

# Permeabilidad del suelo de la cuenca del río Chillán, entre Estero Peladillas y río Ñuble, Chile\*

Permeabilidade do solo da bacia do rio Chillán, entre Estero Peladillas e rio Ñuble, Chile

Soil Permeability in the Chillán River Basin, between Estero Peladillas and the Ñuble River, Chile

Christian Loyola Gómez\*\*

Juan Rivas Maldonado\*\*\*

María José Gacitúa Rojas\*\*\*\*

Universidad del Bío-Bío, Ñuble – Chile

## Resumen

Debido al aumento en la ocupación humana del territorio, se analiza la permeabilidad del suelo de la cuenca, al ser una variable a considerar en los estudios sobre riesgo de inundación. Para ello, se aplicó a los suelos la metodología propuesta por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) para predecir el comportamiento hidráulico, la cual se encuentra validada por los estudios que la anteceden, enfocados a la granulometría, porosidad y textura. Los resultados obtenidos permitieron determinar zonas de permeabilidad de la cuenca; dada su envergadura, se hizo a través de la utilización de una herramienta de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), sin embargo, esta descarta características puntuales que es necesario incorporar a la medición.

**Palabras clave:** cuenca, Chillán, permeabilidad, río, SIG, suelo.

## Resumo

Devido ao aumento da ocupação humana no território, analisa-se a permeabilidade do solo da bacia, ao ser uma variável a considerar nos estudos sobre risco de inundação. Para isso, aplicou-se aos solos a metodologia proposta pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO, por sua sigla em inglês) para prever o comportamento hidráulico, a qual se encontra validada pelos estudos que a antecederem, enfocados na granulometria, porosidade e textura. Os resultados obtidos permitiram determinar áreas de permeabilidade da bacia; por causa da sua importância, a metodologia foi aplicada por meio da utilização de uma ferramenta dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG); contudo, esta descarta características pontuais que precisam ser incorporadas à medição.

**Palavras-chave:** bacia, Chillán, permeabilidade, rio, SIG, solo.

## Abstract

Due to increased human settlement of the territory, the analysis of soil permeability of the basin appears as a variable to consider in studies of flood risk. To this effect, the methodology proposed by FAO to predict hydraulic behavior was applied to the soil. Said methodology has been validated by preceding studies focused on granulometry, porosity, and texture. The results made it possible to identify the basin's permeability zones. The size of the area made it necessary to use a GIS tool; however, this tool discards specific features which need to be incorporated into the measurement.

**Keywords:** river basin, Chillán, permeability, river, GIS, soil.

RECIBIDO: 24 DE ENERO DE 2014. ACEPTADO: 7 DE ABRIL DE 2014.

Artículo de investigación sobre la medición de permeabilidad del suelo como factor de desestabilización.

\* El presente artículo es fruto del proyecto de investigación interna n.º DIUBB 114324 3/1, financiado por la Universidad del Bío-Bío (Chile), titulado "Riesgos de inundación y anegamiento en las comunas de Chillán y Chillán Viejo".

\*\* Dirección postal: Universidad del Bío-Bío, Avenida Cuatro Fundaciones s/n, Chillán; Provincia de Ñuble, Región del Bío-Bío. Chile. CP. 3800708.

Correo electrónico: cloyola@ubiobio.cl

\*\*\* Correo electrónico: jrivas@ubiobio.cl

\*\*\*\* Correo electrónico: merycote23@gmail.com

## Introducción

La permeabilidad del suelo depende de la continuidad del espacio poroso (Khan 1989), y se ve afectada por la presencia de capas endurecidas, cambios texturales, presencia de materia orgánica, actividad microbológica y labranza; por esta razón no existe una única relación entre la porosidad del suelo y su permeabilidad. En este delicado y complejo sistema en el que interactúan materiales terrestres orgánicos e inorgánicos, agua, vegetales, animales superiores y multitud de microorganismos, se entiende la génesis edafológica, a la que se suman características como: pendiente, pedregosidad, textura, drenaje y capacidad de retención de agua, entre otras.

Los primeros estudios de permeabilidad se desarrollaron durante la segunda mitad del siglo XIX, cuando el ingeniero hidráulico Henry Darcy hizo un análisis sistemático del movimiento del agua a través de un medio poroso. En 1856, Darcy publicó su trabajo, en el cual describía estudios experimentales de flujo del agua a través de filtros de arena no consolidada, que eran utilizados en el procesamiento diario de agua potable en Dijon (Francia). Para esto midió la permeabilidad en función de la velocidad del flujo de agua a través del suelo durante un periodo determinado. El coeficiente resultante es una característica de los suelos, específicamente ligada a la ley de Darcy. Este coeficiente generalmente es representado por la letra  $k$  y es extremadamente variable, según el suelo. Su determinación correcta es fundamental para la formación del criterio del proyectista en algunos problemas de ingeniería civil.

Existen estimaciones de permeabilidad en las que se utilizan compilaciones de resultados de modelos hidrogeológicos para demostrar que, a escala regional (> 5 km), la permeabilidad puede ser caracterizada de una manera estadísticamente significativa, y esto permite la elaboración de mapas a escala mundial (Gleeson et ál. 2011). Asimismo, este tipo de escala aumenta la profundidad de la medición, con el objetivo de aportar datos a los estudios climáticos; de acceso a aguas subterráneas; de vulcanismo y terremotos; de formación de yacimientos minerales metálicos y recursos petroleros, además del flujo de fluidos metamórficos a escala de la corteza terrestre, y el desarrollo de presiones de fluido anormales en las cuencas (véase Gleeson et ál. 2011, 1). Se reconocen dificultades de cuantificación por la variación de la permeabilidad a lo largo de más de 13 órdenes de magnitud, su heterogeneidad y la dirección del flujo.

Varios procedimientos permiten determinar la permeabilidad de los suelos (tanto vertical como horizontal), unos directos, así llamados porque se basan en pruebas cuyo objetivo fundamental es la medición de tal coeficiente; entre estos se encuentran el permeámetro de carga constante, el permeámetro de carga variable y la prueba directa de suelos en el lugar. Otros indirectos, proporcionados en forma secundaria por pruebas y técnicas que inicialmente persiguen otros fines, como son los cálculos a partir de la curva granulométrica, de la prueba de consolidación y de la prueba horizontal de capilaridad. La ecuación resultante define las mediciones de permeabilidad real, la cual involucra parámetros propios del fluido y sus unidades, que usualmente se expresan en Darcys<sup>1</sup>, pero a nivel práctico esta es una unidad de mucha magnitud, por lo que generalmente se enuncian las medidas en milidarcys (mD). Asimismo, existen mediciones de permeabilidad intrínseca, que involucran la porosidad y le dan menos peso a las características del fluido alojado en los poros. Es por esto que, además del Darcy, también se puede expresar la permeabilidad en unidades de área<sup>2</sup> (Khan 1989).

No obstante la amplitud de acercamientos, la permeabilidad está vinculada a la *porosidad*, es decir a la relación entre el volumen del espacio vacío de una roca y el volumen total lleno de esta (Mendoza 1998); así como a la *tortuosidad*, definida como la medida de la desviación que presenta el sistema poroso real, respecto a un sistema equivalente de tubos capilares rectos (Craft y Hawkins 1991). Además, a parámetros tales como la saturación de agua, la presión capilar, el grado de compactación, el grado de cementación y la presencia de minerales de arcilla en el suelo (Concepción 2005). Esto dificulta su predicción, ya sea por medio de antiguas técnicas, como son los métodos empíricos, o modernas, como es el uso herramientas computacionales (Altamiranda 2012).

El presente estudio considera la conducción del agua a través del espacio poroso como una capacidad que en una masa rocosa puede actuar como debilitador del sistema e inducir rupturas o fracturamientos (Mendoza

1 Teóricamente, según las normas del Instituto Americano del Petróleo (API), el Darcy se define como el régimen de flujo en mililitros por segundo de un fluido de un centipoise de viscosidad que pasa a través de una sección de un centímetro cuadrado de roca, bajo un gradiente de presión de una atmósfera (760 milímetros de mercurio), en condiciones de flujo viscoso.

2 Ambas unidades se relacionan mediante la siguiente conversión: 1 mD =  $9.869 \times 10^{-16}$  m<sup>2</sup>.

1998). El agua conserva pequeños cambios en la tensión de contacto, varía muy poco en su viscosidad cinemática, sin embargo, junto a materiales finos puede llegar a tener conductas pseudoplásticas o visco-elásticas. Lo anterior convierte la permeabilidad en una de las variables de los métodos de análisis de peligrosidad por inundación, y cambia miramientos hidrológico-hidráulicos, que generan métodos hidrometeorológicos de peligrosidad, basados en vectores meteorológicos y su conversión a escorrentía superficial. Entre ellos se diferencian métodos y modelos según el grado de agregación o de distribución espacial. Estos últimos consideran normalmente una cuenca o una subcuenca hidrográfica como un elemento unitario (Díez, Laín-Huerta y Llorente 2008), con lo cual permiten vislumbrar la necesidad de planteamientos de análisis para determinar con mayor asertividad el comportamiento del agua, del suelo, de ambos conjuntamente y sus posibles efectos sobre el territorio y la población.

Lejos de plantear una respuesta a las necesidades de cálculo eficiente de la permeabilidad en el suelo, la siguiente es una propuesta para el análisis que entrega datos al planificador, para ser considerados con respecto del riesgo de inundación. Para ello se adapta la metodología propuesta por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación —en adelante, FAO— para la medición de permeabilidad de los suelos, que en este caso considera el color, la forma y el tamaño de los granos de arena en un Sistema de Información Geográfico —en adelante, SIG—, con el objeto de representar en toda la cuenca la permeabilidad del suelo.

## Metodología

### Área de estudio

De acuerdo con la división político-administrativa de Chile, el área de estudio se ubica en la región del Bío Bío. Este espacio se caracteriza en el marco del desarrollo histórico de Chile como la antigua zona de frontera, que confrontó la presencia del conquistador español y la resistencia del pueblo mapuche, “situación que incide tanto en la estructura del espacio como en su función” (IGM 2001, 11). En la provincia de Ñuble, las ciudades más importantes presentes dentro de la cuenca son las de Chillán (capital provincial) y Chillán Viejo; ambas actúan como nodos de las comunas del mismo nombre, pertenecientes a la región del Bío Bío, cuya capital re-

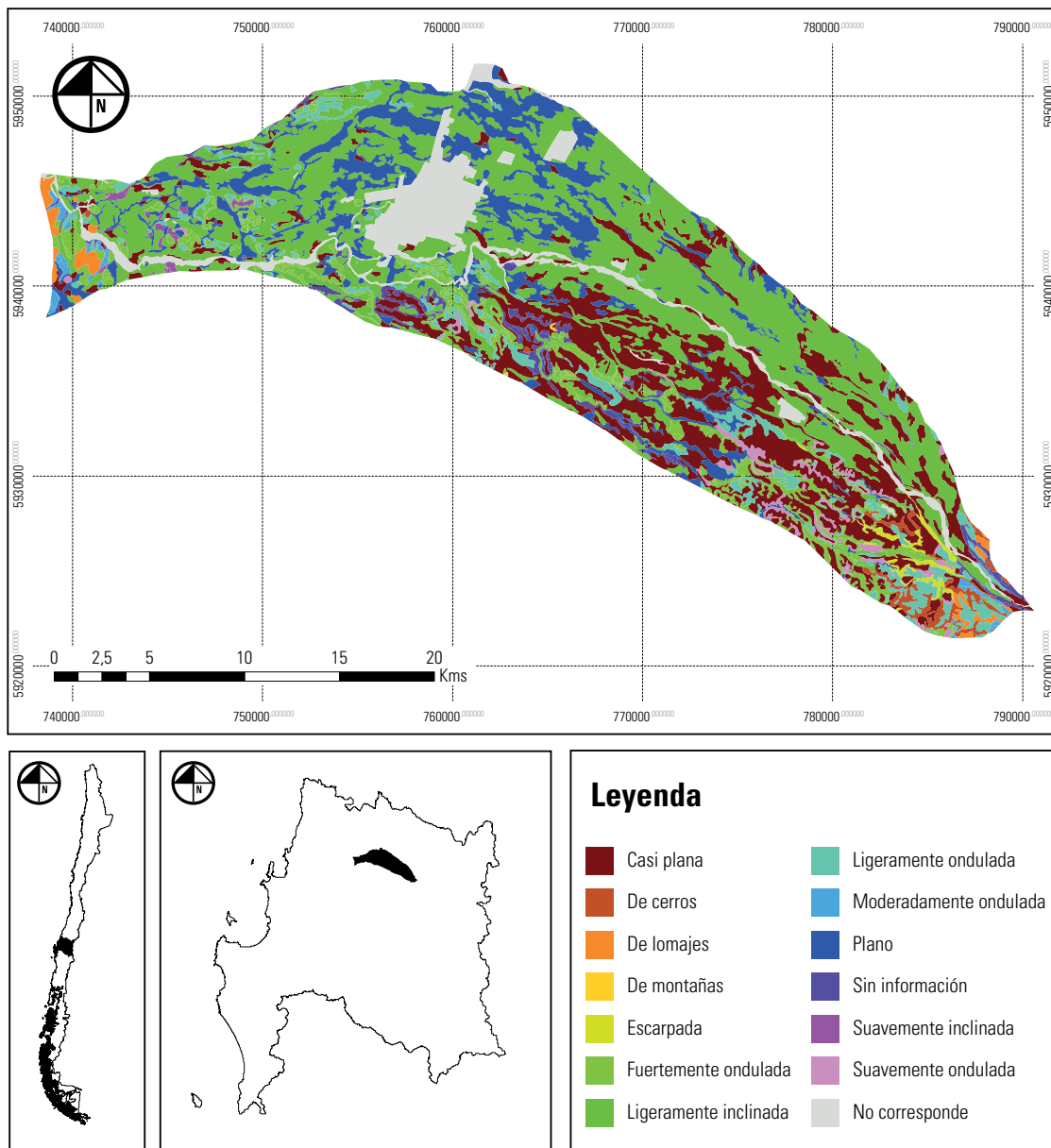
gional es la ciudad de Concepción, ubicada a 512 km de distancia de la capital nacional, Santiago de Chile.

Geográficamente, el área de estudio se ubica heterogéneamente entre el río Ñuble por el norte, el Estero Peladillas por el sur, la cordillera de los Andes por el este y el río Itata por el oeste. Sus coordenadas aproximadas, definidas en un cuadrante son: 36°20' - 72°39', 36°32' - 71°39', 36°50' - 71°39' y 36°50' - 72°20'. La mayor superficie se ubica en la cuenca hidrográfica del río Chillán, específicamente la subcuenca que se desarrolla aguas arriba de la confluencia con el Estero Las Toscas (GORE BIOBÍO 2004). Se incluyen entonces todas las cuencas aportantes de escorrentía, que afectan directa o indirectamente las zonas urbanas actuales según el Plan Regulador Comunal vigente desde abril de 1989, y planificadas de la ciudad de Chillán, tanto de la comuna de Chillán como de la comuna de Chillán Viejo.

El clima de la cuenca se caracteriza por ser del tipo mediterráneo cálido, con estaciones secas y lluviosas: específicamente alrededor de 8 meses lluviosos y 4 cálidos. Estas condiciones son determinadas por el movimiento del anticiclón del Pacífico (IGM 1985), el cual se desplaza hacia el sur en verano, llegando a los 40° LS, y provoca periodos muy secos. En este periodo se registran las temperaturas máximas más altas del país. Por el contrario, el régimen pluviométrico invernal se asocia con las perturbaciones del frente polar, que traslada centros de baja presión hacia el continente mediante vientos con dirección O a E y S a N (Mardones, Echeverría y Jara 2005). No obstante, la temperatura promedio anual en la cuenca bordea los 14°C y 75% de humedad relativa.

La biogeografía donde se enmarca el territorio está dentro de la zona subhúmeda con predominio de vegetación mesófito, arbustiva y de suculentas; la vegetación predominante es de suelos malos, por sobre los 1.000 mm de agua anual, en donde se desarrollan especies como el espino, el quillay, el maitén y el litre. También se pueden encontrar especies hidrófilas como el roble, el coigue, el lingue, el canelo, el radial y el ciprés. Entre las especies faunísticas destacan la culebra de cola larga, el chingue, el quique y el gato montés, relegados a zonas altas o despobladas (Errázuriz et ál. 1998).

La red hidrográfica del sector se caracteriza por la existencia de una “variada red de cursos, que en su conjunto vienen a formar parte de la gran cuenca del río Itata”. En este caso “[...] los ríos Ñuble, Cato y Chillán son de origen pluvionival, caracterizados por grandes caudales en los meses de invierno” (Cáceres 1990, 2).



**Figura 1.** Formas del relieve de la cuenca del río Chillán entre Estero Peladillas y río Ñuble.  
Datos: Ciren-Corfo 1999.

El río Chillán constituye un curso hídrico de segundo orden tributario del sistema mencionado, que corresponde al límite sur de la cuenca aportante. Posee una extensión de 105 km en sentido SE-NO nace en la falda poniente del volcán Nevados de Chillán, en la Cordillera de los Andes, a unos 2.300 m de altitud, y confluye en el río Ñuble, la mayor arteria del río Itata, a 75 msnm en la depresión intermedia (Essbio 2002). Del río Chillán nace una serie de canales de riego de enorme importancia para el sector y concentra importantes núcleos de

población, de ahí su elección para este estudio. Este río alimenta varias bocatomas de canales que escurren por el área aportante en dirección suroriente-norponiente y riegan los predios respectivos.

Respecto de las formas del relieve, la cuenca discurre desde la cordillera de Los Andes hasta el valle central. Sus características físicas han favorecido, al igual que en el resto del país, su ocupación por el hombre. Geomorfológicamente, la ubicación de las ciudades en la cuenca se da en la denominada Depresión Intermedia “cerca del

**Tabla 1.** Taxonomía de los suelos.

Serie	Orden	Subgrupo	Familia
Arrayan	Andisol	Typic Melanoxerands	Media térmica
Asociación Cauquenes	Alfisol	Ultic Palexeralfs	Fina, caolínica, isomésica
Bulnes	Inceptisol	Dystric Fluventic Xerochrepts	Fina mixta térmica
Canosa	Alfisol	Typic Haploxererts	Fina, esmectítica térmica
Carimay	Mollisol	Aquultic Argixerolls	Fina, mixta térmica
Chacayal	Inceptisol	Andic Xerochrepts	Franca, gruesa mixta térmica
Collinco	Alfisol	Typic Rhodoxeralfs	Fina, mixta, térmica
Culnar	Inceptisol	Typic Endoaquepts	Franca, fina mixta, térmica
Gallipavo	Inceptisol	Humic Endoaquepts	Franca fina, mixta, térmica
Llahuecuy	Entisol	Typic Xerosaments	Arenosa, mixta, térmica
Llahuen	Inceptisol	Typic Xerochrps	Franca gruesa, mixta, térmica
Macal poniente	Inceptisol	Mollic Xerofluvents	Franca gruesa mixta, térmica
Mayulermo	Andisol	Humic Haploxerands	Medial, térmica
Mebuca	Mollisol	Aquic Haploxerolls	Arcillosa mixta térmica
Mirador	Alfisol	Ultic Palexeralfs	Fina mixta térmica
Niblinto	Ultisol	Typic Haploxerults	Muy fina caolínica, térmica
Ninhue	Inceptisol	Aquic Xerochrps	Franca, fina, mixta, térmica
Ninquihue	Mollisol	Ultic Haploxerolls	Franca gruesa mixta, térmica
Quella	Vertisol	Aquic Durixerert	Fina smectítica térmica
Quillón	Entisol	Typic Xerosaments	Arenosa, mixta, térmica
Quilmen	Inceptisol	Typic Xerochrepts	Fina mixta térmica
Quinchamáli	Mollisol	Typic Palexerolls	Fina mixta térmica
Santa Bárbara	Andisol	Typic Haploxerands	Media mésica
Talquipen	Mollisol	Ultic Haploxerolls	Franca fina mixta térmica

Datos: Comisión Nacional de Riego 1987.

borde noroccidental de la llanura piemontana del río Itata” (Cáceres 1990, 19), como una planicie suavemente ondulada, con materiales de origen fluvio-glacio-volcánico depositados por los ríos Ñuble e Itata, en un gran cono aluvial desde San Carlos al Sur (figura 1).

### Métodos

La permeabilidad definida cualitativamente expresa la facilidad del suelo para conducir o transmitir fluidos. Cuantitativamente se define como la propiedad del medio poroso, independiente del fluido usado para medir y, por consiguiente, de la viscosidad de este. La permeabilidad, entonces, resulta útil a la caracterización del sitio en la construcción, a la agricultura, como indicador de la presencia o no de aguas subterráneas para consumo humano y, últimamente, como indicador de degradación del suelo. Su variación depende de la composición de la roca, la existencia de limo o arcilla, o de materiales cementante de tipo arcilloso, los cuales tienden a ralentizar el proceso, por lo que a la hora de estudiar los suelos de la cuenca se hace necesario reconocer la textura de estos de acuerdo a su estructura (Bigelow 2002) (tabla 1).

La tabla 1 muestra las series de suelos existentes en la cuenca, a partir de los datos obtenidos del Estudio

Agrológico VIII Región del Bío Bío del Centro de Información de Recursos Naturales, Corporación de Fomento a la Producción de 1999. Estas series de suelos expresan características que ingresadas al SIG facilitan la formación de clases texturales en el área de estudio (tabla 2); las cuales son formadas por medio de la creación de grupos según tamaño del grano. Las indicaciones para este agrupamiento son provistas según mediciones directas que luego son comparadas con las medidas establecidas por el ministerio de agricultura de Estados Unidos para el establecimiento de las clases texturales.

Es muy usual que la permeabilidad y la conductividad hidráulica se usen indistintamente. Esto se debe a que se supone la densidad del agua igual a la unidad y que la viscosidad permanece constante, aunque existe entre ellas diferencias de concepto. El coeficiente de permeabilidad ( $k$ ) es el que tiene las mismas dimensiones que una velocidad. Los edafólogos suelen medirla en cm/h o mm/h; los hidrólogos prefieren el empleo de las unidades cm/día o m/día. Lunne, Robertson y Powell (1997) sugieren que la permeabilidad del suelo puede ser estimada usando las tablas de comportamiento del tipo suelo —en adelante, SBT—. Bajo esta proposición, Robertson (2010) sugiere una gama de valores  $k$  (tabla 3).

**Tabla 2.** Clases texturales de suelos.

Nombres de los suelos (textura general)	Arenoso	Limoso	Arcilloso	Clase textural
Suelos arenosos (textura gruesa)	86-100	0-14	0-10	Arenoso
	70-86	0-30	0-15	Franco arenoso
Suelos francos (textura moderadamente gruesa)	50-70	0-50	0-20	Franco arenoso
	23-52	28-50	7-27	Franco
	20-50	74-88	0-27	Franco limoso
Suelos francos (textura mediana)	0-20	88-100	0-12	Limoso
	20-45	15-52	27-40	Franco arcilloso
	45-80	0-28	20-35	Franco arenoso arcilloso
Suelos francos (textura moderadamente fina)	0-20	40-73	27-40	Franco limoso arcilloso
	45-65	0-20	35-55	Arcilloso arenoso
	0-20	40-60	40-60	Arcilloso limoso
Suelos arcillosos (textura fina)	0-45	0-40	40-100	Arcilloso

Datos: FAO 2009 (Clases texturales del suelo según USDA Ministerio de Agricultura, Estados Unidos).

**Tabla 3.** Estimación de la permeabilidad del suelo (k).

Zona SBTn	SBTn	Rango de k (M/s)	SBTn Ic
1	Grano fino sensible	3x10 <sup>-10</sup> de 3x10 <sup>-8</sup>	NA
2	Los suelos orgánicos - arcilla	1x10 <sup>-10</sup> to 1x10 <sup>-8</sup>	Ic > 3,60
3	Arcilla	1x10 <sup>-10</sup> to 1x10 <sup>-9</sup>	2,95 < Ic < 3,60
4	Mezcla de limo	3x10 <sup>-9</sup> to 1x10 <sup>-7</sup>	2,60 < Ic < 2,95
5	Mezcla de arena	1x10 <sup>-7</sup> to 1x10 <sup>-5</sup>	2,05 < Ic < 2,60
6	Arena	1x10 <sup>-5</sup> to 1x10 <sup>-3</sup>	1,31 < Ic < 2,05
7	Arena densa de arena grava	1x10 <sup>-3</sup> to 1	Ic < 1,31
8	Muy denso / rigidez del suelo	1x10 <sup>-8</sup> to 1x10 <sup>-3</sup>	NA
9	Muy dura suelo de grano fino	1x10 <sup>-9</sup> to 1x10 <sup>-7</sup>	NA

Datos: Robertson 2010.

Aunque estas expresiones vinculan el coeficiente de permeabilidad con la relación de vacíos, se deben adoptar ciertas hipótesis cuyo carácter permite que las conclusiones del análisis entreguen información cuantitativa correcta, considerando que la mayor compactación del suelo presenta menores espacios vacíos y menor permeabilidad, pero al mismo tiempo es posibles agrupar estos valores en expresiones cualitativas. Sin embargo, hay que considerar heladas, ciclos alternados de humedecimiento y secado, efectos de la vegetación y de pequeños organismos que pueden cambiar las condiciones del suelo, y que provoquen, en este caso, discontinuidades, fisuras y agujeros. Por otro lado, es necesario tener en cuenta la saturación y temperatura del agua, la estructura y estratificación, el tamaño de las partículas, hasta la velocidad de infiltración que hace que las características de permeabilidad de los suelos sean diferentes (Angelone, Garibay y Cauhapé 2006). Por esta razón se somete a las clases texturales a medición de velocidad para establecer su permeabilidad (tabla 4).

**Tabla 4.** Clasificación de permeabilidad (cm/h).

Velocidad	Tiempo
Muy lenta	menos de 0,15
Lenta	0,15 a 0,50
Relativamente lenta	0,5 - 2,0
Moderada	2,0 - 6,5
Relativamente rápida	6,5 - 15,0
Rápida	15 a 25
Muy rápida	más de 25

Datos: Cisneros 2010.

Para efectos de este estudio, se utiliza la tabla simplificada de Cisneros (2010), que ya incorpora la valoración cualitativa con su correspondencia cuantitativa, en un cruce de información que es realizado generalmente en los estudios petrofísicos. Dichos estudios clasifican la permeabilidad en primaria y secundaria, lo que suma nuevas consideraciones a tener en cuenta, ya que la permeabilidad primaria, o permeabilidad de la matriz, es aquella que se origina en el momento de depositación de la roca; mientras

que la permeabilidad secundaria es el resultado de la alteración de la roca, debido a procesos de cementación, compactación, disolución y fracturamiento, entre otros (Concepción 2005).

Someter las clases texturales a este procedimiento permite obtener una relación entre la textura y la permeabilidad, que se manifiesta en la acreditación de al menos tres grandes grupos (tabla 5). Los grupos expresan la textura del suelo (arcillosos, francos y arena), lo que se condice con la información ya recopilada, es decir que, mientras más fina sea la textura del suelo, más lenta será la permeabilidad. Bajo esta circunstancia, la grava limpia, las arenas limpias o mezcladas con grava, al igual que las finas, tienen una permeabilidad rápida; los limos orgánicos e inorgánicos, las mezclas de limo y arcilla tienen una permeabilidad moderada y los depósitos estratificados de arcilla y las arcillas homogéneas por debajo de la línea de meteorización tienen una permeabilidad lenta.

**Tabla 5.** Relación textura del suelo con la permeabilidad.

Textura del suelo	Permeabilidad
Franco arcilloso y arcilloso	Bajo
Franco limoso	Bajo a moderadamente bajo
Franco arenoso	Moderado a moderadamente rápido
Arena gruesa	Moderadamente rápida a rápida

Datos: Vásquez 2000.

Estos datos son coincidentes con la tabla de equivalencia propuesta por la FAO (2009), que considera las características del suelo y la textura en la creación de clases para la permeabilidad. Esta, ocupada como insumo, permite reagrupar las clases texturales y, de esta forma, facilita la zonificación de la permeabilidad en la cuenca y evidencia gradualidad en los sectores, más allá de su expresión como una tasa o coeficiente de permeabilidad en metros por segundo (m/s) o en centímetros por segundo (cm/s) (tabla 6).

**Tabla 6.** Textura del suelo y su correspondiente permeabilidad.

Permeabilidad	Textura y Perfil	Comportamiento físico	Color y manchas de color
Muy rápida.	Suelos de textura gruesa o gravosa.		Color brillante, salvo cuando la capa freática es alta.
Permeabilidad rápida.	Suelos de textura mediana o moderadamente gruesa.		No hay manchas de color a menos que la capa freática sea alta. El contenido de materia orgánica suele ser moderado o bajo.
Permeabilidad moderadamente rápida.	Suelos de textura moderadamente fina a media.		Manchas de color, ocasionales. Por lo general, el color es amarillo moderadamente brillante.
Permeabilidad moderadamente lenta.	Horizonte de textura moderadamente fina ligeramente plástica en mojada y moderadamente dura en seco.	La contracción, por lo general, no es muy pronunciada y las fisuras no son ni muy grandes ni numerosas.	Moderadas manchas de color, pero el color es más brillante que en la clase de permeabilidad lenta.
Permeabilidad lenta.	Arcillosa o arcillosa limosa, capas de arcilla, capas moderadamente endurecida. Limo, capas limosas.	La contracción y el agrietamiento son menos pronunciados que en la clase de permeabilidad muy lenta.	Las manchas de color son moderadamente intensas. Estas y el color grisáceo caracterizan este tipo de estructura.
Permeabilidad muy lenta.	Capas de arcilla, arcilla densa o presentes con substratos de muy lenta permeabilidad. Capas endurecidas a diferencia de las capas de arcilla.	Cuando se seca, el terreno se agrieta muy suavemente, salvo las capas endurecidas que no se agrietan o rompen. Las capas endurecidas que se asocian con esta clase suelen consistir en capas de arena altamente endurecidas o arena y grava. Cuando se golpea con el azadón emite un sonido vibrante.	Por lo general, con manchas de color.

Datos: FAO 2009.

Finalmente se crean clases de permeabilidad de los suelos que son valorados de acuerdo su velocidad. Estos nuevos grupos, que dependen de las características desarrolladas por cada hectárea en estudio, se expresan como: a) muy rápida, b) rápida, c) moderadamente rápida, d) moderadamente lenta y e) muy lenta (tabla 7). Al mismo tiempo, la valoración de estas características permite instalar precedentes de análisis, por ello se crean seis categorías que zonifican la cuenca, considerando el amplio rango de texturas del suelo y su relación con los grados de permeabilidad de este. La última de ellas, considera aquellos territorios donde no corresponde realizar la medición (cajas de ríos, ciudad y localidades) o simplemente no existe información, los cuales son agrupados al final.

**Tabla 7.** Valoración y correspondencia de la permeabilidad con la textura.

Valor numérico	Permeabilidad	Textura
1	Muy rápida	Gruesa
2	Rápida	Medianamente gruesa
3	Moderadamente Rápida	Fina a media
4	Moderadamente Lenta	Arcillosa
5	Muy Lenta	Capas de arcilla densa
6	No corresponde	

Datos: Ciren-Corfo 1999.

## Resultados y discusión

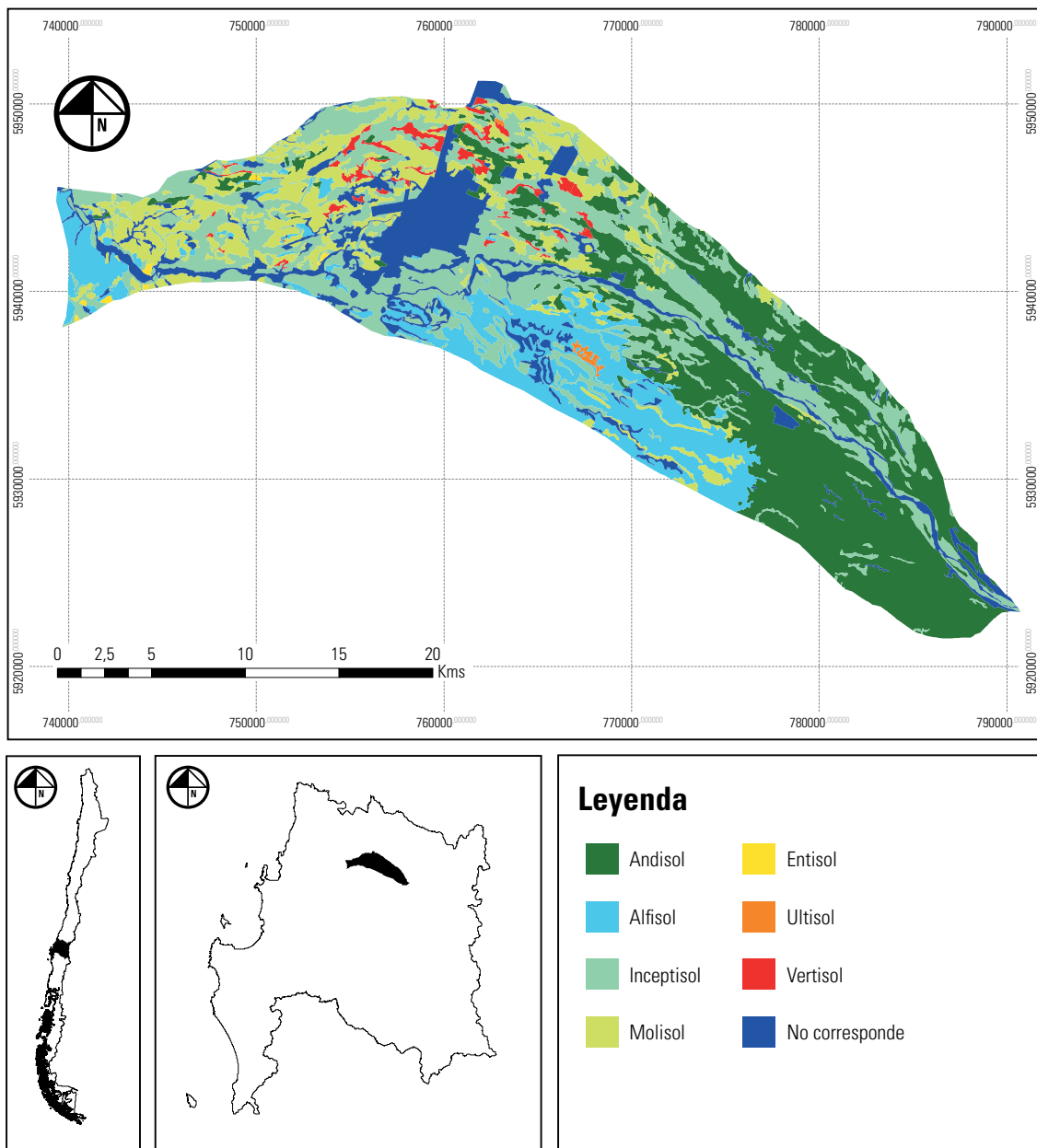
La cuenca de Chillán está profundamente deprimida y ha sido favorable para la recepción de toda clase de acarreo provenientes de los macizos andinos, gruesos en el borde oriental de la Depresión Intermedia y predominantemente finos hacia el sector occidental. Así, Chillán y Chillán Viejo poseen las siguientes unidades morfológicas: “plataformas piemontanas, terrazas fluviovolcánicas, paleocanales o paleodefluviaciones y terrazas fluviales o fluvio-glaciares” (Cáceres 1990, 28). El sitio de ambos núcleos urbanos se encuentra en la llanura de suelos hidromórficos cuyo nivel freático es alto o cercano a la superficie (Mardones 1990), con alta susceptibilidad a inundaciones y anegamientos invernales. Son terrenos no aptos para la construcción de

infraestructura vial y urbana, viviendas o instalaciones urbanas, sin previo mejoramiento o adecuación de los suelos (Henríquez Fernández 2000).

La figura 2 entrega un panorama más detallado de los suelos en el área de estudio, indicando la ubicación de los cursos de agua y los sectores urbanos. En este caso, los suelos negros de origen volcánico que permiten una variedad de cultivos (Andisol) cubren un 29,35% del área de estudio, pero están emplazados en la ladera inferior de la cordillera de los Andes con pendientes de magnitud apreciable. Los suelos con poco desarrollo de los horizontes (Inceptisol) representan un 28,62%, y se encuentran heterogéneamente repartidos en la Depresión Intermedia alrededor de la ciudad. Aquellos suelos profundos, bien estructurados, que poseen un horizonte subsuperficial con abundante arcilla iluvial (Alfisol) corresponden a un 13,27% de la superficie de la cuenca. Estos suelos se explican por la fosilización hacia el E y S, por los depósitos torrenciales y fluviovolcánicos de la formación La Montaña (pleistoceno inferior) y por las arenas del cono del río Laja (Holoceno) (Cáceres 1990). Sus afloramientos se observan en los valles de los ríos y esteros locales, como también en los cortes de carreteras y caminos. Esta unidad se distribuye en la Depresión Central, y muchos de los materiales sedimentarios que se encuentran en la ciudad consisten en alteraciones de limonitas, areniscas finas y conglomerados, con intercalaciones de arcillolitas y tobas (Gajardo 1981). Aquellos suelos con importante acumulación de humus en la superficie del horizonte (Mollisol) representan un 13,86%, y se encuentran ubicados al norponiente y poniente de la ciudad, en la Depresión Intermedia. Por último, los suelos recientes que se dan en planicies de inundación u otros depósitos recientes estratificados, pero con escasa horizontación (Entisol), más la presencia de arcillas expansivas (Vertisol), representan un 2,01%.

El estudio revela que el suelo de la cuenca del río Chillán presenta en mayor medida una permeabilidad moderadamente rápida (40,7%), en el sector superior de la cuenca con suelos francos. A ello se suma la pendiente de este sector, que es de mayor magnitud debido a su cercanía con la estructura de la Cordillera de los Andes. A su vez, a estos hay que añadir aquellos suelos catalogados como de permeabilidad rápida (4,4%), que están asociados a la ribera del río Chillán y a los cursos de agua, generalmente con características de estructura más arenosas, donde la permeabilidad puede llegar a ser excesiva, de modo que el agua se pierde pronto y con ella los nutrientes. Por esta razón, en estos suelos

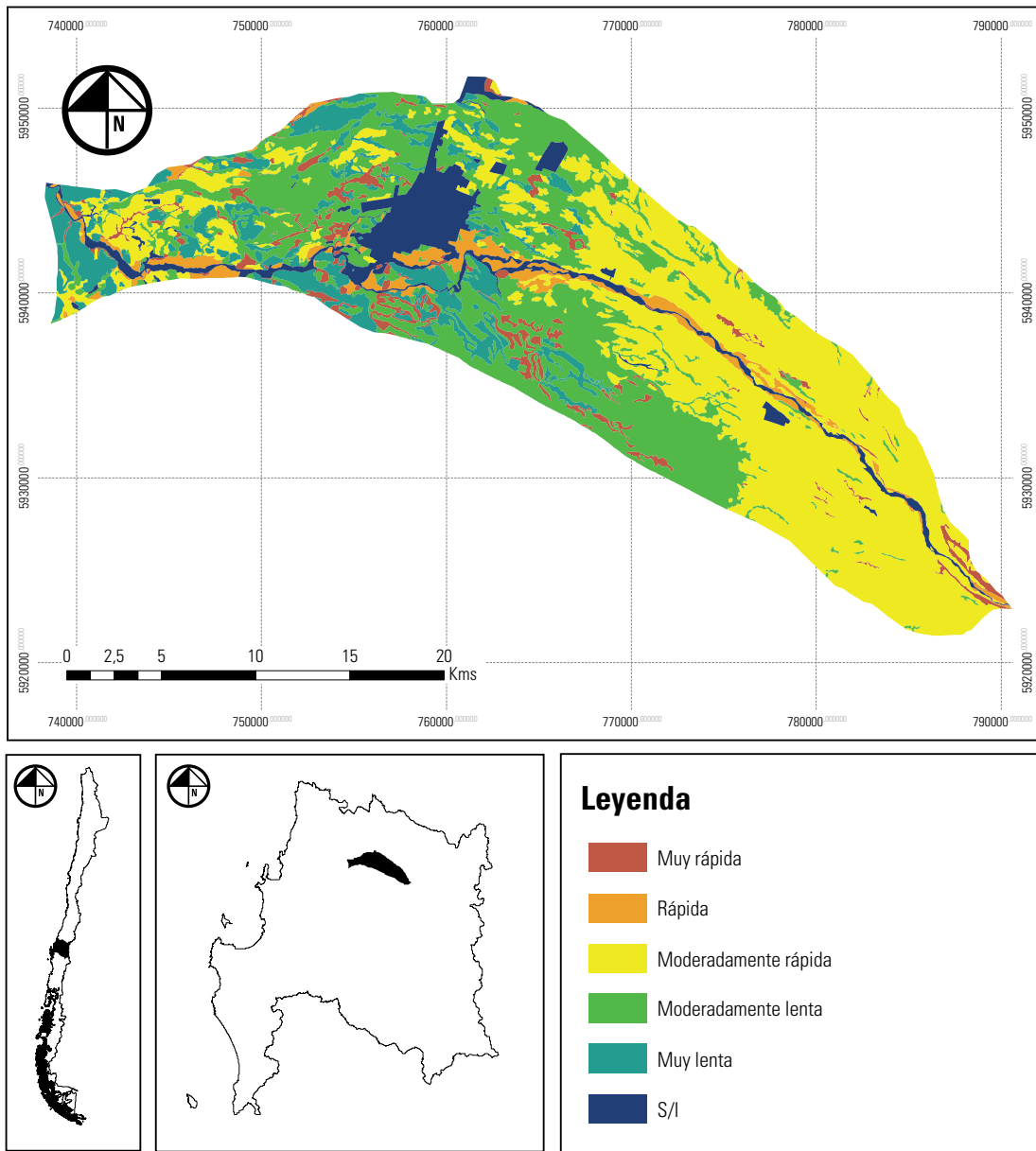




**Figura 2.** Orden de los suelos de la cuenca del río Chillán entre Estero Peladillas y río Ñuble.  
Datos: Ciren-Corfo 1999.

la falta de agua es más perjudicial que en los francos; es decir, son suelos generalmente pobres en los que también puede verse limitado el crecimiento por falta de agua y nutrientes. Por último, los suelos de la cuenca que presentan una permeabilidad muy rápida (4,9%) se encuentran repartidos de forma heterogénea. Estos suelos bien drenados pueden actuar como un filtro si existen aguas subterráneas, para el uso y consumo agrícola y humano (tabla 8).

La permeabilidad de la cuenca se ve afectada en los suelos arcillosos donde esta puede llegar a ser tan reducida que daría lugar a problemas para la adecuada aireación del sistema radicular por la presencia de capas endurecidas, cambios texturales, presencia de materia orgánica, actividad microbiológica, labranza continua y el uso de maquinaria de manera excesiva. Esto trae aparejado consecuencias en la vegetación, ya que la mayoría de la vida vegetal no puede resistir suelos



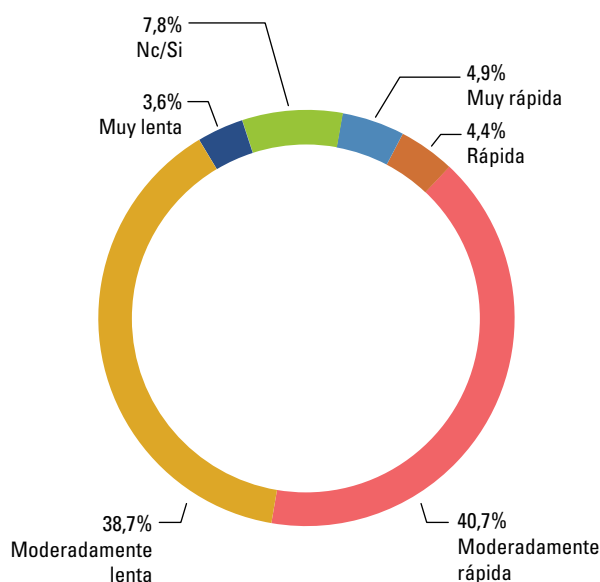
**Figura 3.** Permeabilidad del suelo cuenca del río Chillán entre Estero Peladillas y río Ñuble.  
Datos: Ciren-Corfo 1999.

**Tabla 8.** Permeabilidad del suelo.

Permeabilidad	n.º Polígonos	Hectáreas	%
Muy rápida	1.459	258,52	4,88
Rápida	1.319	231,89	4,38
Moderadamente rápida	7.866	2.152,96	40,66
Moderadamente lenta	10.283	2.047,65	38,67
Muy lenta	638	191,27	3,61
NC/SI	904	412,90	7,80
<b>TOTAL</b>	<b>22.469</b>	<b>5.295,19</b>	<b>100,00</b>

Datos: Ciren-Corfo 1999.

que son correosos o pantanosos. Los suelos arcillosos crean esas condiciones y pueden causar putrefacción y pobre absorción de nutrientes. Estas condiciones se reflejan en porcentajes del territorio de la cuenca con permeabilidades moderadamente lentas (38,67%) y muy lentas (3,61%), que se encuentran ubicados en el llano central perteneciente a la depresión intermedia, donde también están ubicadas las zonas urbanas —sectores hacia donde crece la ciudad en la intercomuna de Chillán—. Por último, respecto del porcentaje de la cuenca con datos que no corresponden al estudio, estos están expresados solo en un 7,8%, referidos a algunos sistemas lacustres, cajas de ríos y el área urbana de las ciudades de Chillán y Chillán Viejo (figuras 3 y 4).



**Figura 4.** Distribución (%) de la permeabilidad del suelo en la cuenca del río Chillán entre Estero Peladillas y río Ñuble. Datos: Ciren-Corfo 1999.

## Conclusiones

Los estudios de permeabilidad tienen relevancia cuando se les analiza desde el riesgo de inundación; sin embargo, existe la necesidad de contar con herramientas y estudios hidrogeológicos que permitan ampliar en calado el análisis de los suelos, eliminando factores de distorsión localizados, como fisuras y cárcavas, carga en el uso y labranza, entre otras. Al mismo tiempo, se requiere de estudios que consideren el quimismo de los suelos, ya que para el caso de arcillas y limos, la presencia de ciertos cationes (sodio, potasio) constituyen un factor que disminuye la permeabilidad en relación a otros (calcio, magnesio). A pesar de ello, se destaca que la escala adoptada es considerada adecuada por los autores y la estructura metodológica incorpora elementos usados directos e indirectos ocupados por la industria para la realización del presente estudio.

Los resultados permiten la observación de suelos permeables como equilibrados y estables, mientras que aquellos con un mal drenaje pueden ceder o compactarse. Es decir, existe una relación intrínseca entre la textura del suelo y la permeabilidad, ya que a menor tamaño de grano menor permeabilidad y para una granulometría semejante a mejor gradación mayor permeabilidad. Asimismo, al comparar el recorrido que sigue el agua a través de granos que son planos y grandes con el recorrido de granos planos y pequeños, se observa que la permeabilidad horizontal disminuye aun cuando sus direcciones sean aproximadamente las mismas.

Con respecto al área de estudio y las actividades a realizar, se recomienda la labranza de conservación, por medio de la utilización de técnicas de aprovechamiento de agua, incorporación de los residuos vegetales, estiércoles, así como otras técnicas que incrementan la permeabilidad y optimizan la retención de agua, pero disminuyen la vulnerabilidad. Con estas acciones se favorece la filtración de químicos en las aguas subterráneas, lo cual mejora su calidad para uso y consumo humano.

**Christian Loyola Gómez**

Profesor de Historia y Geografía de la Universidad del Bío-Bío (Chile). Magíster en Asentamientos Humanos y Medio Ambiente de la Pontificia Universidad Católica de Chile (Chile). Director de Escuela de la carrera de Pedagogía en Historia y Geografía.

**Juan Rivas Maldonado**

Profesor de Historia y Geografía de la Universidad del Bío-Bío (Chile). Magíster en Dirección Estratégica en Tecnologías de la Información de la Universidad de León (España). Profesor a cargo del Laboratorio de Geografía de la Universidad del Bío-Bío (Chile).

**María José Gacitúa Rojas**

Profesora de Historia y Geografía de la Universidad del Bío-Bío (Chile).

Para citar este artículo, utilice el título completo así:

Loyola Gómez, Christian, Juan Rivas Maldonado y María José Gacitúa Rojas. 2015. "Permeabilidad del suelo de la cuenca del río Chillán, entre Estero Peladillas y río Ñuble, Chile". *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 24 (1): 73-86.



Excepto que se establezca de otra forma, el contenido de este artículo cuenta con una licencia Creative Commons "reconocimiento, no comercial y sin obras derivadas"

Colombia 2.5, que puede consultarse en <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/co/>

## Referencias

- Altamiranda, Dignorah. 2012. "Determinación de permeabilidad utilizando teoría fractal en campos de Venezuela y Estados Unidos". Tesis de grado, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas. <http://www.gc.usb.ve/geocoordweb/Tesis/Pre/Dignorah%20Altamiranda.pdf>
- Angelone, Silvia, María Teresa Garibay y Marina Cauhapé. 2006. "Geología y geotecnia: permeabilidad de suelos". Rosario: Universidad Nacional de Rosario. <http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Permeabilidad%20en%20Suelos.pdf>
- Bigelow, Ed. 2002. *Introduction to Wireline Log Analysis*. Texas: Baker Atlas.
- Cáceres, Luis Alfonso. 1990. "Los riesgos naturales en el sitio de la ciudad de Chillán". Memoria de grado, Universidad del Bío-Bío, Chillán.
- Cisneros, Rodolfo. 2010. "Apuntes de la materia de Riego y Drenaje". San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí. <http://ingenieria.uaslp.mx/web2010/Estudiantes/apuntes/Apuntes%20de%20Riego%20y%20Drenaje%20v.2.pdf>
- Ciren-Corfo (Centro de Información de Recursos Naturales - Corporación de Fomento a la Producción). 1999. *Estudio Agrológico VIII Región del Bío Bío*. Argentina: Ciren-Corfo.
- Comisión Nacional de Riego. 1987. *Estudio de suelos Proyecto Itata, Etapa 1 Tomo II Consorcio agroecológico*. Santiago: Comisión Nacional de Riesgos.
- Concepción, Mónica Isabel. 2005. "Efectividad de las ecuaciones de Pittman y de Winland para el cálculo de permeabilidad en areniscas". Tesis de grado, Universidad Simón Bolívar, Caracas.
- Craft, Benjamin y Murray Hawkins. 1991. *Applied Petroleum Reservoir Engineering*. Nueva Jersey: Prentice Hall.
- Díez, Andrés, Luis Laín-Huerta y Miguel Llorente. 2008. *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones: guía metodológica para su elaboración*. Serie Riesgos Geológicos/Geotecnia 1. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Errázuriz, Ana María, Pilar Cereceda, José Ignacio González, Mireya González, María Henríquez y Reinaldo Rioseco. 1998. *Manual de geografía de Chile*. 3<sup>ed</sup>. Santiago: Andrés Bello.
- ESSBIO (Empresa Servicios Sanitarios del Bío Bío). 2002. *Plan maestro de evacuación y drenaje de aguas lluvias de Chillán y Chillán Viejo*. Santiago: Asociación de Empresas Consultoras de Ingeniería de Chile (INGENDESA).
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2009. "Permeabilidad del suelo". *Colección FAO capacitación*. [ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO\\_training/FAO\\_training/general/x6706s/x6706s09.htm](ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_training/FAO_training/general/x6706s/x6706s09.htm)
- Gajardo, Aníbal. 1981. "Hoja Concepción-Chillán, región del Bío Bío". Mapa escala 1:250.000. *Mapas geológicos preliminares de Chile 4*. Santiago: Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Gleeson, Tom, Leslie Smith, Nils Moosdorf, Jens Hartmann, Hans H. Dürr, Andrew Manning, Ludovicus van Beek y Jellinek Elvin. 2011. "Mapping Permeability over the Surface of the Earth". *Geophysical Research Letters* 38 (2). doi: 10.1029/2010gl045565.
- GORE BIOBIO (Gobierno Región Bío Bío). 2004. *Gobierno regional Bío Bío: Plan Regional de Desarrollo Urbano VIII Región del Bío Bío*. Memoria explicativa. Argentina: Secretaría Regional Ministerial de vivienda y Urbanismo Octava Región, URBE Arquitectos.
- Henríquez Fernández, Martha. 2000. "Antecedentes preliminares para el estudio del desarrollo sustentable de la ciudad de Chillán-Chile". *Tiempo y Espacio* 9-10:129-140.
- IGM (Instituto Geográfico Militar). 1985. "Geografía de los Climas". Tomo XI de *Geografía de los climas*, coordinado por Hugo Romero Aravena. Argentina: IGM.
- IGM (Instituto Geográfico Militar). 2001. "Geografía de Chile: geografía de la región del Bío Bío". Tomo VIII de *Región del Bío Bío*, coordinado por María Mardones. Argentina: ING.
- Khan, Muhammad Nasir. 1989. *Introduction to Wireline Log Interpretation*. Islamabad: Oil and Gas Development Corporation.
- Lunne, Tom, Peter Kay Robertson y John J. M. Powell. 1997. *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. Nueva York: Blackie Academic, Spon Press.
- Mardones, María. 1990. "Los riesgos naturales en el sitio de la ciudad de Chillán: riesgo sísmico, de inundación y de anegamiento". En *Ciudades intermedias: Chillán*, editado por Didima Olave Farias, 8-38. Chillán: Universidad de La Serena.
- Mardones, María, Freddy Echeverría y Constanza Jara. 2005. "Una contribución al estudio de los desastres naturales en Chile Centro Sur: efectos ambientales de las precipitaciones del 26 de junio del 2005 en el área Metropolitana de Concepción". *Investigaciones Geográficas* 38:1-25.
- Mendoza, Jorge. 1998. *Introducción a la física de rocas*. Caracas: Equinoccio, Universidad Simón Bolívar.
- Robertson, Peter K. 2010. "Estimating in-situ Soil Permeability from CPT & CPTu". Memorias del *2nd International Symposium on Cone Penetration Testing*, California State Polytechnic University Pomona, CA. [http://www.cpt10.com/PDF\\_Files/2-51Robehc.pdf](http://www.cpt10.com/PDF_Files/2-51Robehc.pdf)

Vásquez, Absalon. 2000. *Manejo de cuencas alto andinas*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.

## Bibliografía

Comisión Nacional de Riego. 1994. *Estudio integral de riego proyecto Itata*. Vol. 2. Santiago: Comisión Nacional de Riego. [http://bibliotecadigital.ciren.cl/gsdlexterna/collect/estudios/index/assoc/HASH0131.dir/CNR-0014\\_2.pdf](http://bibliotecadigital.ciren.cl/gsdlexterna/collect/estudios/index/assoc/HASH0131.dir/CNR-0014_2.pdf)

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2000. *El riego en América Latina y el Caribe en cifras*. Roma: FAO.

MOP (Ministerio de Obras Públicas del Gobierno de Chile). 2004. *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: cuenca del río Itata*. Chile: Cade-Idepe Consultores en Ingeniería. [http://www.sinia.cl/1292/articles-31018\\_Itata.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-31018_Itata.pdf)