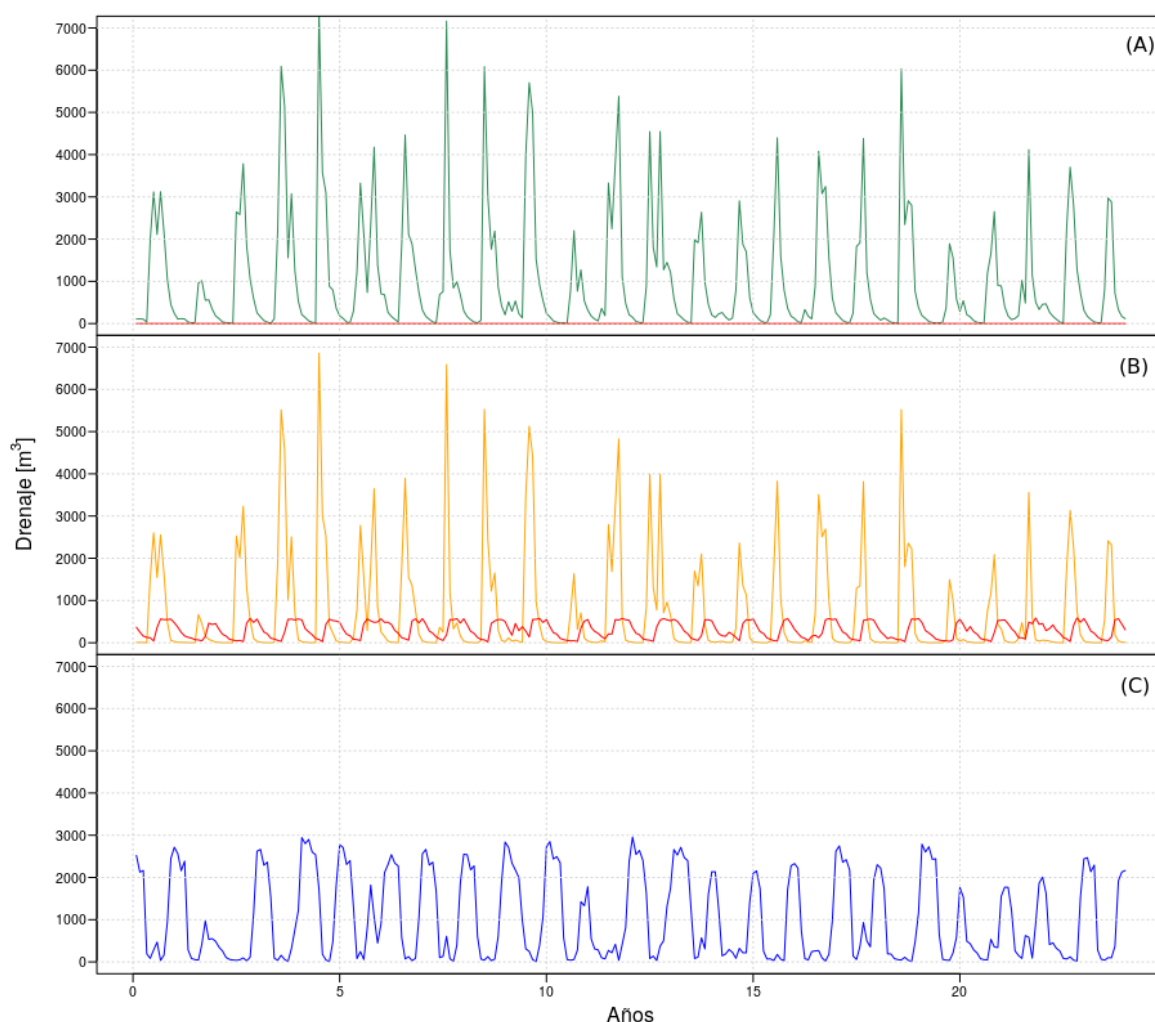


Figura 4.10: Captación de fluidos total mensual mediante el drenaje lateral de la cobertura superior (casos A y B) y el drenaje basal en los tres casos (rojo para A y B y azul para C).
Fuente: Elaboración propia.

Para el caso del diseño de cobertura superior A, una gran proporción de la precipitación efectiva que ingresa al sistema es recuperada en el drenaje ubicado en la

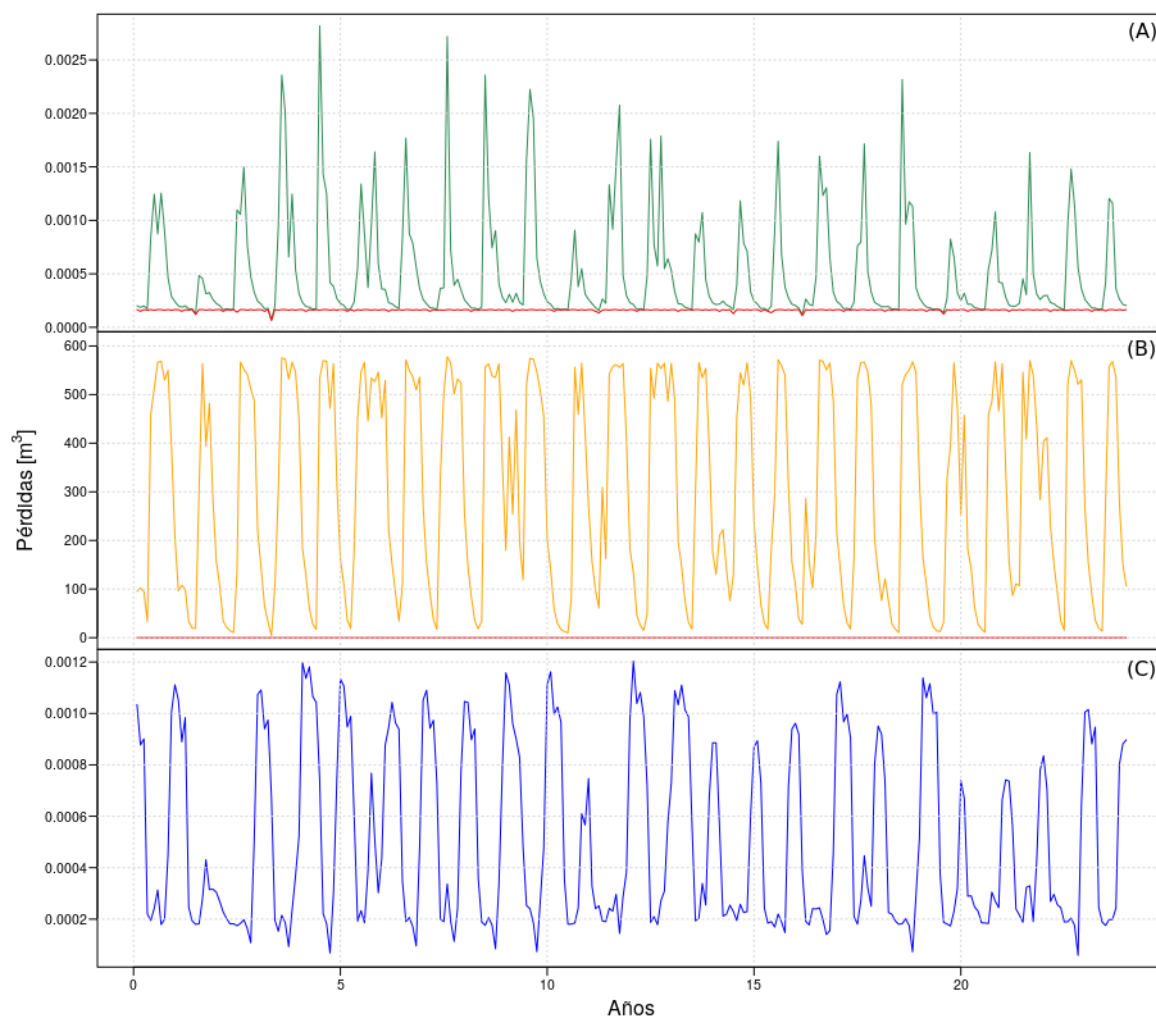


Figura 4.11: Percolación de fluidos manual a través de las barreras de baja permeabilidad de las coberturas superior (casos A y B en verde y naranja, respectivamente) y a través de la barrera basal (rojo para A y B y azul para C). **Fuente:** Elaboración propia.

cobertura superior, siendo el valor promedio recolectado de $1041 \text{ m}^3 \text{ mes}^{-1}$ para el período simulado. El valor promedio de lixiviados recuperados por el sistema de drenaje ubicado en la barrera basal es de $5,12 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ mes}^{-1}$ para ese caso. Por otra parte, la percolación estimada a través de la geomembrana ubicada en la barrera basal para esta configuración es en promedio $1,61 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, para el período de simulación considerado, encontrándose dentro del valor permitido que estipula la normativa.

Estos resultados están de acuerdo con lo esperable para este tipo de diseño, que tiene como objetivo ser una capa de sellado, minimizando el ingreso de agua en forma no controlada al cuerpo del relleno. Se debe tener presente que el agua recolectada desde el primer sistema de drenaje puede ser utilizada para riego, o bien el relleno sanitario puede ser diseñado de forma tal que la misma sea reincorporada al flujo subsuperficial del área en la cual se encuentra ubicado. Esto puede implementarse dado que el agua recuperada por este primer sistema no estuvo en contacto con la capa de RSU y, por consiguiente, no transportaría contaminantes asociados a ellos.

En contraposición a lo anterior, el fluido recolectado desde el segundo sistema de drenaje se trata de lixiviado por haber estado en contacto con los RSU dispuestos en el relleno sanitario. Como se puede observar, el volumen de lixiviados recuperados es pequeño debido a la baja percolación de precipitaciones que ingresan al sistema a través de la cobertura superior. Sin embargo, para asegurar la degradación de los RSU y su estabilización a largo plazo, debería asegurarse un suministro controlado de agua que permita el adecuado metabolismo de los microorganismos. En este tipo de diseños, esto se logra mediante un sistema de recirculación de lixiviados, inyectándolos por las capas superiores al RSU una vez que estos son tratados (flujo *ReC* en la Fig. 4.1).

Por otra parte, para el relleno sanitario propuesto en el diseño B, se observa en la Fig. 4.10 B que la captación en el sistema de drenaje de la cobertura superior es levemente menor que la recuperada en el caso A. En promedio, el valor recuperado de agua por el primer sistema de drenaje es de $741 \text{ m}^3 \text{ mes}^{-1}$. Es importante notar que, en este caso, se produce un aumento significativo de la cantidad de lixiviados que son generados y captados por el sistema de drenaje ubicado en la barrera basal, dada la mayor permeabilidad de la cobertura superior. El valor captado por este segundo sistema de drenaje es de aproximadamente $302 \text{ m}^3 \text{ mes}^{-1}$.

En la Fig. 4.11 B, se puede observar la evolución del flujo que percola a través de la primera barrera mineral de suelo arcilloso y que se espera que esté en contacto con la capa de RSU propiciando la generación de lixiviados (curva naranja). La pérdida al ambiente por parte de la última barrera de la barrera basal (curva roja) es en promedio de $2,50 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ mes}^{-1}$.

En el caso de la cobertura presentada en el diseño C, se puede observar que la recolección de drenaje se produce únicamente en la barrera basal. Por ello, en este caso, las precipitaciones determinan el flujo de agua que ingresa al sistema y que estará en contacto con los RSU, de modo que la precipitación controla el proceso de generación de lixiviados. En este caso, los lixiviados recuperados por el sistema de drenaje mencionado son en promedio $1.030 \text{ m}^3 \text{ mes}^{-1}$ (casi el total de las precipitaciones). El promedio de percolación a través de la capa inferior de la cobertura basal es de $5,03 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ mes}^{-1}$.

Por último, se presentan en la Fig. 4.12, las pérdidas por percolación al ambiente a través de las barreras basales de los tres diseños presentados en base porcentual con respecto a la precipitación efectiva que ingresa al sistema. Se puede observar que las mayores pérdidas son producidas por el diseño C y las menores por el diseño A, lo cual está asociado con la cantidad de fluido que ingresa al cuerpo del relleno.

Cálculo de costos

Las tablas 4.10 y 4.11 presentan las estimaciones de los costos unitarios por unidad de superficie de los materiales requeridos por los diseños de cobertura superior

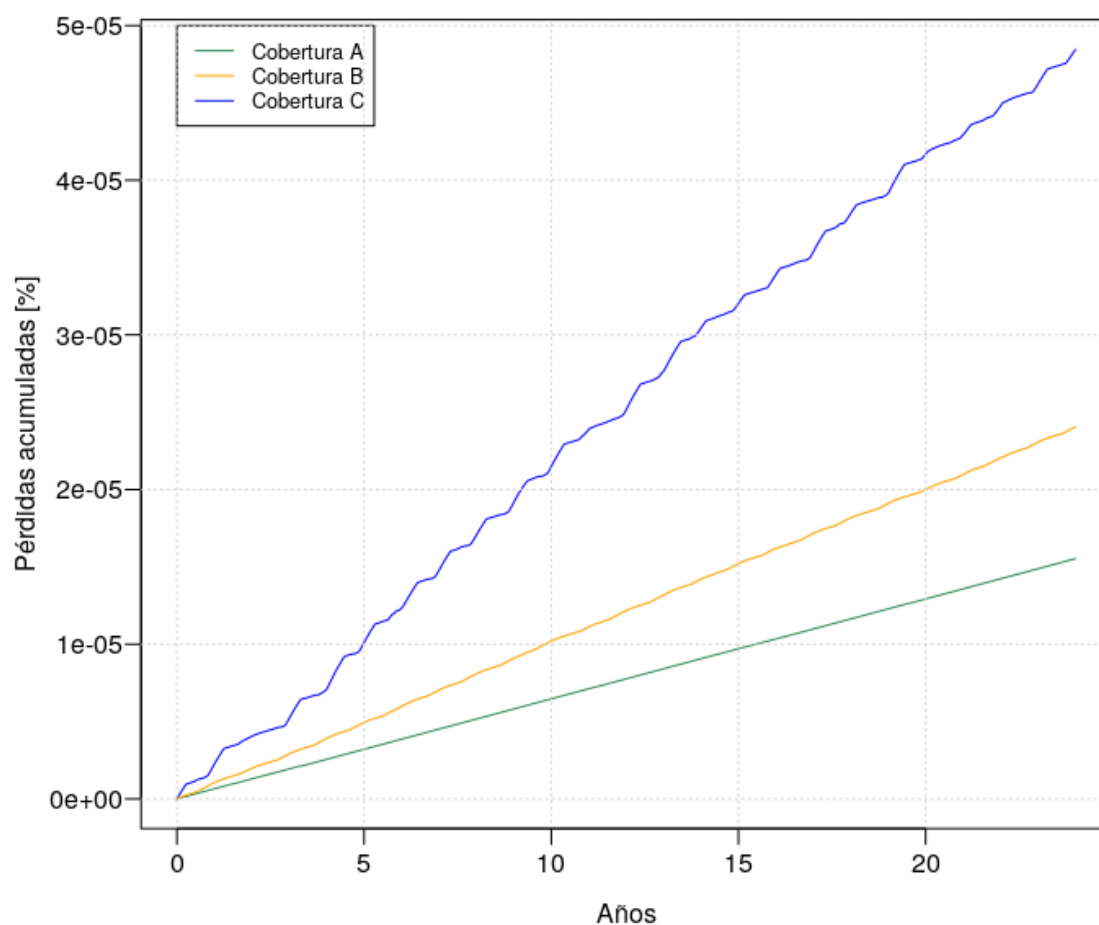


Figura 4.12: Pérdidas al ambiente acumuladas a través de la barrera de baja permeabilidad inferior durante el período de simulación para los tres diseños propuestos. **Fuente:** Elaboración propia.

evaluados y el costo total para el dimensionamiento considerado.

En este caso, los precios sobre los cuales se elaboraron ambas tablas fueron consultados a las empresas: Bentonitas del Lago, para la bentonita; Coripa, para los geosintéticos; BG Excavaciones SRL., para las gravas, las arenas y los suelos; Cooperativa de Electricidad Bariloche Ltda., para el compost; y, finalmente, en el caso de las tuberías, los mismos se estimaron a partir de precios internacionales considerando los requerimientos especificados para las mismas en Cossu & Stegmann [12, 74].

En el caso de la cobertura superior de un dado relleno sanitario, la elección del diseño a implementar dependerá de los recursos disponibles para llevarlo a cabo, la calidad de los RSU, el modelo de relleno sanitario adoptado, la situación local y las regulaciones pertinentes [12]. De acuerdo a este último criterio, la mayoría de las normativas tienden a orientarse hacia coberturas de sellado, A, o de baja permeabilidad, B. En particular, debemos señalar que la operación post-clausura de un relleno sanitario con una cobertura de sellado, como el caso A, requerirá de un plan de monitoreo, operación y mantenimiento constante por parte de profesionales afines a las ciencias

Componente	Precio unitario [US\$ m ⁻²]		
	A	B	C
Arena	6,7	6,7	6,7
Bentonita	267,4	267,4	-
Compost	14,2	14,2	22,8
Geomembrana PEAD	6,8	-	-
Geotextil	6,0	6,0	3,0
Grava	7,3	7,3	-
Suelo apto vegetación	28,5	28,5	28,5
Suelo no clasificado	5,0	5,0	5,0
Tubería PEAD	5,0	5,0	2,5
Total	346,9	340,1	68,5

Tabla 4.10: Costos por unidad de superficie a cubrir asociados a los materiales necesarios para la implementación de los diversos diseños de cobertura superior analizados. **Fuente:** Elaboración propia.

ambientales en comparación con los otros dos diseños de cobertura presentados.

Componente	Precio total [US\$]		
	A	B	C
Arena	207.030	207.030	207.030
Bentonita	8.262.660	8.262.660	-
Compost	438.780	438.780	704.520
Geomembrana PEAD	210.120	-	-
Geotextil	185.400	185.400	92.700
Grava	225.570	225.570	-
Suelo apto vegetación	880.650	880.650	880.650
Suelo no clasificado	154.500	154.500	154.500
Tubería PEAD	154.500	154.500	77.250
Total	10.719.210	10.509.090	2.116.650

Tabla 4.11: Costos totales asociados a los materiales necesarios para la implementación de los diversos diseños de cobertura superior analizados. **Fuente:** Elaboración propia.

4.5. Conclusiones parciales

Mediante el empleo del código HELP, pudimos hacer la caracterización hidrológica de distintos sistemas multi-barreras para la cobertura de rellenos sanitarios. Esto nos permitió obtener estimaciones de los volúmenes de lixiviados a tratar, lo cual resulta de gran utilidad para el adecuado dimensionamiento de las unidades de tratamiento de lixiviados. Además, fue posible evaluar las pérdidas a través de la barrera basal para distintos diseños, y verificar si se ajustan a la normativa vigente. En este sentido, entre los diseños de barrera basal analizados, los casos C, D y E se constituyen como sistemas apropiados para las condiciones del sitio desde el punto de vista de su balance hidrológico.

De los tres diseños de cobertura superior analizados, podemos destacar los dos primeros como aquellos de mayor relevancia práctica: el caso A como cobertura de sellado (percolación casi nula) y el B como caso mixto (percolación y drenaje significativos). Usando HELP, fue posible evaluar la aptitud de la cobertura de sellado, cuantificando la percolación. Para los casos en que no se elija una cobertura de sellado, el análisis del caso mixto (B) dejó claro que es posible regular el caudal de infiltración hacia los RSU mediante el adecuado diseño de la estructura de capas de la cobertura superior. En estos casos, es muy importante asegurar que el contenido de agua en el cuerpo del relleno se encuentre siempre muy por debajo del nivel de saturación, para evitar el transporte de contaminantes hacia la superficie por acción capilar. Para tomar este recaudo, se puede hacer uso del HELP en forma similar a la que se empleó en este trabajo, pero ingresando un nivel de precipitaciones sobreestimado para establecer un adecuado margen de seguridad.

Respecto a la confiabilidad de las estimaciones obtenidas, hay que tener presente que el movimiento de los fluidos a través del relleno sanitario, como en todo medio poroso, depende muy fuertemente de la granulometría y estructura de sus constituyentes. En los casos en que los RSU son dispuestos sin ningún tipo de tratamiento previo, es frecuente que se produzcan flujos preferenciales asociados a materiales planos de gran tamaño, lo que aumenta en gran medida el nivel de incertidumbre de las estimaciones hidrológicas basadas en modelos como el HELP. En este sentido, cabe destacar que los pretratamientos, tales como el triturado y el compostaje, tienen como ventaja adicional la posibilidad de contar con una caracterización hidrológica más precisa de diferentes diseños coberturas y barreras.

Capítulo 5

Conclusiones y perspectivas

En este trabajo, aplicamos el modelado matemático de flujos en medios porosos no saturados al estudio de la dinámica del movimiento del agua en mallines y en rellenos sanitarios. Como mostramos en el Capítulo 2, la ecuación de Richards que describe este movimiento es una ecuación diferencial en derivadas parciales de carácter no lineal. Al tratarse de ecuaciones no lineales recurrimos a su resolución mediante métodos numéricos. En el caso de los mallines, planteamos el problema diferencial unidimensional y lo resolvimos mediante el código de simulación HYDRUS-1D. Para el caso de rellenos sanitarios, utilizamos la formulación integral y las correlaciones semi-empíricas implementadas en el código de cálculo HELP.

El origen de la no-linealidad de estas ecuaciones está en la dependencia del potencial matricial y la conductividad hidráulica no saturada con el contenido de agua. Si bien utilizamos funciones analíticas relativamente sencillas para modelar estas dependencias (modelo fenomenológico de van Genuchten y similares), la física que rige estos procesos está dada por el comportamiento de los fluidos en la estructura del medio poroso, y no se debe perder de vista que pueden plantearse otras alternativas de modelado para este tipo de procesos complejos, que podría ser interesante explorar en trabajos futuros.

De la misma forma, la formulación de la ecuación de Richards y los métodos implementados en HYDRUS-1D, son propensos a desarrollar inestabilidades numéricas debido a la presencia de discontinuidades en los parámetros y las soluciones. En este sentido, sería conveniente considerar a futuro tanto métodos numéricos mejor adaptables a problemas con soluciones discontinuas (como volúmenes finitos [75]) o bien, métodos más modernos como aquellos basados en la discretización del contenido de agua [76].

Al resolver numéricamente el movimiento de agua en mallines, encontramos resultados satisfactorios para la zona periférica del mallín utilizando los parámetros hidráulicos obtenidos mediante la caracterización de las texturas del perfil del suelo y el código Rosetta. Este procedimiento no condujo a buenos resultados en la zona central del

mallín. Luego de verificar que el problema no estaba originado por un déficit hídrico, concluimos que los parámetros obtenidos de Rosetta no eran satisfactorios. En ese caso, parametrizamos la curva de saturación de agua en términos de $h_{1/2}$, la posición del punto $S_e = 1/2$ y θ_s , y analizamos la respuesta del sistema en función de estos dos parámetros. Como resultado, vimos que es posible ajustar estos valores a partir del nivel freático mínimo y el período de saturación del mallín (valores promedio históricos en ambos casos). Esta calibración se realizó manteniendo los restantes parámetros hidráulicos en los valores arrojados por Rosetta.

El estudio del problema transitorio, considerando precipitación variable, resultó ser sensible a un parámetro adicional que caracteriza la capacidad de acumulación de agua en la región central del mallín. Si bien esta acumulación se modeló como una columna de agua sobre la superficie (encharcamiento), la misma puede ser interpretada como una combinación de este efecto más retención de agua en zonas aledañas que fluye lentamente hacia el centro del mallín. En principio, la calibración de este parámetro podría efectuarse en base a series temporales de imágenes satelitales que permitan estimar los períodos de presencia de agua en la superficie.

Las simulaciones considerando el transporte de un soluto mostraron que el régimen hídrico afecta la redistribución del compuesto. Esto pone en evidencia que para hacer un estudio más detallado del transporte de varios compuestos, primero hay que lograr una adecuada descripción del movimiento del agua, utilizando por ejemplo, los métodos de calibración propuestos en este trabajo. Además del transporte de solutos, un modelo de movimiento de agua bien calibrado permitiría estimar el impacto de la compactación del suelo, debido a cambios en su manejo, o bien analizar los cambios del régimen hídrico ante escenarios de cambio climático.

La caracterización hidrológica realizada mediante el código HELP nos permitió estimar los flujos de agua apta para riego recuperada a través de los sistemas de drenaje de la cobertura superior, los volúmenes de lixiviados a tratar captados por los sistemas de drenaje de las barreras basales, las pérdidas al ambiente a través de las barreras de baja permeabilidad y el contenido de agua en la zona de evaporación especificada, entre otros datos, para varias configuraciones. Estos valores estimados son parámetros de gran relevancia en instancias tempranas de diseño, dado que permiten dimensionar la unidad de tratamiento de lixiviados, las tuberías de los sistemas de drenaje y los sistemas de irrigación, entre otros aspectos.

A partir de las simulaciones realizadas, pudimos evaluar el desempeño de varios sistemas propuestos, considerando los valores límites estipulados por normativas internacionales. Destacamos que la confiabilidad de los resultados obtenidos depende en gran medida de la granulometría y la estructura de las capas constituyentes. Por ello, los pretratamientos, como son el compostaje y el triturado, previos a la disposición final permiten la homogeneización del tamaño de partículas que ingresan a la capa de

RSU, lo cual disminuye la ocurrencia de flujo preferencial a través de dicha capa.

En adición a lo anterior, resulta claro el gran potencial asociado al uso de herramientas computacionales para el modelado de flujo no saturado y transporte de solutos en medios porosos dentro del ámbito de la Ingeniería Ambiental. Este tipo de herramientas, cuando se encuentran ajustadas para un medio particular, permiten orientar la toma de decisiones ya sea en lo que respecta al manejo sustentable de suelos como también en instancias preliminares de diseño, durante la operación y la clausura de rellenos sanitarios.

En particular, en lo que respecta al caso de aplicación ambiental asociado a suelos, se puede decir que los temas a abordar en instancias futuras son:

- medición de variables hidrometeorológicas en el sitio de estudio como información de base para diseño, construcción, operación y monitoreo;
- adaptación de las bases de datos de parámetros hidráulicos de suelos minerales y orgánicos a suelos representativos de la zona con el fin de generar PTF's adecuadas, o bien, exploración de modelos alternativos para el comportamiento del potencial matricial y la conductividad no saturada con el contenido de agua;
- estudio de los efectos de la MOS sobre los parámetros hidráulicos de los suelos;
- calibración de la posición ($h_{1/2}$) y la altura (θ_s) de las curvas de retención de agua para mallines de la zona a partir de la estimación del nivel freático mínimo y el período anual de saturación medios;
- calibración de la constante h_{CritS} del modelo HYDRUS-1D para dar cuenta de los efectos de la capacidad de acumulación de agua de los humedales y de los aportes de su entorno;
- estudio de la variación de la capacidad de retención de agua del suelo ante los efectos de compactación y degradación del suelo asociados a cambios en su manejo;
- determinación en laboratorio de los parámetros de la flora típica de mallines de la zona asociados con la descripción del término de consumo de agua por parte de las plantas;
- estudio de los efectos de las reacciones químicas y de decaimiento en el transporte de solutos de interés;
- implementación de métodos numéricos alternativos para el cálculo del contenido de agua en el suelo y transporte de solutos.

Finalmente, en cuanto a las líneas de investigación asociadas con el caso de aplicación ambiental asociado a rellenos sanitarios, se pueden nombrar las siguientes:

- adaptación del WGEN (*weather generator*) para su utilización en Argentina;
- validación de los resultados obtenidos mediante la utilización de HELP en rellenos sanitarios de Argentina;
- desarrollo de un modelo que contemple los cambios temporales de los parámetros hidráulicos de las distintas capas de HELP (ej.: degradación y asentamiento de la capa de RSU y su efecto sobre las capas suprayacentes, envejecimiento de los geosintéticos, procesos de obstrucción de la geomembrana, entre otros);
- en forma similar al punto anterior, la incorporación al modelo de los fenómenos químicos de adsorción y desorción de los compuestos transportados en los lixiviados generados en los rellenos sanitarios;
- incorporación de un modelo que refleje el movimiento a través del perfil del relleno sanitario del biogás generado en el interior de la capa de RSU.

Índice de símbolos

α_v	Parámetro del modelo de Van Genuchten que representa la inversa de la presión de entrada de aire	[L ⁻¹]
\bar{v}	Velocidad aparente promedio del agua	[L T ⁻¹]
ΔS	Cambio en el almacenamiento de aguas superficiales y subterráneas	[L ³ L ⁻²]
ΔS_{CS}	Cambio en el almacenamiento de agua de la cobertura superior	[L ³ L ⁻²]
ΔS_{RSU}	Cambio en el almacenamiento de agua en los RSU	[L ³ L ⁻²]
λ	Índice de distribución de poros	[-]
ψ_g	Potencial gravitatorio	[M L ⁻¹ T ⁻²]
ψ_n	Potencial neumático	[M L ⁻¹ T ⁻²]
ψ_o	Potencial osmótico	[M L ⁻¹ T ⁻²]
ψ_p	Potencial de presión o potencial matricial	[M L ⁻¹ T ⁻²]
ψ_{tot}	Potencial total del agua del suelo	[M L ⁻¹ T ⁻²]
ρ_b	Densidad aparente	[M L ⁻³]
ρ_w	Densidad del agua	[M L ⁻³]
$\rho_{particle}$	Densidad de las partículas	[M L ⁻³]
θ	Contenido volumétrico de agua del suelo	[L ³ L ⁻³]
θ_g	Contenido gravimétrico de agua del suelo	[L ³ L ⁻³]
θ_r	Contenido de agua volumétrico residual	[L ³ L ⁻³]
θ_s	Contenido de agua volumétrico saturado	[L ³ L ⁻³]
θ_{CC}	Contenido de agua volumétrico asociado a la capacidad de campo	[L ³ L ⁻³]
θ_{PMP}	Contenido de agua volumétrico en el punto de marchitez permanente	[L ³ L ⁻³]

b	Constante empírica positiva de la ec. de Gardner dependiente del suelo	$[L^{-1}]$
c	Concentración de soluto	$[M L^{-3}]$
$D_{d,tot}$	Coefficiente de difusión efectivo para medios porosos	$[L^2 T^{-1}]$
$D_{h,tot}$	Coefficiente de dispersión hidrodinámica para medios porosos	$[L^2 T^{-1}]$
D_L	Dispersividad del medio	$[L]$
ET	Evapotranspiración	$[L^3 L^{-2}]$
Gwd	Descarga de agua subterránea	$[L^3 L^{-2}]$
Gwr	Recarga de agua subterránea	$[L^3 L^{-2}]$
H	Potencial hidráulico total	$[L]$
h	Potencial de presión	$[L]$
h_A	Presión de entrada de aire	$[L]$
H_o	Escorrentía	$[L^3 L^{-2}]$
$h_{1/2}$	Potencial matricial cuando la saturación efectiva vale 0,5	$[L]$
h_{CC}	Potencial de presión correspondiente a la capacidad de campo	$[L]$
h_{CritA}	Potencial de presión mínimo permitido en la superficie del suelo	$[L]$
h_{CritS}	Potencial de presión máxima permitida en la superficie del suelo	$[L]$
I	Irrigación	$[L^3 L^{-2}]$
In_{RSU}	Infiltración efectiva hacia el cuerpo del relleno sanitario	$[L^3 L^{-2}]$
J	Tasa de flujo másico	$[M L^{-2} T^{-1}]$
J_c	Tasa de flujo másico convectivo	$[M L^{-2} T^{-1}]$
J_d	Tasa de flujo másico difusivo	$[M L^{-2} T^{-1}]$
J_h	Tasa de flujo másico dispersivo o hidrodinámico	$[M L^{-2} T^{-1}]$
J_w	Vector de flujo volumétrico de agua	$[L^3 T^{-3} L^{-2}]$
$J_{w,z}$	Flujo volumétrico de agua en la dirección vertical	$[L^3 T^{-3} L^{-2}]$
$K(h)$	Conductividad hidráulica no saturada	$[L T^{-1}]$

K_s	Conductividad hidráulica saturada	[L T ⁻¹]
L	Generación de lixiviados	[L ³ L ⁻²]
l	Parámetro asociado a la conectividad entre poros en el modelo de Burdine	[-]
L_C	Fracción de los lixiviados generados captada por los sistemas de drenaje del relleno sanitario	[L ³ L ⁻²]
L_p	Fracción de los lixiviados generados que se pierde como emisión no controlada a través de la barrera basal	[L ³ L ⁻²]
m	Parámetro empírico del modelo de Van Genuchten para la curva de retención	[-]
m_s	Masa de suelo seco	[M]
n	Parámetro empírico del modelo de Van Genuchten para la curva de retención	[-]
P	Precipitación	[L ³ L ⁻²]
R	Flujo de agua subsuperficial saliente	[L ³ L ⁻²]
Re	Recirculación de lixiviados	[L ³ L ⁻²]
S	Fuentes y sumideros que pueden encontrarse en el suelo	[M L ⁻³ T ⁻¹]
S_e	Saturación efectiva	[-]
S_o	Flujo de agua superficial saliente, o bien, escorrentía superficial	[L ³ L ⁻²]
t	Tiempo	[T]
V	Volumen total del suelo	[L ⁻³]
V_a	Volumen ocupado por el aire del suelo	[L ⁻³]
V_s	Volumen ocupado por los sólidos del suelo	[L ⁻³]
V_w	Volumen ocupado por el agua del suelo	[L ⁻³]
z	Posición en el eje vertical ascendente de un sistema de ejes coordenados cartesiano tridimensional	[L]
z_g	Potencial gravitatorio	[L]

Agradecimientos

A mi director, Pablo, y a mi co-directora, Graciela, por permitirme incursionar en un tema que me apasiona y por acompañarme en ese camino que requirió de un gran esfuerzo conjunto para alcanzar una mirada holística sobre el problema a abordar. Gracias por todo el tiempo dedicado, por su paciencia infinita y por sus valiosos aportes para la realización de esta tesis.

Al Lic. Carlos R. López, de la Universidad Nacional de Río Negro, por la descripción técnica de los perfiles de suelos analizados en la presente tesis de grado y por todas las charlas en las cuales pude despejar el sinfín de dudas que me iban surgiendo sobre los suelos de la región.

Al Lic. Luciano Alvarez Soria, de la Universidad Nacional de Río Negro, por su colaboración en la realización de los ensayos de laboratorio y por tener siempre sus puertas abiertas para el debate, particularmente aquellos sobre deducciones matemáticas.

A la Mg. Ing. Julia Martorana, del Centro Atómico Bariloche, por el acompañamiento constante, por siempre impulsarme hacia adelante y por introducirme a nuevas herramientas que facilitaron la escritura de esta tesis.

Al Mg. Ing. Martín Nini, del Departamento Provincial de Aguas y de la Universidad Nacional de Río Negro, por brindarme los datos meteorológicos históricos del Aeropuerto Tte. Luis Candelaria y por escucharnos tanto a Pablo como a mí en los estadíos iniciales de esta tesis y brindarnos su opinión.

A Antonella Zárate, Federico Laco, Francisco Denk, Malena Müller, Milagros Tártalo, Nuria Espert y Santiago Laco, por haberme acompañado durante todo el proceso de escritura dándome ánimos y su opinión sincera en incontables ocasiones. Especialmente, a Male, gracias también por acompañarme en los ensayos de laboratorio.

A todo el personal no docente de la Universidad Nacional de Río Negro, particularmente a Mari, Sandra, Yamil, Miguel y Mariano, por siempre darnos una mano para conseguir espacios libres para estudiar, por propiciar ambientes de intercambio entre estudiantes y por las charlas entre clase y clase calentando el agua para el mate o en el recreo de estudio en la Biblio.

A mis docentes, los de la Escuela, el Liceo y la Universidad, por desafiarme día a día con sus preguntas y por ser referentes más allá del ámbito académico, como personas. Especialmente, me gustaría nombrar a Marga, el Pelado, Pato, Horacio, Joaco,

Stella, María del Carmen, Ernesto, Alicia, Nancy, Verónica y Mauri, de la Escuela y Liceo CIEI; al Benta, a Censato, al Sepu, a Rodrigo Viqueira y a Pirincho, del Liceo Sagrada Familia; a Fanny y Laura, docentes de Magisterio; y, a Pablo García Martínez, Graciela Calabrese, Luciano Alvarez Soria, Julia Martorana, Marcelo Caputo, Martín Nini, Patricia Satti, Carlos López, Natalia D'Amico, René Paz, Paula Nuñez, Santiago Conti y Vanina Riberi, de la Universidad Nacional de Río Negro. Cada uno dejó su huella en mí.

A mis amigas, Agus de la Fuente, Anto Zárate, Cami Argenzio, Ceci Vargas, Celes Millapi, Dani Vera, Jes Mansur, Jochi Furtado, Juli Sepúlveda, Lore Manduca, Maca Díaz, Male Müller, Marga Fernández, Mili Tártalo, Nu Espert, Pau González, Pili Clavería y Romi Matto, todas han sido un apoyo fundamental e incondicional a lo largo de toda la carrera y las charlas con cada una de ustedes me han permitido crecer y ver nuevos puntos de vistas sobre cada uno de los temas que debatimos, siempre mate de por medio. A cada una de ustedes, gracias por convertirse en mi familia lejos de casa.

A mi familia, la de siempre, la de la vida y la elegida, por hacerse sentir cerca durante toda la carrera aunque estemos todos desperdigados por el mundo, darme ánimos para alcanzar este objetivo personal y por hacerme reír incluso en los momentos más difíciles.

Si bien esta meta alcanzada es muy importante y satisfactoria en sí misma a nivel personal y abre el camino para lo que viene en el ámbito profesional, no quisiera dejar pasar la oportunidad para decir que es la gente con la que me he cruzado la que ha hecho que el camino sea la verdadera recompensa. ¡Gracias!

Bibliografía

- [1] Weil, R. R., Brady, N. C. The nature and Properties of Soil. 15^a ed^{ón}. England: Pearson Education Limited, 2017. [ix](#), [ix](#), [8](#), [9](#), [10](#), [11](#), [12](#), [13](#), [14](#), [15](#), [16](#), [17](#), [18](#), [21](#), [35](#), [36](#)
- [2] Tiner, R. W. Wetland Indicators: A guide to wetland formation, identification, delineation, classification and mapping. 2^a ed^{ón}. Boca Raton: Taylor and Francis, 2017. [ix](#), [14](#)
- [3] Fitts, C. R. Groundwater Science. 2^a ed^{ón}. Academic Press, 2013. [ix](#), [16](#), [17](#)
- [4] Radcliffe, D., Šimůnek, J. Soil physics with Hydrus, modeling and applications. 1^a ed^{ón}. Boca Raton: CRC Press, 2010. [ix](#), [ix](#), [19](#), [20](#), [21](#), [26](#), [28](#), [29](#)
- [5] Vepraskas, M. J., Craft, C. B. (eds.) Wetland soils: Genesis, Hydrology, Landscapes and Classification. 2^a ed^{ón}. Boca Raton: Taylor and Francis Group, 2016. [ix](#), [36](#), [38](#)
- [6] Cremona, M. V., Enríquez, A. Los mallines de Patagonia Norte: sus funciones productivas y ambientales. Serie de divulgación N° 1. *Presencia*, **63**, 9–13, 2015. [ix](#), [ix](#), [39](#), [40](#), [41](#), [42](#)
- [7] Chimner, R. A., Bonvissuto, G. L., Cremona, M. V., Gaitán, J. J., López, C. R. Un análisis de las condiciones ecohidrológicas de humedales a lo largo de un gradiente de precipitación en la Patagonia, Argentina. *Ecología Austral*, **21** (3), 329–337, 2011. [ix](#), [43](#), [45](#)
- [8] Cravero, S., Bianchi, C., Elena, H., Bianchi, A. Mapas digitales mensuales de precipitación y precipitación menos evapotranspiración potencial. Inf. téc., INTA, Centro Regional Salta-Jujuy, 2017. [x](#), [x](#), [35](#), [44](#), [45](#), [47](#), [52](#), [54](#), [55](#), [57](#), [69](#)
- [9] ESA. Agencia Espacial Europea - Science Toolbox Exploitation Platform. URL <http://step.esa.int/auxdata/dem/SRTMGL1/?C=N;O=D>. [x](#), [46](#)
- [10] Natural Resources Conservation Service, U. Soil Texture Calculator. URL https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/?cid=nrcs142p2_054167. [x](#), [50](#)

- [11] Liu, H., Lennartz, B. Hydraulic properties of peat soils along a bulk density gradient—a meta study. *Hydrological Processes*, **33** (1), 101–114, 2019. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.13314>. xi, 59, 60, 61, 63, 68
- [12] Cossu, R., Stegmann, R. (eds.) Solid Waste Landfilling, concepts, processes, technologies. 1^a ed^{ón}. Elsevier, 2019. xi, xii, xiii, xiii, 3, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 81, 82, 92, 94, 95, 99, 100, 105, 106, 109
- [13] Berger, K., Schroeder, P. R. The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model, User's Guide for HELP-D (Version 3.95D), 2013. xi, 86, 87, 88, 89, 90
- [14] Tolaymat, T., Krause, M. Hydrologic Evaluation of Landfill Performance: HELP 4.0, 2020. xiii, 83, 87, 88, 89, 90, 91
- [15] Lightfoot, D. R. The origin and diffusion of qanats in arabia: New evidence from the northern and southern peninsula. *The Geographical Journal*, **166** (3), 215–226, 2000. URL <http://www.jstor.org/stable/823073>. 1
- [16] Brown, G. O. Henry darcy and the making of a law. *Water Resources Research*, **38** (7), 11–1–11–12, 2002. URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2001WR000727>. 1
- [17] Richards, L. A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, **1** (5), 318–333, 1931. 2
- [18] Beck, E. The Love Canal Tragedy - EPA Journal 1979. URL <https://archive.epa.gov/epa/aboutepa/love-canal-tragedy.html>. 2
- [19] ARS-USDA. Agricultural Water Efficiency and Salinity Research Unit: Riverside, CA. URL <https://www.ars.usda.gov/pacific-west-area/riverside-ca/agricultural-water-efficiency-and-salinity-research-unit/docs/models/>. 2
- [20] Šimůnek, J., van Genuchten, M. T., Šejna, M. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes. *Vadose Zone Journal*, **7** (2), 587–600, 2008. 2
- [21] Veizaga, E. A. Estudio de la dinámica del nitrato en el suelo proveniente de la actividad ganadera intensiva. Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Litoral, 2015. 2, 19, 20, 22, 24, 28, 29

- [22] Scherger, L., Zanello, V., Lexow, C. Evaluación de la recarga como vector de flujo para el transporte de solutos en el área industrial de Bahía Blanca (Argentina). 2018. URL <https://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/8945>. 2
- [23] EPA. HELP. Hydrologic Evaluation of Landfill Performance. URL <https://www.epa.gov/land-research/hydrologic-evaluation-landfill-performance-help-model>. 3
- [24] Berger, K. Validation of the hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model for simulating the water balance of cover systems. *Environmental Geology*, **39**, 1261–1274, 2000. 3, 83, 84, 85
- [25] Bauerle, M. Adapting the Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) model to the climatic and soil characteristics of Queensland. Master of applied science, Queensland University of Technology, 2016. URL <https://eprints.qut.edu.au/95943/>. 4, 101
- [26] Hillel, D. U. o. M. Environmental soil physics. 1^a ed^{ón}. San Diego, USA: Academic Press, 1998. 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 18, 25, 26, 28
- [27] Brooks, R., Corey, A. Hydraulic Properties of Porous Media. Inf. téc., Colorado State University Hydrology Papers, Colorado State University, 1964. 23, 24, 84, 88
- [28] van Genuchten, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, **44** (5), 892–898, 1980. 23, 24
- [29] Gardner, W. R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, **85** (4), 228–232, 1958. 24
- [30] Rockhold, M. L., Simmons, C. S., Fayer, M. J. An analytical solution technique for one-dimensional, steady vertical water flow in layered soils. *Water Resources Research*, **33** (4), 897–902, 1997. 24
- [31] Burdine, N. Relative permeability calculations from pore size distribution data. *Journal of Petroleum Technology*, **5** (3), 71–78, 1953. 24
- [32] Mualem, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, **12** (3), 513–522, 1976. 24, 25
- [33] Schaap, M. G., Leij, F. J. Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the mualem-van genuchten model. *Soil Science Society of America*

- Journal*, **64** (3), 843–851, 2000. URL <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj2000.643843x>. 25
- [34] Šimůnek, J., Huang, K., Sejna, M., van Genuchten M.Th. HYDRUS-1D Model. URL <https://www.ars.usda.gov/pacific-west-area/riverside-ca/agricultural-water-efficiency-and-salinity-research-unit/docs/model/hydrus-1d-model/>. 30
- [35] Šimůnek, J., van Genuchten, M. T., Šejna, M. The HYDRUS-1D Description, 2019. URL <https://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?H1D-description>. 30
- [36] Celia, M. A., Bouloutas, E. T., Zarba, R. L. A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation. *Water Resources Research*, **26** (7), 1483–1496, 1990. 30
- [37] RAMSAR. Perspectiva Mundial sobre los Humedales. URL https://static1.squarespace.com/static/5b256c78e17ba335ea89fe1f/t/5ca370b471c10b9ae932db42/1554215118267/Ramsar+GWO_SPANISH_WEB+2019UPDATE.pdf. 35, 36
- [38] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, G. A. Marco conceptual y metodológico - Inventario Nacional de Humedales. URL <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/agua/humedales/inventarionacional/marco-conceptual-metodologico>. 35
- [39] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, G. A. Los humedales. URL <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/agua/humedales>. 37
- [40] Raffaele, E. Mallines: aspectos generales y problemas particulares, 1999. 38, 42
- [41] Iriondo, M. Quaternary lakes of Argentina. *Palaeogeographym, Palaeoclimatology and Palaeoecology*, **70**, 81–88, 1989. 38
- [42] Luque, J., Amari, M. Características edáficas e hídricas de los mallines de Chubut. Inf. téc., INTA EEA Chubut, Trelew, Argentina, 1997. 38, 39
- [43] Macchi, P. A. Macroinvertebrados acuáticos como indicadores ecológicos de cambios en el uso del suelo en mallines del sudoeste de la provincia de Río Negro. Ciencias naturales, Universidad Nacional de La Plata, 2017. 39, 41
- [44] Calabrese, G. M. D. Relevamiento y evaluación ambiental de humedales en el ejido de San Carlos de Bariloche - Informe Final PI UNRN 40-B-359. Inf. téc., Universidad Nacional de Río Negro, 2018. 39, 40

- [45] López, C. R., Gaitán, J. J., Ayesa, J. A., Siffredi, G. L., Bran, D. E. Evaluación y clasificación de valles y mallines. Sudoeste de Río Negro. Informe Final Proyecto PAN 2003-2004. Inf. téc., INTA EEA Bariloche, San Carlos de Bariloche, Argentina, 2005. 43
- [46] Dufilho, C., Horne, F., Polla, G. Dinámica del agua en mallines de Patagonia. Comportamiento espacial del escurrimiento subterráneo., 1999. 43
- [47] Gaitán, J. J., López, C. R., Bran, D. E. Vegetation composition and its relationship with the environment in mallines of North patagonia, Argentina. *Wetlands Ecology and Management*, **19** (2), 121–130, 2011. 43
- [48] Calabrese, G. M. D. Caracterización y evaluación del estado de degradación de los humedales, como base para la gestión sustentable en la región semiárida del sudoeste de la provincia de Río Negro - Informe Final PI UNRN 40-B-050. Inf. téc., Universidad Nacional de Río Negro, 2012. 46, 47, 48
- [49] Calabrese, G. M. D. Caracterización ecológica de mallines de la provincia de Río Negro utilizando indicadores biológicos - Informe Final PI UNRN 40-B-254. Inf. téc., Universidad Nacional de Río Negro, 2015. 47, 48
- [50] Klute, A. Methods of soil analysis. SSSA ;, 2^a ed^{ón}. Madison, Wisconsin :: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America,, 1986. 49
- [51] Schaap, M. G., Leij, F. J., van Genuchten, M. T. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, **251**, 163–176, 2001. 50
- [52] Ministerio de Justicia y Derechos Humanos, G. N. Ley 25.916 Gestión Integral de Residuos Domiciliarios, 2004. URL <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/95000-99999/98327/norma.htm>. 71
- [53] Secretaría de Asuntos Municipales, M. d. I. y. T. Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos, 2013. URL https://www.mininterior.gov.ar/municipios/pdfs/SAM_03_residuos_solidos.pdf. 72
- [54] Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S. A. Gestión Integral de Residuos Sólidos Vol. 2. 1^a ed^{ón}. Madrid, España: McGraw-Hill, Inc./Interamericana de España, S.A., 1994. 72
- [55] Tchobanoglous, G., Kreith, F. Handbook of Solid Waste Management. 2^a ed^{ón}. United States of America: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2002. 74

- [56] Anderson, E. A. National weather service river forecast system - snow accumulation and ablation model (NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO-17). Inf. téc., US National Weather Service, Silver Spring, Maryland, 1973. 83
- [57] Ritchie, J. T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research*, **8** (5), 1204–1213, 1972. URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/WR008i005p01204>. 83
- [58] Arnold, J. G., Williams, J. R., Nicks, A. D., Sammons, N. B. SWRRB, a basin scale simulation model for soil and water resources management. 1ª ed^{ón}. College Station, Texas, USA: Texas A & M University Press, 1990. 83
- [59] McEnroe, B. M., Schroeder, P. R. Leachate Collection in landfills: steady case. *Journal of Environmental Engineering ASCE*, **114**, 1052–1062, 1988. 84
- [60] Giroud, J. P., Bonaparte, R. Leakage through liners constructed with geomembranes, Part 1: Geomembrane liners. *Geotextile and Geomembranes*, **8**, 27–67, 1989. 84
- [61] Giroud, J. P., Bonaparte, R. Leakage through liners constructed with geomembranes, Part 2: Composite liners. *Geotextile and Geomembranes*, **8**, 71–111, 1989. 84
- [62] Knisel, W. G., Moffit, D. C., Dumper, T. A. Representing seasonally frozen soil with the CREAMS model. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*, **28**, 1487–1493, 1985. 84
- [63] United States Department of Agriculture (USDA). Urban hydrology for small watersheds. Inf. téc., Conservation Engineering Division, Natural Resources Conservation Service, 1986. 87
- [64] Schroeder, P. R., Dozier, T. S., Zappi, P. A., McEnroe, B. M., Sjostrom, J. W., Peyton, R. L. The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model. Engineering documentation for version 3. EPA/600/R-94/168b, 1994. 90, 91
- [65] National Centers for Environmental Information - NOAA. Climate Data Online Search. URL <https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/search>. 97
- [66] National Renewable Energy Laboratory. National Solar Radiation Database. URL http://rredc.nrel.gov/solar/old_data/nsrdb. 97
- [67] National Aeronautics and Space Administration (NASA). POWER Data Access Viewer. URL <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. 97

- [68] National Aeronautics and Space Administration (NASA). The POWER Project, NASA Prediction of Worldwide Energy Resources. URL <https://power.larc.nasa.gov/>. 97
- [69] European Commission Joint Research Centre. Leaf Area Index - Copernicus Global Land Service, 2020. URL <https://land.copernicus.eu/global/products/lai>. 98
- [70] ASTM International. ASTM D5231-92(2003), Standard Test Method for Determination of the Composition of Unprocessed Municipal Solid Waste, 2003. URL www.astm.org. 98
- [71] IATASA Ingeniería. Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos en los Municipios de San Carlos de Bariloche y Dina Huapi, Provincia de Río Negro. Inf. téc., Programa de Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos en Municipios Turísticos, BID 1868/OC-AR, San Carlos de Bariloche, Argentina, 2011. 98, 99
- [72] Municipalidad de San Carlos de Bariloche. Plan de gestión integral de residuos sólidos urbanos, 2008. URL <http://www.bariloche.gov.ar/upload/BOLETIN/boletin16/102062AnexoI.pdf>. 99
- [73] Pereyra, F., Albertoni, J., Bréard, C., Cavalario, S., Coccia, M., Ducós, E., *et al.* Estudio geocientífico aplicado al ordenamiento territorial, San Carlos de Bariloche, Anales N° 42. Inf. téc., Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) e Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales de Alemania (BGR), Convenio de Cooperación Técnica Geológico Argentino-Alemán, Buenos Aires, Argentina, 2005. URL <https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/83>. 103
- [74] Matrix Piping Systems. HDPE Pipe Prices. URL <https://www.matrixpiping.com.au/pages/poly-pipe-prices>. 105, 109
- [75] LeVeque, R. J. Finite-Volume Methods for Hyperbolic Problems. Cambridge University Press, 2002. 113
- [76] Ogden, F. L., Lai, W., Steinke, R. C., Zhu, J., Talbot, C. A., Wilson, J. L. A new general 1-D vadose zone flow solution method. *Water Resources Research*, **51** (6), 4282–4300, 2015. 113

