

DESARROLLO DE LA REGIÓN DE ÑUBLE: PROSPECTIVA SEGÚN LA PERMEABILIDAD DE LOS SUELOS

Development of the Region of Ñuble: prospective according to soil permeability

Juan Rivas Maldonado | Universidad del Bío-Bío | jrivas@ubiobio.cl

Christian Loyola Gómez | Universidad del Bío-Bío | cloyola@ubiobio.cl

RESUMEN: Debido al aumento en la ocupación humana del territorio y las perspectivas de desarrollo del mismo, se requieren diversos análisis de las características de los suelos en la región de Ñuble, por lo cual se analiza la permeabilidad por constituirse en una variable a considerar en el poblamiento humano, además este tipo de estudios se reconoce como insumo para la nueva región. Para ello, se aplica a los suelos de la región la metodología propuesta por la FAO, que se encuentra validada por una serie de estudios que la han antecedido, enfocados a la granulometría, porosidad y textura de los mismos, logrando establecer zonas que permiten predecir el comportamiento hidráulico, las cuales son información para la instalación de actividades productivas y el asentamiento. Sin embargo, la envergadura del territorio considerado ha descartado características puntuales necesarias de incorporar en futuras mediciones.

PALABRAS CLAVES: Suelo – Permeabilidad – Región de Ñuble

SUMMARY: Due to the increase in human occupation of the territory and the prospects for its development, several analyses of soil characteristics in the Region of Ñuble are required, for which permeability is analyzed because it is a variable to be considered in human settlement, and this type of study is recognized as an input for the new region. For this purpose, the methodology proposed by FAO is applied to the soils of the region, which is validated by a series of studies that have preceded it, focused on their granulometry, porosity and texture, managing to establish zones that allow predicting the hydraulic behavior, which are information for the installation of productive activities and settlement. However, the size of the territory considered has ruled out specific characteristics necessary to incorporate in future measurements.

KEY WORDS: Soil – Permeability – Region of Ñuble

INTRODUCCIÓN

Los estudios de suelos entregan información que permite realizar predicciones acerca del uso potencial y su manejo. Si bien existe cartografía con información detallada, esta no es la más adecuada para estudios regionales. Por esta razón se hace necesario contar con información de suelos a una escala adecuada en donde el reconocimiento permita mostrar y evaluar el comportamiento para el análisis del planificador. En este caso, los suelos serán agrupados según grados de permeabilidad, cuestión que permite identificar zonas que facilitarán su caracterización hidráulica para el establecimiento de actividades productivas y el asentamiento humano.

La utilización de un indicador de permeabilidad otorga nuevas herramientas en la gestión de los suelos de la región, en este sentido la ocupación del espacio tiene directa relación con funciones productivas que confieren identidad al territorio. Históricamente en la región de Ñuble, es la actividad agrícola la que ha otorgado esa identificación, considerando la amplitud que tiene el espacio rural, cuestión que funcionaliza el resto de las actividades y su medición. Sin embargo, la arremetida de la industria forestal, la cual termina disputando los espacios funcionales, permite realizar un examen de los suelos más allá de tipologías agrarias.

El estudio considera la caracterización del comportamiento hidráulico de las series de suelos de la región, agrupados según orden, para efectos de análisis y representación cartográfica. La aplicación metodológica considera la caracterización de la permeabilidad de cada serie de suelo y luego su agrupación respectiva, representada cartográficamente. Los resultados muestran que en la región de Ñuble los asentamientos humanos se encuentran en áreas donde la permeabilidad es moderada, lo que incide en su seguridad, acceso a fuentes de alimento y disponibilidad de agua.

DESARROLLO

Los estudios de permeabilidad (tanto vertical como horizontal) miden la continuidad del espacio poroso y sus afectaciones frente a la presencia de capas endurecidas, cambios texturales, presencia de materia orgánica, actividad microbiológica y labranza, por lo que 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 realizó el primer estudio sistemático del movimiento del agua a través de un medio poroso. En 1856, Darcy publicó su trabajo describiendo estudios experimentales de flujo del agua a través de filtros de arena no consolidada, los cuales eran utilizados en el procesamiento diario de agua potable en *Dijon* (Francia), midiendo la permeabilidad en función de la velocidad del flujo de agua a través del suelo durante un período determinado. El coeficiente resultante es una característica de los suelos, específicamente ligada a la *ley de Darcy*, cuyo coeficiente generalmente es representado por la letra k y es extremadamente variable, según el suelo.

El estudio sobre el movimiento de fluidos en medios porosos saturados es un tema relevante en varios campos, como la geofísica, la física de las rocas y la ciencia de materiales. La *ley de Darcy* es una parte esencial de la mecánica de los suelos, donde los investigadores la han evaluado y probado, demostrando su validez en la mayoría de los tipos de flujo de fluidos en los suelos. Hay evidencia que la confirma en el caso del agua circulando en suelos, desde limos hasta arenas medianas, y es aplicable en arcillas para flujos en régimen permanente (Duran, Páez & García, 2018). Sin embargo, su aplicabilidad se ve disminuida en filtraciones de líquidos a altas velocidades y gases a velocidades muy bajas. Se reconocen dificultades de cuantificación por la variación de la permeabilidad a lo largo de más de 13 órdenes de magnitud, de acuerdo a su heterogeneidad y a la dirección del flujo.

Existen estimaciones de permeabilidad donde 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, permitiendo la elaboración de mapas a escala mundial; asimismo es posible aumentar la profundidad de la medición, con el objetivo de aportar datos a los estudios climáticos (Chaparro, Mariño & Fonseca, 2019), de acceso a aguas subterráneas, vulcanismo, terremotos, la formación de yacimientos minerales metálicos y recursos petroleros, así como el desarrollo de presiones de fluido anormales en las cuencas (Gleeson, Smith, Moosdorf, Hartmann, Dürr, Manning, van Beek & Jellinek, 2011).

Los estudios de permeabilidad permiten, desde la mecánica de los suelos, abordar problemas geotécnicos, para ello los procedimientos para realizar la medición pueden ser directos, a través de pruebas realizadas con instrumentos especializados, o indirectos, como el cálculo a partir de la curva granulométrica, el cálculo a partir de la prueba de consolidación o el cálculo de la prueba horizontal de capilaridad. Las ecuaciones resultantes definen las mediciones de permeabilidad real, la cual involucra parámetros propios del fluido y sus unidades, que usualmente se expresan en *Darcys*¹, pero a nivel práctico ésta es una unidad de mucha magnitud, por lo que generalmente se expresan las medidas como *milidarcys* (mD). Asimismo, existen mediciones de permeabilidad intrínseca, la cual involucra la porosidad y entrega menor valoración 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 área² (Khan, 1989).

Debido a la amplitud de acercamientos, la permeabilidad se asocia a la *porosidad*, es decir, a la relación entre el volumen del espacio vacío de una roca y el volumen total lleno de la misma (Mendoza, 1998); 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, Hawkins & Terry, 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), dificultando su predicción ya sea por medio de antiguas técnicas, como son los métodos empíricos, o modernas, como es el uso herramientas computacionales (Altamiranda, 2012).

Los suelos parcialmente saturados tienen un coeficiente de permeabilidad que cambia dependiendo de la cantidad de humedad. Esta relación se determina mediante la curva característica de succión. La *succión* es la capacidad de un suelo para retener o absorber agua en sus poros, y esto genera fuerzas internas en la masa del suelo y afecta significativamente su comportamiento tenso-deformacional. La curva característica de succión representa la relación entre el grado de saturación y la succión del suelo, y está directamente relacionada con el tamaño de partículas y su estructura. Por lo tanto, la relación entre el contenido de agua y la succión varía según el tipo de suelo (Flores, Castro, García & González, 2019).

Las series de suelo históricamente han entregado información de la permeabilidad para ofrecérsela a los proveedores de servicios, considerando la idoneidad del suelo de acuerdo a datos de atributos, recopilándose la información en terreno de acuerdo a indicaciones provenientes de lineamientos del *Servicio de Conservación de Recursos Naturales* del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Schoeneberger, Wysocki, Benhamand & Soil Survey Staff, 2012). Los enfoques de análisis descritos determinan la importancia de este indicador para la ingeniería en la construcción de obras civiles y el comportamiento de estas principalmente en las ciudades, así como el comportamiento de los suelos en la actividad agrícola.

El 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, induciendo rupturas o

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: $1 \text{ mD} = 9,869 \times 10^{-16} \text{ m}^2$.

fracturamientos (Mendoza, 1998), potenciando peligros que inciden en el asentamiento humano y afectando la producción agrícola para el desarrollo. 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, convirtiendo la permeabilidad en una de las variables de los métodos de análisis de peligrosidad por inundación, cabiéndole miramientos hidrológico-hidráulicos, que generan métodos hidrometeorológicos de peligrosidad, basados en vectores meteorológicos y su conversión a escorrentía superficial (Diez, Laín & Llorente, 2008).

Aunque sea el uso agrícola uno de los principales enfoques de los estudios de permeabilidad, cabe su consideración como factor de estabilidad de los suelos para otros usos, permitiendo vislumbrar la necesidad de planteamientos de análisis que determinen con mayor asertividad el comportamiento del agua, del suelo, de ambos conjuntamente y sus posibles efectos sobre el territorio y la población. Por ello, la siguiente es una propuesta de análisis para que sean considerados respecto del asentamiento humano y sus capacidades productivas (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2000). Para ello se adapta la metodología propuesta por la FAO para la medición de permeabilidad de los suelos, que en este caso considera el color, la forma y el tamaño de la granulometría, con el objeto de representar en toda la región la permeabilidad del suelo.

METODOLOGIA

Diseño Metodológico

Cuantitativamente, la permeabilidad se define como la propiedad del medio poroso, independiente del fluido usado para medir y, por consiguiente, de la viscosidad del mismo. La permeabilidad del suelo es una medida que indica la capacidad del suelo o de la roca para permitir que los fluidos pasen a través de él. A menudo está representado por el coeficiente de permeabilidad (k) a través de la ecuación de Darcy:

$$V = ki$$

donde V es la velocidad del fluido a través del medio aparente, i es el gradiente hidráulico, y k es el coeficiente de permeabilidad (conductividad hidráulica) a menudo expresada en m/s.

k depende de la permeabilidad relativa del medio de constituyente fluido (a menudo el agua) y la viscosidad dinámica del fluido de la siguiente manera:

$$k = (\text{Gamma}_w) * k / (\text{eta})$$

donde Gamma_w es la unidad de peso del agua, eta es la viscosidad dinámica del agua, y k es un coeficiente absoluto en función de las características del medio (m^2).

La permeabilidad definida cualitativamente expresa la facilidad del suelo para conducir o transmitir fluidos, y de este modo 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 (Mardones, 1990; Cáceres, Campos & Castillo 1990; Mardones, Echeverría & Jara, 2004), 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 cementantes de tipo arcilloso, los cuales tienden a ralentizar el proceso, por lo que al momento de estudiar los suelos del territorio se hace necesario reconocer la textura de los mismos de acuerdo a su estructura (Bigelow, 2002).

Las series de suelos existentes en la región (Instituto Nacional de Investigación de Recursos Naturales [IREN], 1964) fueron agrupados de acuerdo a *orden*. Los órdenes de series de suelos expresan características que, ingresadas al SIG, facilitan la descripción general del territorio, así como entregan información respecto de las clases texturales en el área de estudio (Cuadro 1). Luego,

fueron reclasificados de acuerdo al tamaño del grano, clasificación creada de acuerdo a indicaciones provistas por la familia y según mediciones directas, y posteriormente comparadas con las medidas establecidas por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos para el establecimiento de las clases texturales (Cuadro 1).

Cuadro 1: 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
Suelos francos (textura mediana)	20-50	74-88	0-27	Franco limoso
	0-20	88-100	0-12	Limoso
	20-45	15-52	27-40	Franco arcilloso
Suelos francos (textura moderadamente fina)	45-80	0-28	20-35	Franco arenoso arcilloso
	0-20	40-73	27-40	Franco limoso arcilloso
	45-65	0-20	35-55	Arcilloso arenoso
Suelos arcillosos (textura fina)	0-20	40-60	40-60	Arcilloso limoso
	0-45	0-40	40-100	Arcilloso

Fuente: Departamento de Agricultura de Estados Unidos (FAO, 2009).

Para realizar la medición en terreno 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. Es el coeficiente de permeabilidad (k) el que tiene las mismas magnitudes que una velocidad. Los edafólogos suelen medirla en cm/hr o mm/hr; los hidrólogos prefieren el empleo de las unidades cm/día o m/día. Lunne, Robertson & Powell (1997) sugieren que la permeabilidad del suelo (k) puede ser estimada usando las Tablas de Comportamiento del tipo de suelo (SBT en inglés), por lo cual, bajo esta proposición, Robertson (2010) sugiere una gama de valores k (Cuadro 2).

Cuadro 2: Estimación de la permeabilidad del suelo (k).

Zona SBTn	SBTn	Rango de k (M/s)	SBTn lc
1	Grano fino sensible	3×10^{-10} a 3×10^{-8}	NA
2	Los suelos orgánicos – arcilla	1×10^{-10} a 1×10^{-8}	$lc > 3,60$
3	Arcilla	1×10^{-10} a 1×10^{-9}	$2,95 < lc < 3,60$
4	Mezcla de limo	3×10^{-9} a 1×10^{-7}	$2,60 < lc < 2,95$
5	Mezcla de arena	1×10^{-7} a 1×10^{-5}	$2,05 < lc < 2,60$
6	Arena	1×10^{-5} a 1×10^{-3}	$1,31 < lc < 2,05$
7	Arena densa de arena grava	1×10^{-3} a 1	$lc < 1,31$
8	*Muy denso / rigidez del suelo	1×10^{-8} a 1×10^{-3}	NA
9	*Muy dura suelo de grano fino	1×10^{-9} a 1×10^{-7}	NA

Fuente: Robertson (2010).

Aunque estas expresiones permiten relacionar 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 estos valores son posibles de agrupar en expresiones cualitativas, ya que es necesario considerar heladas, ciclos alternados de humedecimiento y secado, efectos de la vegetación y de pequeños organismos que pueden cambiar las condiciones del suelo, provocando discontinuidades, fisuras y agujeros. Por otro lado, es necesario considerar 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 & Cauhapé, 2006). Por ello, también los resultados de las clases texturales sometidas a medición de velocidad para establecer su permeabilidad son agrupados en la tabla simplificada de Cisneros (2003, p. 35) (Cuadro 3) que ya incorpora la valoración cualitativa con su correspondencia cuantitativa.

Cuadro 3: Clasificación de permeabilidad (cm/hr)

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

Fuente: Cisneros (2003).

El cruce de información que es realizado generalmente en los estudios petrofísicos 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).

El resultado de someter las clases texturales a este procedimiento permite obtener una relación entre la textura y la permeabilidad, expresándose en la acreditación de al menos cuatro grandes grupos (Cuadro 4) que expresan la textura del suelo (arcillosos, francos y arena), lo que se condice con la información ya recopilada, es decir, entre 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, y 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.

Cuadro 4: 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

Fuente: Absalon V. (2000).

Esto es coincidente 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 así facilitar la zonificación de la permeabilidad en el territorio, evidenciando 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) (Cuadro 5).

Cuadro 5: 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	Textura y Perfil	Comportamiento físico	Color y manchas de color
Permeabilidad moderadamente lenta	Horizonte de textura moderadamente fina ligeramente plástica en mojado 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 endurecidas. 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. Las manchas de color moderadamente intensas 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. Muchas manchas de color.

Fuente: FAO, (2009).

Finalmente se crean clases de permeabilidad de los suelos que son valorados de acuerdo a la velocidad de permeabilidad del suelo, estos nuevos grupos, que dependen de las características desarrolladas por cada espacio en estudio, se expresan como: a) Muy Rápida; b) Rápida, c) Moderadamente Rápida; d) Moderadamente Lenta; e) Muy Lenta; (Cuadro 6). Al mismo tiempo la valoración de estas características permite instalar precedentes de análisis, por ello se crean seis categorías que zonifican el territorio considerando el amplio rango de texturas del suelo y su relación con los grados de permeabilidad del suelo. La última de ellas considera aquellos territorios donde no corresponde realizar la medición (cajas de ríos, ciudades y localidades) o simplemente no existe información, los cuales son agrupados al final.

Cuadro 6: Valoración de la clasificación.

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	N/C	

Fuente: Elaboración propia

Donde:

- La *Permeabilidad muy rápida* (1) considera arenales, suelos moderadamente profundos a profundos, de textura moderadamente gruesa a muy gruesa, sin erosión, sobre terrenos planos a ligeramente ondulados, con un porcentaje de pendiente que no supera el 8%. con algunas limitaciones para el establecimiento de cultivos.
- La *Permeabilidad Rápida* (2) considera suelos misceláneos, de profundidad relativa, textura medianamente gruesa a gruesa, generalmente sin erosión sobre terrenos donde predomina la condición de ligeramente inclinados sobre el plano horizontal.
- La *Permeabilidad Moderadamente Rápida* (3) que considera suelos de profundidad relativa, donde, sin embargo, los suelos que son profundos y moderadamente profundos predominan, de textura más fina y ligera, con presencia de erosión y cuya geomorfología obedece a sectores de montañas o lomajes con una pendiente más acentuada alcanzando en algunos casos el 50%.

- La *Permeabilidad Moderadamente Lenta* (4) considera suelos con una textura que varía hacia lo fino en suelos cuya característica fundamental son algunos grados de profundidad, sin erosión y con pendientes ligeras.
- La *Permeabilidad Muy Lenta* (5) considera suelos con textura muy fina, de profundidad variable, con presencia de erosión, asociados principalmente a pendientes que varían en suavidad pero que tienden a ser abruptas.

Área de estudio

De acuerdo a la división política-administrativa de Chile, el área de estudio se ubica en la región de Ñuble, que se caracteriza en el marco del desarrollo histórico del país como la antigua zona de frontera, que confrontó la presencia del conquistador español y la resistencia opuesta por el pueblo mapuche, "(...) *situación que incide tanto en la estructura del espacio como en su función*" (Instituto Geográfico Militar [IGM], 2001, p. 11). Creada en febrero de 2017, la Región de Ñuble presenta una superficie de 13.178,5 km², distribuidas en tres Provincias, *Punilla, Itata y Diguillín*, con una totalidad de 21 comunas. Geográficamente, el área de estudio se ubica entre las *provincias de Linares y Cauquenes* de la *Región del Maule* por el norte, con la *Provincia de Concepción* al suroeste, con la *Provincia de Biobío* al sur, al este con Argentina y al oeste con el Océano Pacífico, dentro del cuadrante con los siguientes pares de coordenadas: 36°00'-72°53'; 36°00'-71°00'; 37°12'-71°00'; 37°12'-72°53'.

En el área se incluyen las principales unidades de relieve del país, reconociéndose el cordón andino, la depresión central, la cordillera de la costa y las planicies litorales. La *Cordillera de los Andes* se encuentra enfatizada por sus altas cumbres y el tallado de procesos fluvio-glaciales, destacando el activo sistema *Nevados de Chillán*. En cuanto a la *depresión central*, en el área de Chillán, alcanza una amplitud E O de alrededor de 40 km. correspondiendo a una fosa tectónica localizada entre la Cordillera de los Andes y la Cordillera de la Costa, rellena en forma paulatina y heterogénea, predominando en ella los abanicos aluviales (Börgel, 1983). Un tercer elemento es la *Cordillera de la Costa* que se extiende a lo largo de Chile, bordeando el Pacífico, desde el sur de *Arica* por el norte, hasta la península de *Taitao* por el sur, constituida en la región por rocas graníticas y metamórficas de edad paleozoica, con fuerte alteración física, presentando altitudes relativamente bajas y disectadas en dos cordones que rodean la cuenca de Quirihue que, pese a su altitud relativamente baja (400 msnm), provoca diferenciación topoclimática entre sus vertientes: con mayor cantidad de precipitaciones en la occidental, y su vertiente oriental con mayor aridez (Brüggen, 1950; Muñoz-Cristi, 1950; Lomnitz, 1959). Finalmente, la última estructura se refiere a las *planicies litorales*, que se encuentran desarrolladas en forma de franja por toda la costa de la región, destacándose por su homogeneidad y alternancia, presentando altitudes que fluctúan entre 60 y 250 msnm (Figura 1).



Figura 1: Perfil transversal.

El clima de la Región de Ñuble corresponde a una transición entre el dominio mediterráneo y el templado húmedo, es decir, con una estación seca prolongada y otra invernal concentrada en unos pocos meses del año. En este territorio solo el efecto de las alturas tanto de la Cordillera de los Andes como de la Cordillera de la Costa modifican el patrón climático. De acuerdo a la zonificación geomorfológica de Börgel (1983, en Errázuriz, Cereceda, González J., González M., Henríquez, & Rioseco, 1998), la Región de Ñuble se inserta en la *Región central de las cuencas y del llano fluvio-glacio-volcánico*, que se extiende entre el río Aconcagua por el norte y el río Biobío por el sur.

Las características climáticas condicionan la biodiversidad en el área, otorgándole gran importancia ecológica y ambiental (IGM, 2001). Desde el punto de vista biogeográfico, la Región de Ñuble se ubica en la zona mesomórfica con remanentes sureños hidromórficos en la precordillera y

remanentes de ella en la Cordillera de la Costa (Ortiz, 2009). Según Gajardo (1994), el área se inserta en la *Región del Bosque Caducifolio*, dentro de la subregión del *Bosque Caducifolio del Llano*, puntualmente, en la formación del *Bosque Caducifolio de la Frontera*. Se reconoce que esta zona ha sido arrasada debido al uso del suelo destinado a la agricultura, praderas y plantaciones forestales, provocando fragmentación e intrusión de especies exóticas.

Finalmente, el curso del río Itata estructura un valle de sentido este-oeste (Dirección General de Aguas [DGA], 2004), con una longitud aproximada de 230 km y con un caudal medio anual en su desembocadura de 140 m³/s (IGM, 1985). El rumbo E O se encuentra condicionado por el intenso proceso de fallas que sufrió el territorio, sumado al volcanismo, el cual ha determinado el escurrimiento y la formación de abanicos aluviales en una extensa red hídrica conformada por tributarios principales que generan a su vez las principales subcuencas, como son los ríos Ñuble, Cato, Chillán y Diguillín (IGM, 1985, 2001) (Figura 2).

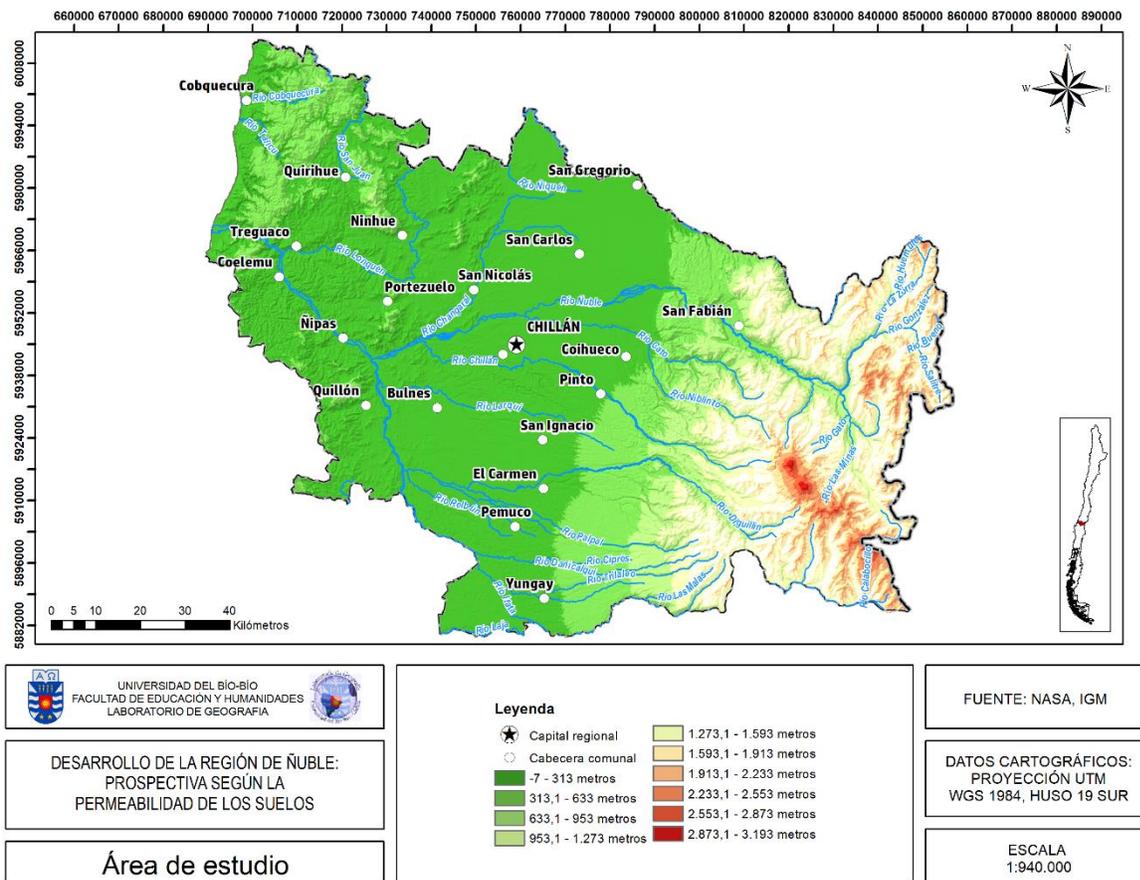


Figura 2: Área de estudio Región de Ñuble.

RESULTADOS

Orden de los suelos

Una variada gama de suelos se advierte en toda la superficie territorial del área (Figura. 3), algunos presentes a nivel nacional pierden presencia, otros la continúan, y se presentan otros que corresponden a la clasificación de suelos húmedos que, divididos en cinco grupos, consideran la acción del clima y el tipo de vegetación dominante, lo que les confiere características propias a los diferentes suelos. Sin embargo, por la amplitud del territorio se recurre al orden a los que pertenecen las series para efectos de análisis.

En la Figura 3 se observan aquellos suelos de origen volcánico que permiten una variedad de cultivos, Andisol (Ibáñez, Gisbert & Moreno, 2011d; FAO, 2000), cubriendo un 17,28% del territorio, emplazados en la ladera inferior de la Cordillera de los Andes, con pendientes de magnitud apreciable. Son suelos que contienen altas proporciones de vidrio y materiales coloidales. En esta zona, con un nivel de precipitaciones anual que sobrepasa los 800 mm, las cenizas volcánicas han originado cuatro grupos principales de suelo: los *Trumaos*, cuyo nombre proviene del mapuche y quiere decir *Lluvia de Cenizas*, los *Ñadis*, los suelos *Rojos Arcillosos* y los suelos *Pardo Arcillosos*. Los *Trumaos* y *Ñadis* provienen de cenizas de edad holocénica, mientras que los suelos *Rojos Arcillosos* poseen un material parental presumiblemente originado dentro del Pleistoceno. Adicionalmente, se deben incluir suelos derivados de arenas volcánicas y suelos originados por arenas y pómez de depositación directa (Tosso, 1985). Por su parte, el origen del suelo *Pardo Arcilloso* se encontraría entre la de los *Trumaos* o *Ñadis* y la de los *Rojos Arcillosos* (Besoain, 1985), poseen propiedades singulares heredadas de las partículas que lo conforman, por el proceso de enfriamiento y depositación de la ceniza volcánica. Dentro de estas características se encuentran su baja densidad seca, su alta capacidad de retener agua y su compresibilidad, entre otras (González, 2012).

Los suelos con poco desarrollo de los horizontes (Inceptisol) representan un 15,8%; y se encuentran heterogéneamente repartidos en la Depresión Intermedia y claramente establecidos en el borde costero. El desarrollo incipiente de estos suelos comprende el tiempo, asimismo el clima es otro de los factores de influencia, destacando el hecho que estos suelos se desarrollan en cualquier tipo de clima excepto en zonas con condiciones áridicas, aunque su régimen de humedad puede ser variable, donde en la región se presentan con pobre drenaje. Los inceptisoles se desarrollan en zonas convexas donde las formas del relieve se estructuran de plana a levemente ondulada, se despliegan en coluvios profundos donde los sedimentos fueron y son depositados. Por último, el material parental no es un factor limitante, puesto que estos suelos están extendidos en zonas de depósitos glaciares o en depósitos recientes de valles o deltas de ríos, lo que explica su presencia en el borde costero (Ibáñez, Gisbert y Moreno, 2011a).

Aquellos suelos profundos, bien estructurados; que poseen un horizonte subsuperficial, Alfisoles (Ibáñez, Gisbert, y Moreno, 2011c), con abundante arcilla iluvial, corresponden a un 26,48% de la superficie de la región, principalmente ubicados en el territorio circundante al noroeste y suroeste del río Itata. Ampliamente utilizados tanto en la agricultura y la silvicultura, estos suelos se explican por la fosilización hacia el O y S., por los depósitos torrenciales y fluviovolcánicos de la formación *La Montaña* (pleistoceno inferior) y por las arenas del río *Itata* (Comisión Nacional de Riego [CNR], 1994). 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 intermedia y principalmente la Cordillera de la Costa, y muchos de los materiales sedimentarios que se encuentran consisten en alteraciones de limonitas, areniscas finas y conglomerados, con intercalaciones de arcillolitas y tobas (Gajardo, 1981).

Respecto de aquellos suelos con importante acumulación de humus en la superficie del horizonte, Mollisol, se encuentran representados en un 4,14% de la superficie del territorio, donde su ubicación es en forma heterogénea a lo largo de la Depresión Intermedia compartiendo espacios con los andisoles e inceptisoles de E a O. La característica fundamental de estos suelos es el encontrarse entre los más productivos del mundo, producto de su adición de materia orgánica procedente de todos los residuos y su posterior descomposición subsuperficial. La evolución de la materia orgánica en estas condiciones conduce al proceso de oscurecimiento de los horizontes superficiales del suelo (melanización) (Ibáñez, Gisbert y Moreno, 2011b).

Aquellos suelos recientes que se dan en planicies de inundación formadas por el curso del río Itata, o en depósitos recientemente estratificados, pero con escasa formación de horizontes, y laderas donde la escorrentía no permite la evolución de los suelos en profundidad, corresponde al orden de suelos llamado Entisol. Principalmente asociados a zonas forestales, estos suelos tienen a nivel mundial una alta representación (19%) y sin embargo en la región solo se encuentran presentes en el 1,67%.

Los suelos agrietados producidos por la acción de las arcillas expansibles (Vertisoles) representan un 2,18% del territorio regional, agrupado en el sector norte de la depresión intermedia. Son suelos muy compactos en la estación seca (muy duros) y muy plásticos en la húmeda, por lo que su manejo es complejo debido a los movimientos del suelo. Es por ello que se desenvuelve bien una vegetación herbácea con pocas raíces; en cambio, una vegetación estacional, árboles, vallados y cercas se inclinan sobre el terreno, los cimientos de las construcciones y los pavimentos se desplazan y se agrietan con facilidad, las tuberías se rompen, por lo que construir en zonas con suelos vérticos suele causar problemas en el tiempo, haciendo importante la gestión (Ibáñez, Gisbert y Moreno, 2011e; United States Department of Agriculture [USDA], 2021).

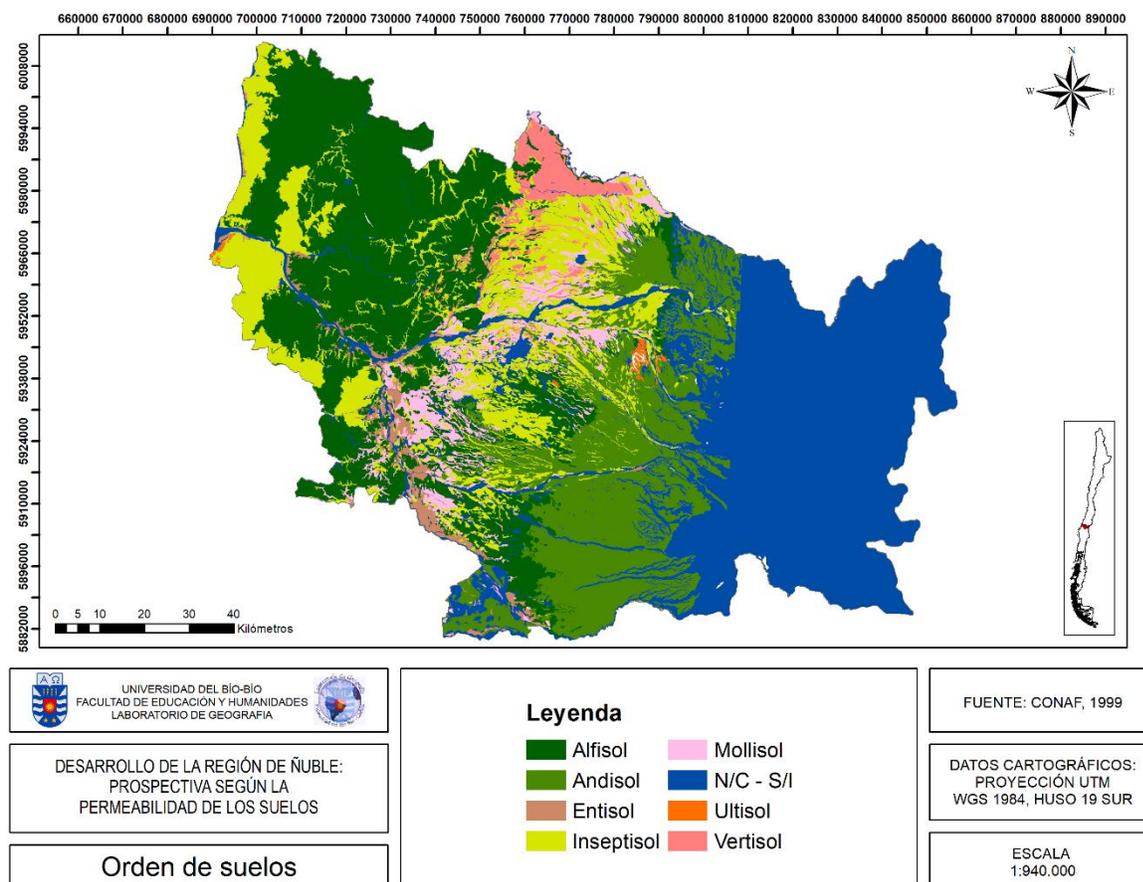


Figura 3: Orden de los suelos de la Región de Ñuble.

Permeabilidad de los suelos

El estudio revela que, del suelo de la Región de Ñuble (Figura 4), solo un 2,29% presenta una permeabilidad muy rápida, asociado principalmente a un abanico aluvial creado por los afluentes del *Río Itata* por el norte y por el *Río Laja* al sur en la comuna de *Yungay*, al sur de la región. Respecto del porcentaje del territorio con presencia de suelos de permeabilidad rápida (11,53%), su asociación por el norte se encuentra en los faldeos cordilleranos andinos³ en las comunas de *San Fabián* y de *Ñiquén*, además de los lechos de los ríos *Ñuble* y afluentes en la comuna de *Coihueco* y en sectores del territorio comprendido entre ellos. Hacia el sur, la presencia de esta característica en los suelos sigue asociada a los lechos de los ríos, en este caso de los ríos *Diguillín* e *Itata* en las comunas de

³ Cabe considerar la existencia de una zona en el territorio cordillerano donde no existe registro de datos de suelos: S/I

Pinto y El Carmen. Por otra parte, es en el borde costero en las comunas de Cobquecura, Treguaco y Coelemu donde se aprecian las franjas de suelo con esta permeabilidad.

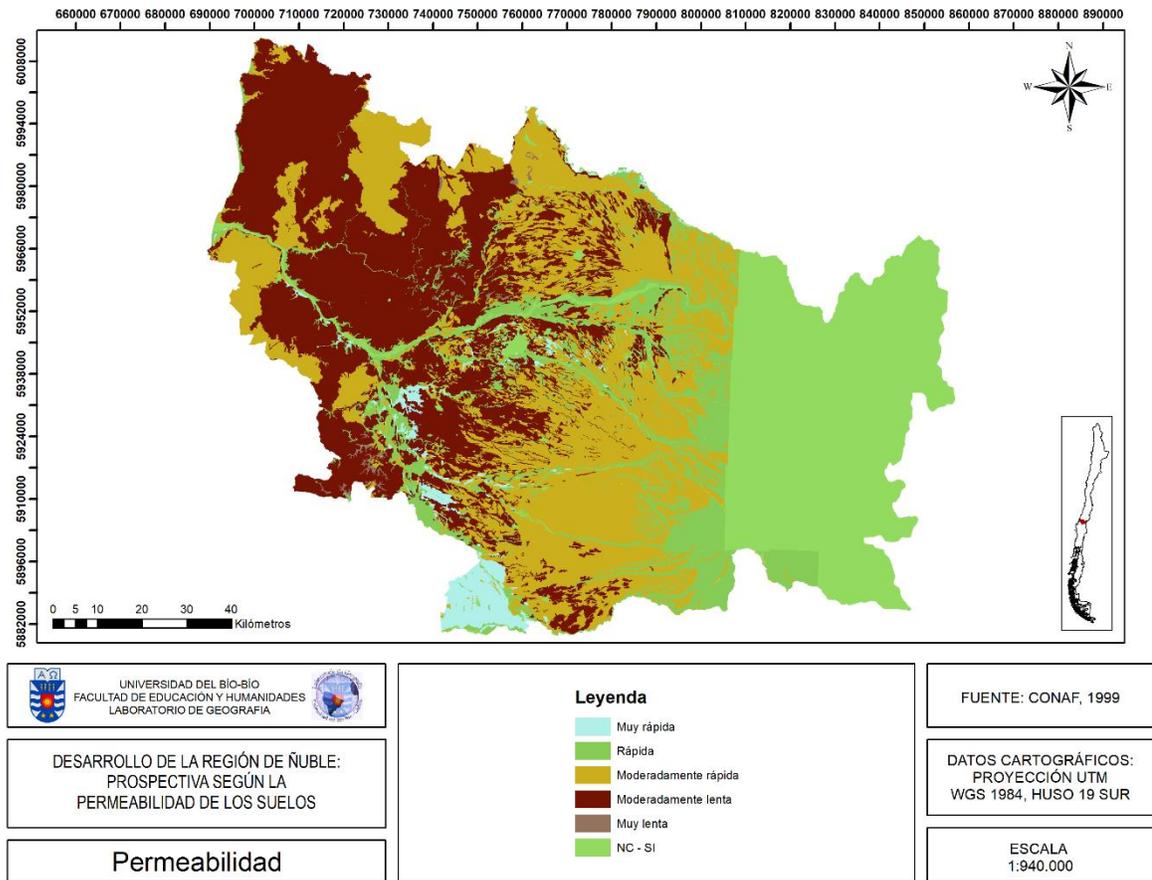


Figura 4: Permeabilidad del suelo de la Región de Ñuble.

Aquellos suelos con permeabilidad moderadamente rápida representan casi un tercio de la región (31.52%). Su localización de norte a sur los ubica en el noroeste de la comuna de Ñiquén, en la comuna de San Carlos; en el noroeste de las comunas de Pinto, San Ignacio, El Carmen y Pemuco y al este de la comuna de Yungay. Los suelos con esta valoración se encuentran ubicados principalmente en la *depresión intermedia (Valle Longitudinal)* originada por el hundimiento producido al formarse el plegamiento andino. Esta franja no sólo ha sido el depósito del relleno sedimentario, sino que ha almacenado recursos hídricos expresados en napas subterráneas y escurrimientos superficiales. Dada la topografía del territorio chileno, la Depresión Intermedia es el área más apta para la ocupación humana, ya que posee, además, en algunos de sus sectores, factores favorables de clima, que sumados a los recursos hídricos antes mencionados más la fertilidad de los suelos, favorece el desarrollo de la actividad agropecuaria.

Respectos de los suelos cuya permeabilidad es moderadamente lenta (30.51%) su localización obedece a las comunas de Cobquecura, Quirihue, Portezuelo, Trehuaco, zonas del este de Coelemu y de Ñipas, además de zonas al sur de Quillón. La característica de permeabilidad de estos suelos se encuentra asociada principalmente a la estructura de la *Cordillera de la Costa*. Esta cordillera se manifiesta como una barrera orográfica que impide el acceso al litoral, descendiendo hacia el mar y, en algunos lugares, pierde continuidad, sin embargo, en la región vuelve a tomar altura, dividiéndose en cordones paralelos que dejan entre ellos cuencas, de relativa importancia para la agricultura, considerando que se encuentra ampliamente cubierta por plantaciones de *pino insigne* y *eucaliptus globulus*. Al sur del río Itata, la cordillera se transforma en una meseta erosionada de una

altura no superior a los quinientos metros. En general sus suelos están muy erosionados, por lo tanto, relativamente pobres para el desarrollo agrícola.

Finalmente, los suelos con permeabilidad muy lenta (0,30%) se encuentran desigualmente distribuidos en la ladera este de la *Cordillera de la Costa* con una mínima presencia en las comunas de *San Carlos*, *San Nicolás* y *Quillón*. Aquellos suelos con este rango de permeabilidad, que puede llegar a ser tan reducido, experimentan problemas para la adecuada aireación del sistema radicular. Su situación obedece a causas diversas tales como la presencia de capas endurecidas, cambios texturales, presencia de materia orgánica, actividad microbiológica, labranza continua y el uso de maquinaria de manera excesiva. La mayoría de la vida vegetal no puede resistir en estos suelos que son correosos o pantanosos, ya que los suelos arcillosos crean esas condiciones y pueden causar putrefacción y pobre absorción de nutrientes, entre otras. Por último, respecto del porcentaje del territorio con datos que no corresponden al estudio, estos están expresados solo en un 23,77%, referido a sistemas lacustres, cajas de ríos áreas urbanas de las ciudades y amplios territorios del sector andino. Un resumen porcentual se encuentra disponible en la Figura 5.

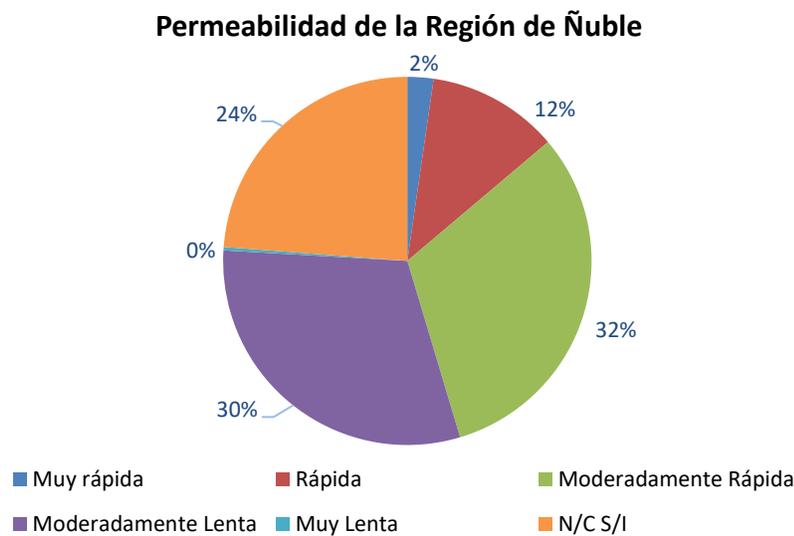


Figura 5: Distribución porcentual de la Permeabilidad del suelo.

CONCLUSIONES

Los estudios de suelo permiten conocer propiedades físicas y mecánicas del suelo, y su composición estratigráfica, lo que incide en las posibilidades de producción, instalación de artefactos urbanos y abastecimiento de agua, por lo que los estudios de permeabilidad se revisten de relevancia cuando se les analiza desde las perspectivas de asentamiento humano, el desarrollo de sistemas agro-productivos, la prospección de hidrocarburos, agua, y en los análisis de riesgos. Sin embargo, existe la necesidad de contar con herramientas y estudios hidrogeológicos e hidrometeorológicos que permitan ampliar en calado el análisis de los suelos respecto del cambio climático, eliminando factores de distorsión localizados.

Los resultados permiten la observación de suelos permeables, equilibrados y estables, a la vez de aquellos con un mal drenaje, que 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 en granos planos y pequeños, se observa que la permeabilidad horizontal disminuye aun cuando sus direcciones sean aproximadamente las mismas.

Respecto del área de estudio y las actividades a realizar, se recomienda la labranza de conservación, utilizando técnicas de aprovechamiento de agua, incorporación de los residuos vegetales, estiércoles y otras técnicas que incrementan la permeabilidad, optimizando la retención de agua, pero disminuyendo la vulnerabilidad. Con estas acciones se favorece la filtración de químicos en las aguas subterráneas, mejorando la calidad de esta para uso y consumo humano.

Finalmente, se observa que la presencia de los asentamientos humanos se encuentra en áreas donde la permeabilidad es moderada, lo que incide en su seguridad, acceso a fuentes de alimento y disponibilidad de agua. Pero la realización de análisis más detallados muestra disparidades en el sitio y ubicación de las zonas urbanas, producto de la incidencia de esta variable del suelo en la disponibilidad y sustentabilidad de los recursos.

Referencias

- Altamiranda D. (2012). *Determinación de Permeabilidad utilizando teoría fractal en campos de Venezuela y de Estados Unidos*. [Tesis de grado]. Universidad Simón Bolívar. <https://1library.co/document/zkwwgm2e-universidad-bol%C3%ADvar-decanato-estudios-profesionales-coordinaci%C3%B3n-ingenier%C3%ADa-geof%C3%ADsica.html>
- Angelone, S., Garibay, M. & Cauhapé, M. (2006). *Permeabilidad de Suelos. Geología y Geotecnia*. Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. <http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Permeabilidad%20en%20Suelos.pdf>
- Besoain, E. (1985). *Mineralogía de arcillas de suelos*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. <https://repositorio.iica.int/handle/11324/12993>
- Bigelow, L. (2002). *Introduction to Wireline Log Analysis*. Baker Hughes.
- Börgel Olivares, R. (1983). *Geomorfología*. Instituto Geográfico Militar.
- Brüggén, J. (1950). *Fundamentos de la Geología de Chile*. Instituto Geográfico Militar.
- Cáceres, A., Campos, N. & Castillo, J. (1990). *Los riesgos naturales en el sitio de la ciudad de Chillán* [Tesis de grado]. Universidad del Bío-Bío.
- Chaparro L., H., Marino M., J. E. & Fonseca P., H. (2019). Valores de permeabilidad en sabanas susceptibles a sequía en Paz de Ariporo, Casanare (Colombia). *Revista Orinoquia Ciencia y Sociedad*, 3, 9-13. <http://revistaorinoquia.unitropico.edu.co/wp-content/uploads/2019/05/Chaparro.pdf>
- Cisneros, R. (2003). *Apuntes de la Materia de Riego y Drenaje*. Centro de Investigaciones y Estudios de Posgrado y Área Agrogeodésica. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis de Potosí. <https://web.archive.org/web/20151212191105/http://ingenieria.uaslp.mx/web2010/Estudiantes/apuntes/Apuntes%20de%20Riego%20y%20Drenaje%20v.2.pdf>
- Comisión Nacional de Riego (1994). *Estudio Integral de Riego Proyecto Itata. Volumen II*. Comisión Nacional de Riego, Departamento de Estudios. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/10083>
- Concepción, M. (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, B., Hawkins, M. & Terry, R. (1991). *Applied Petroleum Reservoir Engineering*. Prentice Hall.
- Díez, A., Laín, L. & Llorente, M. (2008). *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración*. Instituto Geológico y Minero de España. <https://www.igme.es/Publicaciones/publiFree/MapasPeligrisidad/Mapas%20de%20peligrisidad%20por%20avenidas%20e%20inundaciones.pdf>

- Dirección General de Aguas (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Itata*. Ministerio de Obras Públicas. <https://mma.gob.cl/diagnostico-y-clasificacion-de-cursos-y-cuerpos-de-agua-segun-objetivos-de-calidad/>
- Duran, M., Páez, J. & García, P. (2018). Modelado numérico y análisis experimental para flujos en un medio poroso homogéneo a través de suelos. *ITECKNE*, 15(1), 24-33. <https://doi.org/10.15332/iteckne.v15i1.1961>
- Errázuriz, A. M., Cereceda, P., González, J. I., González, M., Henríquez, M. & Rioseco, R. (1998). *Manual de Geografía de Chile*, 3a Edición actualizada. Andrés Bello.
- Flores, I., Castro, I., García, J. & González, Y. (2019). Influencia de la permeabilidad del suelo no saturado en los taludes de presas de tierra. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 40(3), 86–100. <https://riha.cujae.edu.cu/index.php/riha/article/view/494>
- Gajardo, A. (1981). *Avance Geológico Hoja Concepción-Chillán Región del Bío-Bío*. Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Gajardo, R. (1994). *La vegetación Natural de Chile. Clasificación y distribución geográfica*. Universitaria.
- Gleeson, T., Smith, L., Moosdorf, N., Hartmann, J., Dürr, H., Manning, A., van Beek, L. & Jellinek, A. (2011). Mapping permeability over the surface of the Earth. *Geophysical Research Letters*, 38, L02401. <https://doi.org/10.1029/2010GL045565>
- González P., C. (2012). *Propiedades geomecánicas de dos suelos de origen volcánico*. [Tesis de magister]. Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/102764>
- Ibáñez, S., Gisbert, J. M. & Moreno, R. (2011a). *Inceptisoles*. Universitat Politècnica de València. <https://riunet.upv.es/handle/10251/12884>
- Ibáñez, S., Gisbert, J. M. & Moreno, R. (2011b). *Mollisoles*. Universitat Politècnica de València. <https://riunet.upv.es/handle/10251/13609>
- Ibáñez, S., Gisbert, J. M. & Moreno, R. (2011c). *Alfisolos*. Universitat Politècnica de València. <https://riunet.upv.es/handle/10251/13675>
- Ibáñez, S., Gisbert, J. M. & Moreno, R. (2011d). *Andisoles*. Universitat Politècnica de València. <https://riunet.upv.es/handle/10251/13676>
- Ibáñez, S., Gisbert, J. M. & Moreno, R. (2011e). *Vertisoles*. Universitat Politècnica de València. <https://riunet.upv.es/handle/10251/12869>
- Instituto Geográfico Militar (1985). *Geografía de Chile: Geografía de los Climas*. Tomo XI, coordinado por Hugo Romero Aravena.
- Instituto Geográfico Militar (2001). *Geografía de Chile: VIII Región del Bío Bío*. Tomo VIII, coordinado por María Mardones.
- Instituto Nacional de Investigación de Recursos Naturales (1964). *Suelos. Descripciones. Proyecto Aerofotogramétrico Chile/OEA/BID*. IREN-CORFO. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/18011>
- Khan, M. (1989). *Introduction to Wireline Log Interpretation*. Oil & Gas Development Corporation.
- Lomnitz, C. (1959) *Investigaciones gravimétricas en la región de Chillán*. Instituto de Investigaciones Geológicas. <https://www.memoriachilena.cl/602/w3-article-65230.html>

- Lunne, T., Robertson, P. K., & Powell, J. J. M. (1997) *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. Taylor & Francis.
- Mardones, M. (1990). "Los riesgos naturales en el sitio de la ciudad de Chillán: Riesgo sísmico, de inundación y de anegamiento". En: D. Olave. *Ciudades Intermedias: Chillán* (pp. 8-38). Universidad de La Serena, Facultad de Humanidades e Instituto Panamericano de Geografía e Historia.
- Mardones F., M., Echeverría C., F., & Jara B., C. (2004). 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, 1-24. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2004.27748>
- Mendoza, J. (1998). *Introducción a la Física de Rocas*. Equinoccio.
- Muñoz-Cristi, J. (1950). *Informe geológico sobre la parte oriental de la Cordillera de la Costa. Provincia de Talca*. Universidad de Chile, Instituto de Geología.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2000). *El riego en América Latina y el Caribe en cifras*. FAO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2009) *Permeabilidad del suelo*. FAO.
- Ortiz, J. C. (2009). "Fauna de vertebrados terrestres del río Itata". En: O. Parra, J. Castilla, H. Romero, R. Quiñones & A. Camaño (eds.), *La cuenca hidrográfica del río Itata: aportes científicos para su gestión sustentable* (pp. 229-239). Universidad de Concepción.
- Robertson P. K. (2010). *Estimating in-situ soil permeability from CPT & CPTu*. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, California, EE.UU. https://www.geotechnical-engineering.org/storage/publication/18394/publication_file/2633/51Robehc.pdf
- Schoeneberger, P. J., Wysocki, D. A. Benham, E. C. & Soil Survey Staff (2012). *Field book for describing and sampling soils*, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center. <https://www.nrcs.usda.gov/resources/guides-and-instructions/field-book-for-describing-and-sampling-soils>
- Tosso T., J. (ed.) (1985) *Suelos Volcánicos de Chile*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. <https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/35623>
- United States Department of Agriculture (2021). *Vertisol*. <https://www.nrcs.usda.gov/conservation-basics/natural-resource-concerns/soils/vertisols>