

Escaneo Rápido de **SALINIDAD**

en las Regiones Metropolitana y de Valparaíso
de Chile; desafíos y oportunidades

Bruning B¹, Cleveland K², Ramirez N², Huizer, T², Streef A³, de Vos, A¹.

Afiliaciones:

1 The Salt Doctors B. V., Países Bajos

2 Arcadis, Chile & Países Bajos

3 Delphy B. V., Países Bajos

Diciembre 2021

Índice

Resumen Ejecutivo	2
1. Antecedentes	4
<i>a. Objetivo</i>	4
<i>b. Actividades y entregables</i>	4
<i>c. Salinidad en Chile</i>	4
<i>d. El consorcio</i>	5
2. Métodos	6
<i>e. Detección de los efectos de salinidad en terreno</i>	7
3. Clasificación de los Suelos Afectados por Sales	9
4. Tolerancia a la Sal de los Cultivos	10
5. Resultados	14
<i>a. Situación actual</i>	14
Clima, Cambio Climático y Sequías	14
Derechos de Agua en Chile	15
Descripción Hidrográfica de la Región Metropolitana	17
Descripción Hidrográfica de la Región de Valparaíso	19
Suelo	20
Cultivos	21
<i>b. Región Metropolitana</i>	21
<i>c. Región de Valparaíso</i>	23
<i>d. Salinidad</i>	25
Salinidad del agua	25
Salinidad del suelo	26
<i>e. Información adicional</i>	28
6. Visitas a Terreno y Entrevistas	29
<i>a. Agricultores</i>	29
Conclusiones de los análisis del agua y del suelo	33
<i>b. Plantación de nogales</i>	34
<i>c. Plantación de Paltos</i>	35
7. Resultados de las entrevistas con las partes interesadas y los agricultores	38
<i>a. Preguntas generales</i>	38
<i>b. Agricultura</i>	39
<i>c. Gobernanza y administración del agua</i>	39
<i>d. Calidad del agua</i>	40
8. Evaluación de las Necesidades y Recomendaciones	41
<i>a. Salinidad</i>	41
<i>b. Agua</i>	45
9. Oportunidades de Prevención, Mitigación y Adaptación	48
<i>a. Cultivos</i>	48
<i>b. Suelo</i>	48
<i>c. Agua</i>	50
Referencias	52

RESUMEN EJECUTIVO

Antecedentes

Este informe, financiado por el Gobierno de los Países Bajos a través del programa Partners for Water, presenta los resultados de un rápido análisis de la situación de la salinidad y el agua en la agricultura en Chile, centrándose principalmente en dos regiones: la Región de Valparaíso y la Región Metropolitana. El proyecto fue realizado por The Salt Doctors (líder), Arcadis y Delphy (todos con sede en los Países Bajos) y la oficina local de Arcadis en Chile. El objetivo general del estudio es mejorar la resiliencia climática de la agricultura en zonas con escasez de agua y salinidad en Chile, proporcionando una visión de los problemas de salinidad y explorando las posibilidades de mejorar las prácticas agrícolas en un entorno salino. Para ello, se llevó a cabo una evaluación de la salinidad y de las necesidades, mediante entrevistas con varias partes interesadas (*stakeholder*), una revisión bibliográfica y visitas de terreno a dos plantaciones agrícolas. A partir de los resultados, se han observado diferentes oportunidades para mejorar la resiliencia de la agricultura.

Resultados

En Chile, la superficie de tierras afectadas por salinidad se estima en 76 millones de hectáreas, la mayoría de las cuales se encuentran en el norte, donde hay costras de sal fósiles naturales y numerosos lagos salinos. En la zona mediterránea del norte, donde se encuentran las dos zonas de interés, se calcula que alrededor del 16% de las tierras están afectadas por la sal (>2 dS/m). La mayoría de los agricultores de las zonas de interés dependen del agua del río para el riego. Debido al clima semiárido y a las recientes sequías, el agua del río contiene sales, con las mayores concentraciones registradas en los últimos cinco años durante los periodos de caudal extremadamente bajo del río. Las concentraciones reportadas en la conductividad eléctrica (CE) y las concentraciones de cloruro tanto del río como de las aguas de riego en las dos plantaciones exceden los niveles de tolerancia reportados para el palto y el nogal. En general, el origen de la presencia de sales se encuentra en el suelo (antiguo fondo marino) y la posterior meteorización del suelo que provoca elevados niveles de salinidad en el Río Maipo. El nivel medio de salinidad del Río Maipo es de 1,7 dS/m, con un nivel máximo que alcanza los 2,2 dS/m, con valores máximos ligados a la reducción del caudal y a las sequías. El calcio es el principal contribuyente a los elevados niveles de CE, seguido del sodio. Se ha informado de que los niveles de salinidad del Río Aconcagua son más bajos (0,6-0,8 dS/m), aunque se ha encontrado menos información. Especialmente el palto es un cultivo muy sensible a la sal y se recomienda utilizar agua de riego con un nivel de salinidad inferior a 0,6 dS/m. En este sentido, el nivel medio de salinidad del Río Maipo supera el nivel de tolerancia del palto y se han observado daños por sal, en forma de quemaduras en las hojas, en la plantación de paltos visitada. Los diferentes cultivares o portainjertos de palto difieren en la tolerancia a la sal, siendo los portainjertos Antillanos los que presentan el mayor nivel de tolerancia a la sal. El agricultor de paltos visitado se encuentra cambiando a este portainjerto más tolerante actualmente. Los daños causados por la sal en el palto son principalmente el resultado de la toxicidad de los iones de cloruro, por lo que es importante asegurarse de que las concentraciones de cloruro en la zona de la raíz no superen los niveles de tolerancia. Los niveles de salinidad reportados en el Río Maipo exceden los niveles de salinidad recomendados para los portainjertos de palto más tolerantes también por una diferencia relativamente pequeña. En este sentido, debería ser posible obtener altos rendimientos cuando también se tiene en cuenta un manejo adecuado del suelo y del riego (además del manejo general del cultivo). El tipo de suelo parece variar significativamente de un lugar a otro, desde suelos gruesos hasta suelos arcillosos. Se debe evitar la acumulación de sal en el suelo, ya que las concentraciones de sal del agua de riego ya son elevadas. Esto puede lograrse mediante la lixiviación periódica suministrando cantidades excesivas de agua de riego. En los suelos arenosos más gruesos, el drenaje natural será probablemente suficiente para lixiviar la zona de las raíces, pero en los suelos arcillosos será necesario un drenaje adicional. La mejora y el mantenimiento de una buena estructura del suelo, que puede verse influida negativamente por la salinidad, es vital



para una correcta infiltración y lixiviación del agua, además del aspecto del drenaje. La salinidad también afecta a la disponibilidad y absorción de nutrientes, por lo que una estrategia de fertilización equilibrada es también de gran importancia. Así, sólo con un enfoque integrado que incluya la gestión del cultivo, el suelo y el agua es posible obtener rendimientos rentables en condiciones de salinidad.

Necesidades y recomendaciones

Se han observado varias necesidades y recomendaciones relacionadas con:

- Recopilación de datos, cartografía y seguimiento a nivel de plantación y a nivel regional
- Capacitación a medida y desarrollo de capacidades sobre métodos para combatir la salinidad
- Gestión del agua y del riego a nivel de plantación
- Gestión y gobernanza del agua a nivel regional

Oportunidades

Se destacan varias oportunidades para prevenir, mitigar y adaptarse a la salinidad. Estas oportunidades están relacionadas con los cultivos, el suelo y el agua. A nivel de cultivos, se trata principalmente de adaptación. Hay oportunidades para seleccionar y utilizar portainjertos más tolerantes, pero cuando la salinidad aumenta aún más, la única solución puede ser cambiar a un cultivo completamente diferente. Sin embargo, en lo que respecta al suelo y al agua, existen varias oportunidades en materia de prevención y mitigación, las cuales también pueden garantizar que el cultivo del palto se mantenga durante un tiempo prolongado. Estas medidas se centran sobre todo en la calidad y la cantidad del agua, y pueden aplicarse a nivel de plantación y a nivel regional. El propio suelo también puede utilizarse de varias maneras para garantizar el buen desarrollo del cultivo. Esto está relacionado principalmente con la calidad general del suelo, a nivel químico, físico y biológico, lo que puede ayudar a la planta a soportar el estrés salino, sobre todo eliminando otros estreses en la medida de lo posible.



1. ANTECEDENTES

En septiembre del año 2021, la Embajada del Reino de los Países Bajos en Santiago encargó al consorcio la realización de un análisis rápido, en relación con los desafíos de salinidad que los agricultores están enfrentando en partes específicas de Chile. El encargo fue financiado por el Gobierno de los Países Bajos a través del programa Partners for Water. Dado que estos problemas de salinidad están fuertemente relacionados con la gestión del agua y las prácticas agrícolas generales, estos aspectos también se tuvieron en cuenta durante el análisis rápido. El consorcio estaba formado por las empresas holandesas The Salt Doctors (líder), Arcadis, Delphy, junto a la oficina local de Arcadis en Chile. Debido a las restricciones de viaje (COVID-19) las actividades locales fueron realizadas por Arcadis-Chile. Las diferentes actividades consistieron en visitas de terreno, entrevistas con diversas partes interesadas (*stakeholders*) y revisiones bibliográficas, con el fin de alcanzar el objetivo general.

a. Objetivo

El objetivo general del proyecto es mejorar la resiliencia climática de la agricultura en zonas con escasez de agua y salinidad en Chile, proporcionando una visión de los problemas de salinidad y explorando las posibilidades de mejorar las prácticas agrícolas en un entorno salino.

b. Actividades y entregables

Las actividades de esta exploración rápida consistieron en:

- Una evaluación de la salinidad
- Una evaluación de las necesidades de los agricultores y organizaciones chilenas
- Un mapeo de oportunidades de prevención, mitigación y adaptación, en relación con la gestión de los cultivos, el suelo y el agua

La mayoría de estas actividades se han realizado en forma de revisiones bibliográficas y entrevistas. En las Regiones Metropolitana y de Valparaíso, el consorcio visitó dos plantaciones para conocer las condiciones locales. Además, existe la ambición de vincular los resultados del proyecto a Objetivos de Desarrollo Sostenible específicos, principalmente en forma de:

- ¿Qué prácticas agrícolas resilientes pueden aplicarse para aumentar la productividad y la producción (ODS 2)?
- ¿Cómo se puede aumentar la eficiencia en el uso del agua y garantizar la extracción sostenible de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua (ODS 6)?
- ¿Cómo podemos fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los peligros relacionados con el clima y los desastres naturales (ODS 13)?
- ¿Cómo podemos reforzar la cooperación en materia de degradación del suelo y sequía (ODS 15)?

c. Salinidad en Chile

Debido a la combinación del aumento de las temperaturas y los cambios en los patrones de precipitación, Chile es una de las naciones de América Latina que se enfrenta a una disminución del suministro de agua, especialmente en la zona norte, y se espera que sea la nación de América Latina que experimente el peor nivel de estrés hídrico para el año 2040. Los suelos salinos son uno de los problemas relacionados con el cambio climático y el aumento de las sequías. En los contactos de la Embajada de los Países Bajos en Santiago y en las iniciativas del programa Partners for Water se ha abordado varias veces el tema de la salinidad y la agricultura. Aunque no está claro hasta qué punto la salinidad está afectando a la agricultura, los agricultores y otras organizaciones indican que la salinidad



supone una amenaza para la productividad de los cultivos en algunas zonas del país. Por ejemplo, en la Región Metropolitana, el problema de la salinidad se presenta en María Pinto, Mallarauco, Bollenar, Melipilla, Cuncumén y Puangue. En la región costera de Valparaíso (de ahora en adelante denominada V Región), se presenta en Santo Domingo. Santo Domingo es una importante localidad para la producción de fruta, principalmente palto, con un total de 2.692 hectáreas. Esta zona cuenta con una gran cantidad de nuevos productores. En comparación con otras partes de la V Región, la producción de palta en Santo Domingo es un 25-40% menor; 9-15 toneladas de palta por hectárea en lugar de 12-25 toneladas por hectárea en el resto de la región.

En los últimos años se ha prestado cierta atención a este tema en Chile, por ejemplo, con iniciativas para generar frutales resistentes a los efectos del cambio climático, incluyendo suelos más salinos. Sin embargo, para trabajar hacia una agricultura resiliente en un entorno salinizado, las organizaciones y los agricultores indican que carecen de una visión clara de las causas y de la perspectiva de acción.

d. El consorcio

Por lo tanto, la embajada holandesa se ha puesto en contacto con The Salt Doctors (TSD) para realizar un estudio que permita conocer mejor la extensión de la salinización en Chile, y lo que se puede hacer para mitigar los efectos negativos de la salinidad, para adaptarse a ellos cuando la mitigación ya no sea una opción. Por otro lado, The Salt Doctors se han puesto en contacto con Delphy, una empresa de consultoría agrícola que trabaja en la mejora de la producción agrícola en todo el mundo para la alimentación y las flores. Delphy es responsable del asesoramiento agronómico general en este estudio. Además, TSD se puso en contacto con Arcadis, una empresa líder mundial que ofrece soluciones de diseño, ingeniería y consultoría sostenibles para activos naturales y construidos. Arcadis tiene una oficina en Chile y, por tanto, puede proporcionar asistencia local sobre el terreno. Arcadis ha supervisado principalmente los aspectos relacionados con el agua de este estudio, además de realizar el muestreo y el análisis del suelo. Este informe presenta los resultados de este estudio.



2. MÉTODOS

Se han aplicado varios métodos para abordar las interrogantes que constituyen el fondo de este informe. En primer lugar, se ha realizado un estudio bibliográfico, revisando la literatura (científica) disponible y relevante que nos fue proporcionada por chilenos, expertos en la materia. En segundo lugar, se ha enviado un cuestionario a dos agricultores y a tres miembros del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Además, se realizaron dos entrevistas con administradores de plantaciones.



Figura 1. Fotografías de las dos plantaciones visitadas, con la plantación de nogales arriba a la izquierda y la de paltos arriba a la derecha. En las dos fotografías inferiores, se observa el muestreo de suelo de ambos lugares.

Para la medición de la salinidad del suelo, el personal local de Arcadis visitó dos plantaciones en las que se colectaron muestras del suelo (Figura 1), tanto de la capa superior del suelo (0-40 cm) como del subsuelo (40-80 cm). Se tomaron varias submuestras de la capa superior del suelo y las submuestras se mezclaron en una sola muestra para el laboratorio. Las muestras se tomaron según el protocolo de muestreo de suelos de The Salt Doctors y se enviaron al laboratorio ALS.

e. Detección de los efectos de salinidad en terreno

Como parte de las visitas a terreno, se elaboró una lista de características de suelos afectados por salinidad, la cual se compartió con el equipo de Arcadis Chile. El siguiente resumen de **síntomas visuales** se basa en el informe del personal de Soil Survey (2014) y se utilizó para inspeccionar los lugares visitados.

Los suelos salinos y las plantas cultivadas en estos suelos pueden presentar uno o más de los siguientes síntomas visuales (Grupta y Arbol, 1990; Pearson y Waskom, 2007):

- Germinación inhibida de las semillas y emergencia irregular de las plántulas
- Síntomas de estrés hídrico incluso cuando el suelo está húmedo
- Aspecto esponjoso de la superficie del suelo
- Costas salinas blanquecinas visibles en la superficie del suelo
- Plantas con quemaduras en la punta de las hojas, especialmente en follaje joven, bajo riego por aspersión con agua salina

Los suelos sódicos y las plantas cultivadas en ellos pueden presentar uno o más de los siguientes síntomas (Grupta y Arbol, 1990; Pearson y Waskom, 2007):

- Problemas de cultivos relacionados con (1) el agua óptima del suelo no es uniforme en todo el terreno, con algunas zonas húmedas y otras secas; y (2) la superficie queda aglomerada en terrones, lo que da lugar a una mala germinación y a un número variable de plantas
- Mala emergencia de las plántulas debido a la formación de costras en el suelo
- Plantas atrofiadas, que a menudo presentan quemaduras en el margen de la hoja que progresan hacia el interior de las venas
- Poca profundidad de enraizamiento
- Síntomas de estrés hídrico tras el riego o las lluvias
- Variaciones en la altura de las plantas en el terreno o variaciones en el rendimiento al cosechar
- Residuos oscuros y harinosos en la superficie del suelo, relacionados con la materia orgánica dispersa
- Sensación jabonosa en el suelo al mojarlo para texturizarlo
- Drenaje deficiente, formación de costras o endurecimiento
- Bajos índices de infiltración, escorrentía y erosión
- Agua estancada periódicamente con aspecto turbio en micro relieves del suelo
- Humedad del suelo asociada sólo a los límites superficiales del suelo; los límites inferiores se encuentran casi secos y duros en el ciclo de humectación
- Al secarse, endurecimiento extremo de los suelos y desarrollo de grietas, que varían en anchura y profundidad, cerrándose al mojarse
- Subsuelo denso y duro con color variables; posiblemente haya algunos nódulos de limo
- Subsuelo expuesto o cerca de la superficie debido a la nivelación o a la erosión
- Estructura gruesa (<20 mm), estructura prismática o columnar del subsuelo



Suelos de pH elevado: Los suelos con pH alto no tienen por qué parecer diferentes de los suelos con pH neutro. Los problemas suelen aparecer como deficiencias de nutrientes si el pH es superior a 7,8. Los síntomas de las plantas pueden ser indicadores útiles de la sensibilidad a los suelos de pH alto. Los suelos con pH alto y las plantas cultivadas en estos suelos pueden mostrar uno o más de los siguientes síntomas visuales (Gupta y Arbol, 1990; Pearson y Waskom, 2007):

- Sustancia harinosa en la superficie del suelo
- Evidencia de deficiencias de nutrientes en las plantas, por ejemplo, una menor disponibilidad de Zn, Fe, P y B, como se indica a continuación: (1) franjas amarillas en las hojas medias y superiores (deficiencia de Zn y Fe); y (2) coloración verde oscura o púrpura de las hojas inferiores y los tallos (deficiencia de P)



3. CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS AFECTADOS POR SALES

Los suelos afectados por sales suelen denominarse suelos con elevadas concentraciones de sales que interfieren en el crecimiento normal de las plantas y pueden incluir suelos salinos, sódicos y salino-sódicos (y muchas subcategorías según el tipo de sales). Los suelos afectados por la sal son más comunes en las regiones áridas y semiáridas del mundo, pero también se han observado en climas húmedos y subhúmedos, especialmente en lugares donde la entrada de agua de mar puede provocar la salinización (FAO, 2020; Abrol, 1988).

Los **suelos salinos** contienen cantidades excesivas de sales solubles que pueden reducir la capacidad de las plantas para captar agua y pueden causar efectos iónicos específicos que afectan negativamente al crecimiento de las plantas. Así, los suelos salinos pueden contener diferentes sales y, en la mayoría de los casos, los principales cationes sodio, potasio, calcio y magnesio son los responsables de los elevados niveles de salinidad. El nivel de salinidad se expresa generalmente como la conductividad eléctrica (CE, en dS/m), medida en la fase acuosa de una relación suelo-agua específica. A menudo se utiliza una relación 1:2 o 1:5 (suelo:agua), aunque la norma internacional más común es medir la CE en el extracto de una pasta saturada de suelo (CEe).

Los **suelos sódicos** contienen altas cantidades de iones de sodio adsorbidos, lo que provoca la degradación de la estructura del suelo. Los suelos sódicos suelen clasificarse en función de la tasa de adsorción de sodio (SAR) o del porcentaje de sodio intercambiable (ESP) y/o del pH del suelo. Hay varias formas de calcular el ESP, pero a menudo se utiliza $ESP = \frac{\text{intercambiable}}{(\text{Na}/\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Na})} * 100$. Para el SAR, el cálculo es $SAR = \frac{\text{intercambiable}}{(\text{Na}/(\text{Ca} + \text{Mg}) - 0,5)}$. En ambos casos se trata de la dominancia del sodio (Na) que puede provocar la inestabilidad de la estructura del suelo, lo que se traduce en suelos compactos (en el caso de suelos con alto contenido en arcilla) con mala infiltración de agua y aire en el suelo.

Recientemente, la FAO (2021) ha clasificado los suelos afectados por la sal según la Tabla 1. Como puede verse, hay varios niveles de salinidad (<0,75 dS/m = no salino, 0,75-2 dS/m = ligeramente salino, 2-4 dS/m = moderadamente salino, 4-8 dS/m = fuertemente salino, 8-15 dS/m = muy fuertemente salino, > 15 dS/m extremadamente salino, basado en la CEe, es decir, en la CE del extracto de una pasta saturada del suelo). Además, también se puede calcular el ESP y vincularlo a una clase específica. Para la sodicidad, también se utiliza a menudo el pH del suelo, con $pH > 8,2 = \text{sódico}$. Un pH del suelo elevado puede afectar a la disponibilidad de nutrientes de varios elementos, causando posibles deficiencias de nutrientes en los cultivos (sobre todo de diferentes microelementos necesarios para el crecimiento óptimo de las plantas).

En resumen, para clasificar un suelo afectado por la sal es necesario conocer la CE, el pH y las concentraciones de sodio (Na), calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K) para calcular el ESP y el SAR.

Tabla 1. Tipos de salinidad y sodicidad del suelo (FAO, 2021).

CEe (dS/m)	Intensidad de salinidad	Efecto sobre el crecimiento del cultivo	ESP (%)	Peligro de sodicidad
<0,75	Ninguno	Ninguno	<15	Ninguno
0,75-2	Leve	Ninguno	15-30	Leve
2-4	Moderado	Rendimientos de los cultivos sensibles pueden verse restringidos	30-50	Moderado
4-8	Fuerte	Rendimientos de muchos cultivos es limitado	50-70	Alto
8-15	Muy fuerte	Sólo los cultivos tolerantes rinden satisfactoriamente	>70	Extremo
>15	Extremo	Sólo unos pocos cultivos muy tolerantes rinden satisfactoriamente		

4. TOLERANCIA A LA SAL DE LOS CULTIVOS

Los cultivos que crecen en condiciones salinas están expuestos a dos grandes retos: los efectos osmóticos y los efectos iónicos específicos. Los efectos osmóticos se deben a que las sales reducen el potencial osmótico de la solución del suelo, dificultando la captación de agua. Los cultivos que tienen dificultades para adaptarse a los efectos osmóticos suelen mostrar signos de estrés hídrico o de sequía (marchitamiento). La adaptación en sí misma implica la acumulación y/o producción de solutos (orgánicos), lo que requiere energía, y esto a menudo resulta en una reducción del crecimiento (aunque los cultivos parezcan estar sanos en todos los demás aspectos). Los efectos específicos de los iones pueden ser directamente tóxicos para el cultivo, debido a la acumulación excesiva de Na, Cl o B en sus tejidos, o causar desequilibrios nutricionales (Lantzke *et al.*, 2007; Munns, 2004; Hopmans *et al.*, 2021). Las toxicidades iónicas se observan raramente en los cultivos anuales, pero cuando el sodio y/o el cloruro son dominantes, la acumulación en las hojas más viejas puede tener lugar y da lugar a lesiones en la planta tales como lados quemados de la hoja y un amarilleo alrededor de las venas.

Las toxicidades iónicas específicas son particularmente prominentes en los cultivos de árboles y vides y las lesiones se hacen más frecuentes con el paso de los años. A menudo, la toxicidad por cloruro se produce en los cultivos arbóreos antes que la toxicidad por sodio, ya que el sodio (a diferencia del cloruro) se retiene en el tejido leñoso (Hopmans *et al.*, 2021). En general, el sodio puede causar una deficiencia de calcio o potasio inducida por el sodio en muchos cultivos y, por lo tanto, en el caso de los cultivos leñosos también se puede observar la toxicidad por cloruro en las hojas.



Figura 2. Diversos tipos de daños en las hojas de la plantación de paltos visitada para esta exploración rápida.

La tolerancia a la sal de los cultivos suele basarse en el clásico "modelo umbral-pendiente" (Maas y Hoffman, 1977), que describe la tolerancia a la sal de los cultivos mediante un valor umbral (nivel máximo de salinidad sin reducción del rendimiento) y un parámetro de pendiente (la disminución del rendimiento para niveles de salinidad superiores al umbral) (Figura 3). En este modelo, un cultivo con un umbral bajo y una fuerte disminución del rendimiento a niveles de salinidad superiores a este umbral (pendiente pronunciada) se denomina cultivo sensible, y un cultivo con un umbral alto y una pendiente poco pronunciada se denomina cultivo tolerante. En este modelo simplificado se distingue entre sensible a la sal, moderadamente sensible, moderadamente tolerante y tolerante, y los cultivos pueden clasificarse de acuerdo con esta división (véase también la Tabla 1). Aunque este modelo simplificado puede mejorarse (por ejemplo, véase Van Straten *et al.*, 2019), los niveles de tolerancia a la sal de los cultivos se comunican a menudo utilizando este modelo y, por esta razón, también se hará referencia a él en este informe. Hay que tener en cuenta que los datos de rendimiento de este modelo se expresan como rendimiento relativo y que estos datos sólo sirven como orientación para las

tolerancias relativas entre los cultivos. La tolerancia absoluta varía en función del clima, las condiciones del suelo y las prácticas culturales. Además, hay que tener en cuenta que la tolerancia a la sal de los cultivos se suele relacionar con la "salinidad" (como en los suelos salinos), pero los efectos de la sodicidad (mala estructura del suelo, mala infiltración del agua, mala aireación, posible anegamiento, etc.) pueden tener también un gran efecto en el crecimiento y el rendimiento de los cultivos.

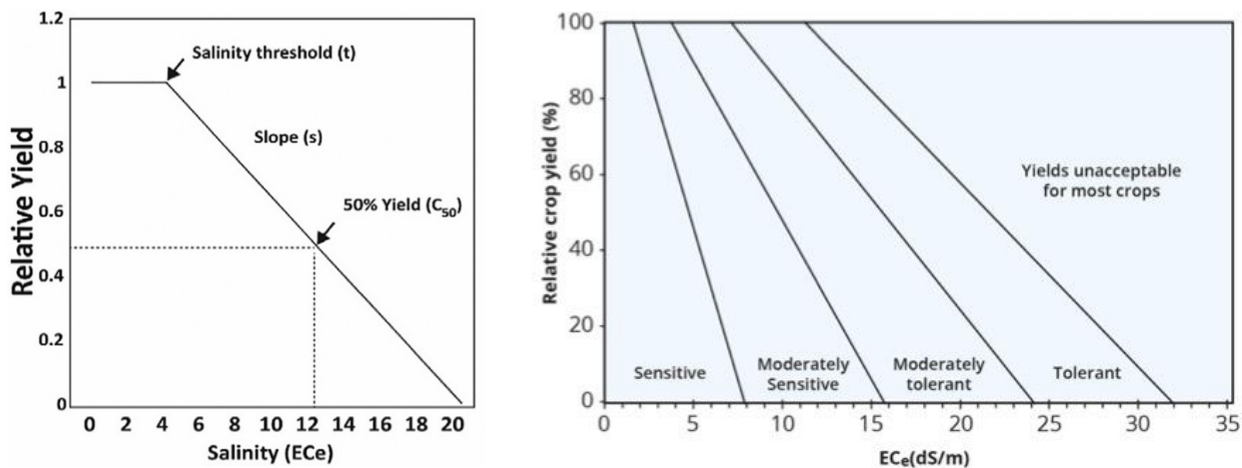


Figura 3. División para clasificar la tolerancia de los cultivos a la salinidad (Maas y Hoffman, 1977). A la izquierda se ilustra el principio del umbral y la pendiente, a la derecha la clasificación de la tolerancia a la sal.

En la Tabla 2 se presenta una visión general de la tolerancia a la sal de algunos cultivos leñosos, entre ellos el palto y el nogal (FAO, 2002). Esta publicación de la FAO se utiliza a menudo como referencia de la tolerancia a la sal de los cultivos, aunque la mayor parte de la literatura citada es relativamente antigua (véase la última columna de la Tabla 2). Además, en la mayoría de estas referencias la tolerancia se basa en el crecimiento de los brotes y no en el rendimiento del fruto, lo que hace más difícil relacionar la reducción del rendimiento observada en el terreno con la tolerancia a la sal o el estrés salino. Como se ha indicado anteriormente, el palto es un cultivo importante para las regiones objeto de este informe, así como el nogal. Basándose en la Tabla 2, ambos cultivos pueden ser catalogados como sensibles a la sal.

En la Tabla 3 y Tabla 4 los niveles de salinidad del suelo (CEe, por lo que la conductividad eléctrica (CE) del extracto de una pasta saturada del suelo) se calculan asumiendo que la CEw (la CE del agua de riego) puede multiplicarse por 1,5 para obtener los niveles de salinidad del suelo (CEe). Esta es una suposición muy general, y se recomienda medir realmente los niveles de salinidad del suelo, ya que la extensión de la salinidad del suelo depende de muchos factores diferentes relacionados con las propiedades del suelo y la gestión del riego. En la Tabla 3 se indican las restricciones de crecimiento, basadas en restricciones nulas, medias y severas. En resumen, no se esperan restricciones al crecimiento si los niveles de salinidad del suelo son inferiores a 1,5 dS/m y si los niveles de salinidad del agua son inferiores a 1,1 dS/m. En la Tabla 4, las restricciones de crecimiento están más especificadas, con una concentración salina fija a la que se espera una restricción de crecimiento del 10% y del 25% para los paltos. En la Tabla 5, la tolerancia a la sal del palto se expresa como las concentraciones de cloruro (en miliequivalentes por litro, meq/L). En esta tabla, también presentan las diferencias en la tolerancia a la sal entre diferentes cultivares o portainjertos. Esta diferencia en la tolerancia a la sal entre diferentes portainjertos también ha sido reportada por Castro *et al.* (2015), siendo el portainjerto Antillano UCV7 el que muestra el mejor potencial para su cultivo en condiciones salinas elevadas.

Tabla 2. Resumen de la tolerancia a la sal de algunos cultivos leñosos (FAO, 2002).

Cultivo (Nombre Común)	Tolerancia basada en	CEe		Clasificación 1	Año de referencias ²
		Umbral (en dS/m)	Pendiente (% por dS/m)		
Almendro	Crecimiento de los brotes	1,5	19	S	1953, 1956
Damasco	Crecimiento de los brotes	1,6	24	S	1956
Palto	Crecimiento de los brotes	--	--	S	1950
Higo	Peso seco de la planta	--	--	MT ³	1954, 1983
Vid	Crecimiento de los brotes	1,5	9,6	MS	1967, 1972, 1973
Pomelo	Rendimiento de fruta	1,2	13,5	S	1978
Naranja	Rendimiento de fruta	1,3	13,1	S	1958, 1988, 1991
Guayabo	Crecimiento de brotes y raíces	4,7	9,8	MT	1984
Nogal	Daño Foliar	--	--	S ³	1955

¹ Clasificación: S=sensible, MS=moderadamente sensible, MT=moderadamente tolerante, T=tolerante

² Para referencias completas referirse a: <http://www.fao.org/3/y4263e/y4263e0e.htm>

³ Las clasificaciones son estimativas

Tabla 3. Restricciones de crecimiento de los nogales en función de la CE del suelo y del agua de riego (adaptado de Ibacache, 2008).

CE (dS/m)	Restricciones de crecimiento para Juglans sp. (Walnut)		
	Nula	Media	Severa
Salinidad del suelo en la zona de raíces (CEe)	< 1,5	1,5 – 4,8	> 4,8
Agua de riego (CEw)	< 1,1	1,1 – 3,2	> 3,2

Tabla 4. Restricciones de crecimiento de los paltos en función de la CE del suelo (CEe) y del agua de riego (CEw) (adaptado de Ayers, 1977).

Cultivo	Pérdida del 0 %		Pérdida del 10 %		Pérdida del 25 %	
	CEe (dS/m)	CEw (dS/m)	CEe (dS/m)	CEw (dS/m)	CEe (dS/m)	CEw (dS/m)
Palto	1.3	0.9	1.8	1.2	2.5	1.7



Tabla 5. Tolerancia al cloruro de algunos cultivares y portainjertos de cultivos frutales (Ayers y Westcot, 1985).

Cultivo	Portainjerto o cultivar	Concentración máxima de cloruro (en meq/L) Sin lesiones en las hojas	
		Zona de la raíz (suelo)	Agua de riego
Palto (<i>Persea americana</i>)	Antillano	7.5	5.0
	Guatemalteco	6.0	4.0
	Mexicano	5.0	3.3
Cítricos (<i>Citrus spp.</i>)	Mandarina Sunki	25.0	16.6
	Tangelo Sampson	15.0	10.0
	Citrumelo 4475	10.0	6.7
Vid (<i>Vitis spp.</i>)	Salt creek, 1613-3	40.0	27.0
	Dog ridge	30.0	20.0
	Thompson seedless	20.0	13.3
	Perlette	20.0	13.3
	Cardinal	10.0	6.7
	Black rose	10.0	6.7



5. RESULTADOS

a. Situación actual

AGUA

Clima, Cambio Climático y Sequías

El clima de la Región de Valparaíso y Región Metropolitana ha sido descrito como "mediterráneo" (semiárido), con inviernos frescos y (relativamente) húmedos y veranos secos y cálidos. Las dos regiones se denominan a menudo como "Zona Mediterránea Norte". Las precipitaciones en ambas regiones son muy estacionales, y la mayor parte de ellas se producen en junio y julio. La suma anual de las precipitaciones es de unos 345 mm (véase la Figura 4). Debido a esta escasa cantidad de precipitaciones y a su carácter altamente estacional, los agricultores riegan sus cultivos.

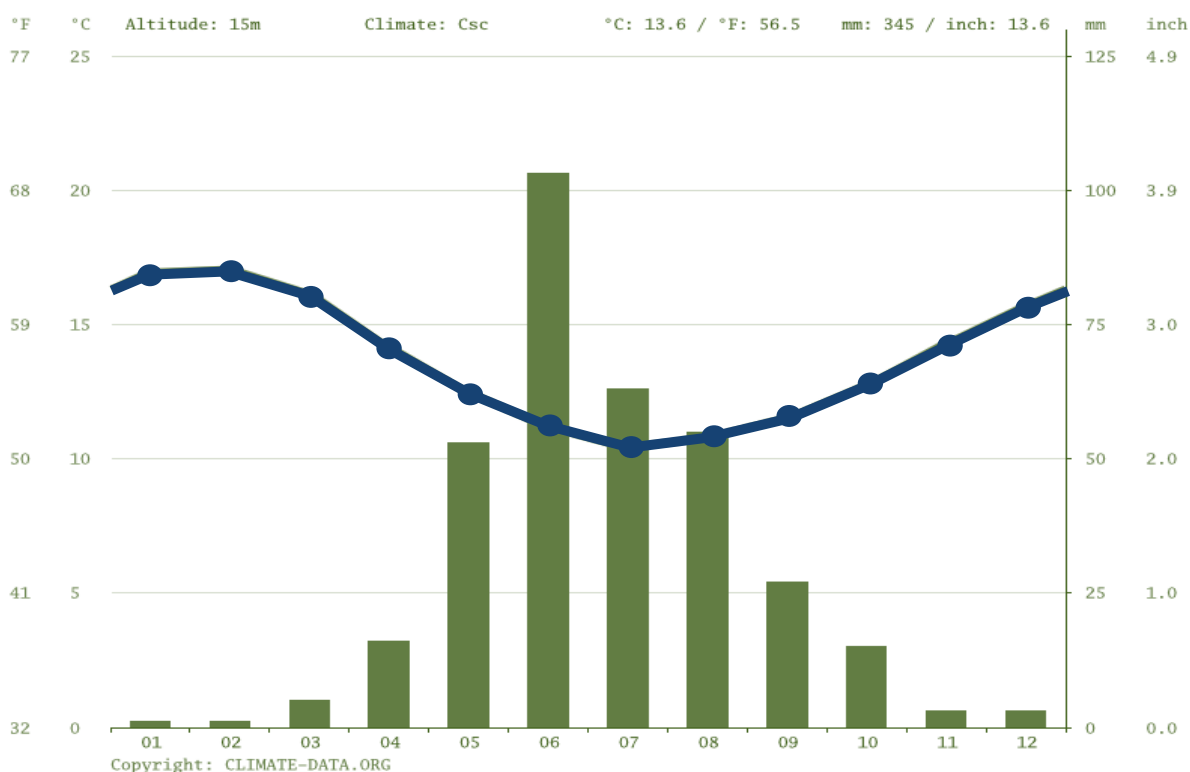


Figura 4. Precipitación y temperatura media anual en Valparaíso, Chile (fuente: www.climate-data.org).

Desde mediados de la década de 1970 se ha experimentado un calentamiento gradual en la zona central y norte de Chile, que ha sido consistente con el cambio climático provocado por las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera (CR², 2015). Actualmente, Chile atraviesa una mega sequía, registrándose una escasez de lluvias que supera el 30% desde el norte de Chile hasta la Región de la Araucanía (Figura 5), con registros climáticos sin precedentes en los últimos 70 años. El periodo de retorno del año más seco de la actual sequía se ha calculado en más de 30 años en el centro y sur de Chile (CR², 2015). Además, esta mega sequía ha tenido lugar durante la década más cálida registrada en Chile Central, con registros de estaciones meteorológicas de temperaturas máximas de 0,5 a 1,5 °C por encima de los valores normales registrados desde el año 1970 hasta el año 2000 (CR², 2015).



La falta de precipitaciones sumada a las altas temperaturas ha provocado un aumento de la pérdida de agua por sublimación, evapotranspiración y evaporación, agravando el déficit hídrico actual (CR², 2015).

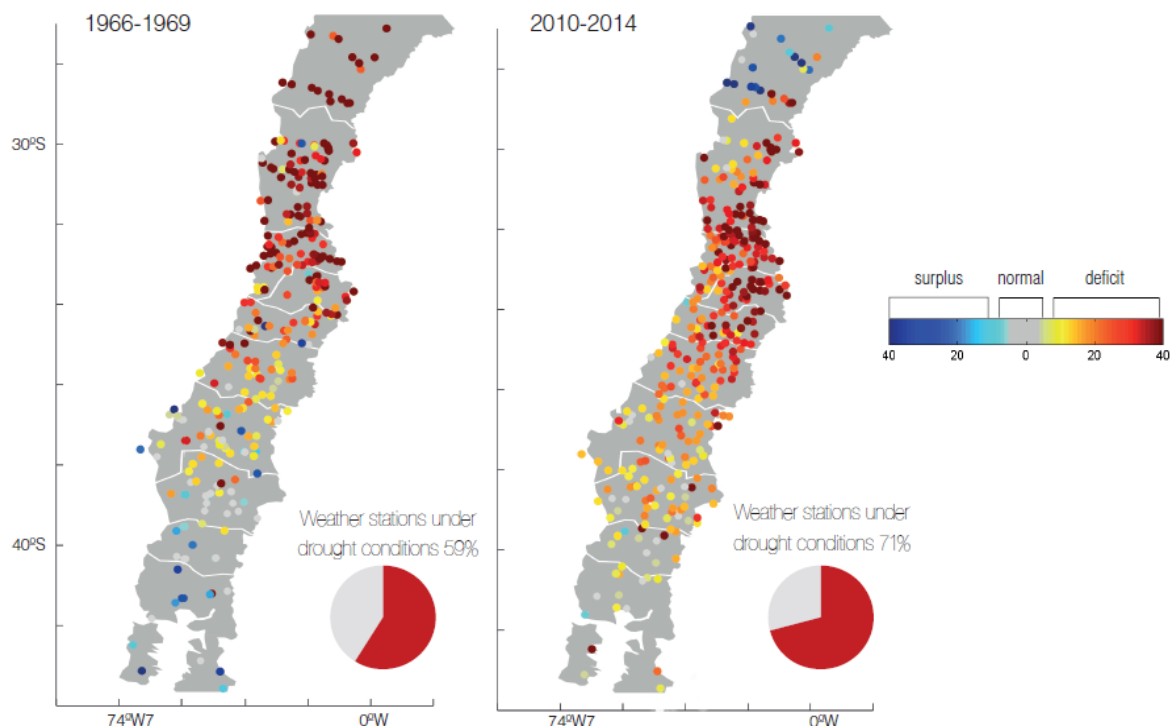


Figura 5. Déficit o excedente medio de precipitaciones en porcentaje para los años 1966 a 1969 y 2010 a 2014 (fuente: Imagen del Informe del CR² a la Nación (2015).

Para finales de siglo, se espera que los promedios actuales de las temperaturas sigan aumentando entre 2 y 4°C, junto con la tendencia a la disminución de las precipitaciones. También se espera que cambie el régimen de vientos, la nubosidad y la frecuencia de eventos críticos relacionados con las temperaturas extremas, como menos heladas y más días de calor extremo, entre otros. Esto podría desplazar las zonas climáticas actuales hacia el sur, afectando a la producción frutícola y a la silvicultura (Neuenschwander, 2010), y generando la migración de cultivos o el cambio de estos para mitigar los efectos adversos (Sloat *et al.*, 2020; Rising & Devineni, 2020).

Derechos de Agua en Chile

La legislación vigente en materia de derechos de agua en Chile es el Código de Aguas, promulgado en 1981. Con derechos de agua nos referimos al derecho legal de una determinada persona a utilizar un determinado volumen de agua, subterránea y/o superficial, de una sola vez, o en el transcurso de un año, u otro. Los detalles son complejos y específicos por región, pero lo central es que alguna vez se han concedido gratuitamente y actualmente se pueden vender. Además, en el caso de las aguas subterráneas no se han basado en la disponibilidad real de agua.

La asignación inicial de derechos de agua se realizó en función del uso histórico del agua en el pasado (basado en los antiguos Códigos de Aguas de 1951 y 1969). Después, si se necesitaba más agua, se elegía al que más pagaba por ella en una acción entre los interesados, y la reasignación de los derechos de agua se producía a través de la libre transferencia de derechos (Figueroa, 1995).

Algunas de las características importantes del Código de Aguas en Chile señaladas por Ríos y Quiroz (1995), y agrupadas por Munchnik (1997) se enumeran a continuación:

- Los derechos de agua son independientes de los derechos de propiedad de la tierra y pueden venderse, comprarse y transferirse libremente. Su carácter de propiedad privada está garantizado de acuerdo con los derechos de propiedad establecidos en el Código Civil.
- La solicitud de nuevos derechos de agua no está sujeta al destino del agua ni al tipo de uso y no existe un orden de prioridades en cuanto al uso del recurso. También en este sentido, puede decirse que es la única legislación que no impone como condición de acceso al derecho de agua su uso efectivo y beneficioso (Solanes, 1997).
- El Estado asigna los derechos de agua de forma gratuita y, cuando se presentan solicitudes simultáneas para los mismos derechos, éstos se adjudican al mejor postor. No se cobran impuestos a los titulares de los derechos.
- El papel del Estado en la resolución de conflictos es muy limitado, y las disputas se resuelven mediante negociaciones privadas o a través del sistema judicial.
- Además de los usos consuntivos actuales, el Código define el concepto de uso no consuntivo. Este concepto se ha incluido en previsión de la multiplicidad de usos del agua, especialmente con el fin de promover la construcción de centrales hidroeléctricas en los tramos superiores de las cuencas hidrográficas, sin afectar a los derechos consuntivos nuevos o existentes concedidos en los tramos inferiores para fines de riego.
- En términos generales, el derecho de uso de las aguas subterráneas se rige por las mismas normas legislativas que las aguas superficiales. Sin embargo, el Código contiene algunas normas especiales para este tipo de aguas (Rosegrant y Gazmuri, 1994).

A continuación, se presentan las organizaciones de usuarios (Ríos & Quiroz, 1995):

- Juntas de Vigilancia: comités encargados de supervisar el uso de las fuentes naturales de agua
- Asociación de Usuarios de Canales: encargada de gestionar las infraestructuras primarias, como las presas y los canales principales de riego
- Comunidades de Aguas: encargadas de las infraestructuras secundarias, como los canales de distribución

Las instituciones que también juegan un rol en la implementación del Código de Aguas de 1981 y las Leyes de Riego (Ríos & Quiroz, 1995) son las siguientes:

- Dirección General de Aguas (DGA): Organismo estatal dependiente del Ministerio de Obras Públicas (MOP), encargado de la planificación general del uso del agua y del desarrollo y explotación de los recursos hídricos naturales.
- Comisión Nacional de Riego (CNR): Organismo estatal encargado de planificar, evaluar y aprobar los proyectos de inversión en obras de infraestructura de riego, lo que incluye la coordinación de las actividades de diversas instituciones públicas y organizaciones privadas. Junto con la Dirección de Riego, participa en la aplicación de las leyes de riego para grandes y pequeños proyectos
- Dirección de Riego (DR): Organismo gubernamental cuya función principal es la ejecución de los estudios técnicos y económicos de las obras de riego en los proyectos de inversión financiados por el Estado, una vez aprobados por la CNR, son licitados a las empresas privadas



El modelo de gestión de los recursos hídricos ha sido criticado por varios organismos multilaterales como la OCDE (Neirot, 2018). En su informe "Evaluaciones de Desempleo Ambiental: Chile 2016", la OCDE indicó que el modelo permite las concentraciones extremas de derechos de agua, además de observar los siguientes problemas (Neirot, 2018):

- Persisten las asignaciones excesivas y la concentración extrema de derechos de agua
- Hay casos de sobreexplotación y contaminación en varios acuíferos del país
- Sigue faltando conocimiento de los recursos hidrológicos, requisito básico para una gestión eficaz del agua
- Es necesario mejorar la transparencia del registro público del agua

Descripción Hidrográfica de la Región Metropolitana

El 90% de la Región Metropolitana está compuesta por la cuenca del Río Maipo, mientras que el 10% restante corresponde a fracciones de las subcuencas del Estero Yali que se comparte con la Región de Valparaíso, el Estero Alhue, y una mínima fracción de la subcuenca del Río Rapel, que se comparten con la Región del Libertador Bernardo O'Higgins (Arrau, 2015). Existen 15 ríos en esta región, con dos principales, el Río Maipo, y el Río Mapocho (

Figura 6).

El principal río de esta región es el Río Maipo, que se origina en la Cordillera de los Andes y termina en la ciudad de San Antonio en el Océano Pacífico (Región de Valparaíso), atraviesa tres subcuencas: el Río Maipo Alto, el Río Maipo Medio y el Río Maipo Bajo. Nace de la confluencia de los Ríos Yeso y Colorado y tiene un régimen hidrológico mixto nivo-pluvial (Arrau, 2015; DIRPLAN MOP Región Metropolitana 2021).

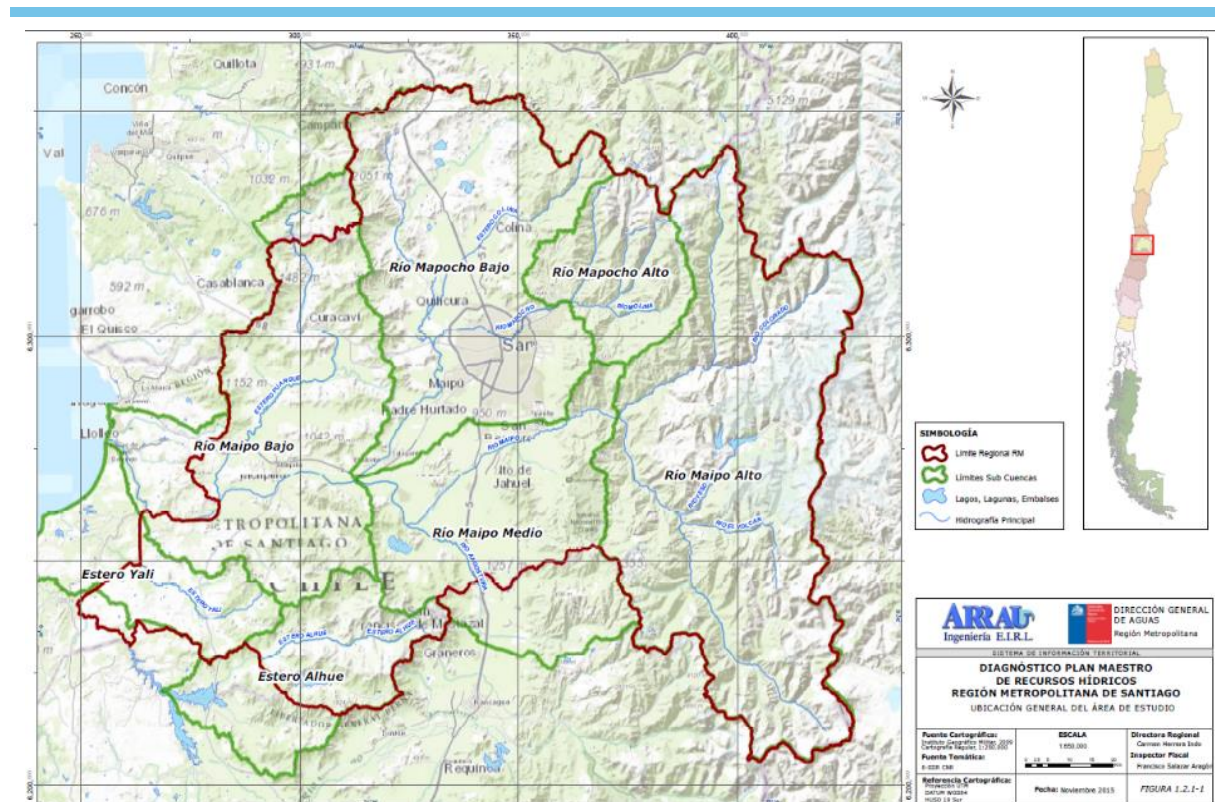


Figura 6. Mapa de la Región Metropolitana (Fuente: Arrau, 2015).

La oferta superficial media anual entre 2010 y 2014 para la región (suma de todas las subcuencas) fue de 123,5 m³/s, y la oferta subterránea media anual fue de 44,77 m³/s, estos no consideran la reutilización entre una subcuenca y otra (transferencias excedentes; Arrau, 2015). La demanda de agua superficial fue de 68,15 m³/s, y la demanda de agua subterránea de 34,14 m³/s (calculada a partir de los datos presentados por Arrau, 2015).

El principal uso de las aguas superficiales y subterráneas es el riego (62 % y 65 %, respectivamente), con un caudal medio de demanda de 42,25 m³/s para las aguas superficiales y 22,19 m³/s para las subterráneas, como se presenta en la Tabla 6 con los demás usos. Los problemas más recurrentes son la disponibilidad de abastecimiento de agua potable rural, el descenso generalizado de los niveles freáticos y la escasez de agua (tanto para aguas superficiales como subterráneas), lo que también se aprecia por el balance hídrico negativo en verano para las aguas superficiales (-19,74 m³/s) y un balance hídrico negativo para las aguas subterráneas (-4,98 m³/s) en los trimestres de primavera y verano (Arrau, 2015).

Como se mencionó anteriormente, el Río Maipo se divide en tres tramos (ver también la

Figura 6: Maipo Alto, Maipo Medio y Maipo Bajo), siendo el tramo alto que presenta un aumento significativo del caudal en los meses de primavera debido al derretimiento de la nieve en los Andes, el tramo medio que presenta dos periodos anuales de mayor descarga (en primavera e invierno debido a las precipitaciones y al derretimiento de la nieve), y el tramo bajo que presenta principalmente grandes volúmenes de caudal asociados a las precipitaciones (Peña-Guerrero et al., 2020).

Tabla 6. Demanda de aguas superficiales y subterráneas en la Región Metropolitana de Chile de 2010 a 2014 (Fuente: Elaborado por Arcadis a partir de los datos presentados por Arrau, 2015).

Demanda	Riego (m3/s)	Agua Potable Urbana (m3/s)	Caudal Ecológico (m3/s)	Industrial (m3/s)	Minería (m3/s)	Agua Potable Rural (m3/s)
Superficial	42.25	13.63	10.22	13.63	6.81	-
Subterráneas	22.19	10.58	-	0.68	0.34	0.34

El uso agrícola en la cuenca del río Maipo comprende 246.477 hectáreas de tierras agrícolas y 22.916 hectáreas de rotación de cultivos de pradera. El río Maipo tiene una longitud de 250 km y satisface alrededor del 90% de la demanda actual de riego (DGA, 2004). La superficie total regada en la Región Metropolitana es de 138.693,8 ha, principalmente por riego por surco (41,5%), como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Sistemas de riego utilizado en la Región Metropolitana de Chile. (Fuente: Elaborado por Arcadis a partir de la información del VII Censo Nacional Agropecuario y Forestal del año 2007 del INE).

Sistema de Riego	Superficie Regada (ha)	Superficie Regada Comparada con la Superficie Total (%)
Tendido	33,187.2	23.9
Surco	57,547.3	41.5
Aspersión Tradicional	881.5	0.6
Carrete o Pivote	3,022.7	2.2
Goteo o Cinta	38,079.4	27.5
Micro aspersión o Microjet	33,187.2	23.9
Otro	57,547.3	41.5

Descripción Hidrográfica de la Región de Valparaíso

Esta región cuenta con cuatro ríos principales, todos de carácter nivo-pluvial (DIRPLAN MOP Región de Valparaíso, 2012), que nacen de la Cordillera de los Andes (Figura 7). Se trata de los ríos Aconcagua, Petorca, La Ligua y Maipo. En el caso del Río Maipo, sólo el último tramo y la desembocadura del río están presentes en esta región.

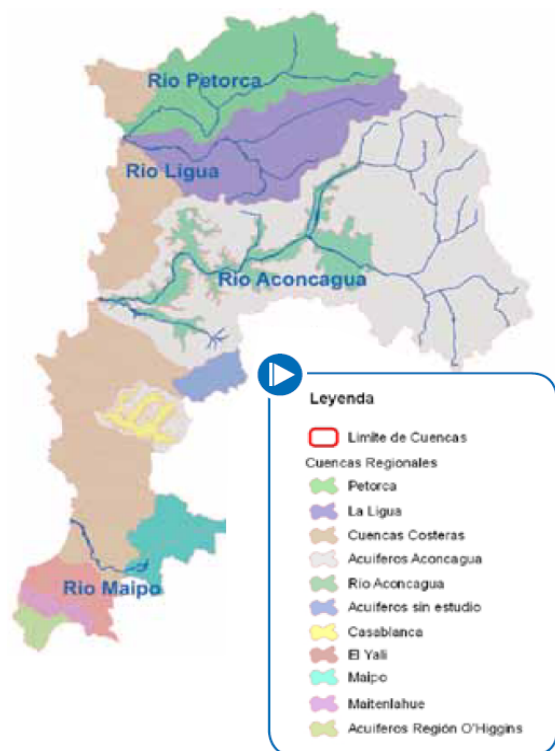


Figura 7. Cuencas y subcuencas de la Región Metropolitana. (Fuente: DIRPLAN MOP Región de Valparaíso, 2012).

El Río Aconcagua es el principal río de la región, nace en la Cordillera de los Andes de la confluencia de los Ríos Juncal y Blanco, desde la intersección con el Río Blanco, el Río Aconcagua tienen una longitud de 142 km, hasta su desembocadura en Concón en la Región de Valparaíso (CENMA, 2008). Este río presenta una notable fluctuación estacional debido al derretimiento de la nieve en primavera, y a las precipitaciones en invierno, debido a su régimen mixto. Este río drena una cuenca hidrográfica de 7,4340 km², con una longitud de 177 km (incluyendo el río Juncal), teniendo un caudal medio de 79 m³/s al desaguar en el mar (DIRPLAN MOP Región de Valparaíso, 2012).

La demanda estimada hasta el momento (2021) para el uso agrícola del agua fue de 35,6 m³/s para la Región de Valparaíso (DIRPLAN Región de Valparaíso, 2007), y se estima que la Cuenca del Río Aconcagua cuenta con 71.000 hectáreas de terreno destinadas a la agricultura (DCPRH, 2016). En la Tabla 8 se muestra la superficie de regadío en la región, y el aporte relativo de los diferentes métodos de riego.

Tabla 8. La superficie de los suelos agrícolas regadas en la Región de Valparaíso y las contribuciones relativas de los diferentes métodos de riego.

Sistema de Riego	Superficie Regada (ha)	Superficie Regada Comparada con la Superficie Total (%)
Tendido	16,721.7	19.2
Surco	19,152.0	22.0
Aspersión Tradicional	1,765.3	2.0
Carrete o Pivote	1,085.2	1.2
Goteo o Cinta	32,925.7	37.9
Micro aspersión o Microjet	14,702.7	16.9
Otro	535.0	0.6

Suelo

La variedad geológica y el origen diverso de los sedimentos superficiales hacen que los suelos de Chile tengan un carácter muy diferente de norte a sur. Se puede afirmar que en la región desértica del norte los suelos salinos, formados por gravas y arenas cementadas con sulfato de calcio, se alternan con los suelos ricos en álcalis, que son difíciles de cultivar incluso con riego debido a sus acumulaciones superficiales de sal. En el Valle Central, los suelos aluviales se han desarrollado sobre depósitos fluvio-volcánicos, lo que explica su riqueza mineral y orgánica (fuente: <https://www.britannica.com/place/Chile/Soils>). En las regiones de Valparaíso y Metropolitana, las zonas de suelo, de este a oeste, se pueden caracterizar como "Cordillera de los Andes Principal", "Valle Central" a "Cordillera de la Costa" (Casanova et al., 2013). Debido a la naturaleza fluvial de la zona, los tipos de suelo pueden variar desde suelos arenosos hasta suelos arcillosos. La geología de la zona muestra una amplia gama de rocas volcánicas hasta sedimentos marinos y continentales, a menudo compuestos de yeso (Peña-Guerrero et al., 2020). En la mayoría de las regiones de Chile, la textura del suelo se puede clasificar como franco arenoso, con algo de franco, franco arcilloso y arcilla (Casanova et al., 2013). Los suelos de la zona metropolitana suelen ser de textura fina (contienen arcilla) y la profundidad está limitada por un horizonte denso cohesivo (por arcilla o cementado por carbonatos) o por una capa freática permanente (Casanova et al., 2013). En general, los suelos de la zona mediterránea se caracterizan por una baja capacidad de intercambio catiónico (Casanova et al., 2013) (lo que indica un contenido de arcilla relativamente bajo) y la lixiviación de cationes se reconoce como un factor importante que limita la productividad en la zona sur del Mediterráneo (Bernier y Alfaro, 2006). Esto indica que muchos suelos tienen una buena infiltración y drenaje del agua. Los suelos de la zona hiperárida a semiárida y del norte del Mediterráneo suelen presentar un pH elevado que reduce la disponibilidad de los micronutrientes, especialmente, y se observan con frecuencia deficiencias en los cultivos de hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn) y cobre (Cu) (Casanova et al., 2013).

En la Figura 5 se observa el suelo de la plantación de paltos visitada para este informe (imagen de la izquierda) y de la plantación de nogales (imagen de la derecha). La coloración en la mano está causada por la fracción arcillosa de la muestra de suelo (plantación de palto), donde también se observa materia particulada de mayor tamaño.



Figura 8. Suelo de la plantación de paltos (izquierda) y de la plantación de nogales (derecha).

Cultivos

En Chile, las explotaciones familiares aportan el 54% de la producción de hortalizas, más del 40% de los cultivos anuales y de flores y el 30% de los viñedos en Chile, lo que representa un total del 90% del número total de explotaciones en Chile. Se sabe menos de estas plantaciones en cuanto a los problemas de salinidad, y normalmente no tienen los medios para incorporar alta tecnología o contratar expertos, a diferencia de las grandes plantaciones.

En la Tabla 9 se presentan los diez cultivos más importantes en Chile entre los años 2017-2019 (datos de FAOSTAT). Se observa que, para la mayoría de los cultivos, los rendimientos aumentan ligeramente a lo largo de los años, y que la superficie cultivada es más bien constante, excepto para la avena, cuya superficie cultivada se reduce considerablemente. La superficie de cerezas aumenta.

Tabla 9. Los diez cultivos más dominantes en superficie están en Chile en los años 2017-2019 (datos más recientes de FAOSTAT).

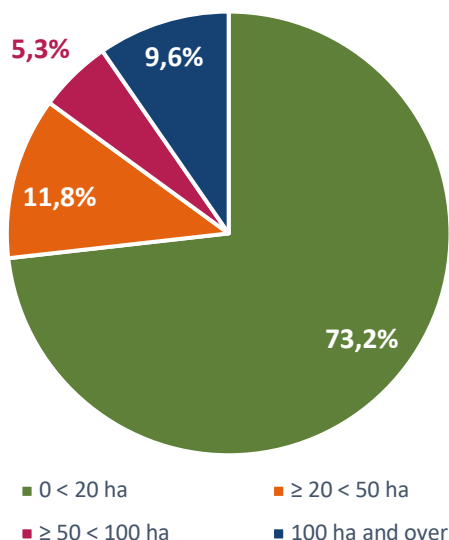
Cultivo	Año	Superficie Cosechada (ha)	Rendimiento (t/ha)
Avena	2017	136.818	5,21
Avena	2018	107.528	5,31
Avena	2019	74.617	5,16
Maíz	2017	94.668	11,22
Maíz	2018	89.058	12,47
Maíz	2019	80.428	12,10
Papa	2017	54.082	26,38
Papa	2018	41.268	28,67
Papa	2019	41.811	27,81
Raps	2017	46.249	3,96
Raps	2018	56.533	3,89
Raps	2019	48.166	3,85
Nogal, nueces con cáscara	2017	35.277	2,83
Nogal, nueces con cáscara	2018	36.819	2,99
Nogal, nueces con cáscara	2019	40.801	3,01
Manzano	2017	35.937	48,67
Manzano	2018	34.427	49,38
Manzano	2019	32.371	50,09
Cerezo	2017	25.109	4,78
Cerezo	2018	30.179	7,55
Cerezo	2019	38.392	6,09
Palto	2017	30.078	6,65
Palto	2018	29.166	5,83
Palto	2019	29.224	5,58

b. Región Metropolitana

La Región Metropolitana es la más pequeña y poblada de Chile, con una superficie total de 15.403,2 km² (2% del territorio nacional). Tiene un clima templado cálido con una estación seca prolongada. La mayoría de las plantaciones de esta región son pequeñas explotaciones de menos de 20 hectáreas, que representan el 73,2% del total de las explotaciones de la región, sin embargo, equivalen sólo a el 3,73% del total de las tierras de cultivo de la región. Las explotaciones de 100 o más hectáreas equivalen al 9,6% del total de explotaciones, representando el 89,1% de la superficie total cultivada. En la Figura 9 se presenta el resto de los detalles de las explotaciones de 20 a 50 ha y de 50 a 100 ha, así como el número de explotaciones y las superficies de cada clase de tamaño.



Porcentaje del Número de Plantaciones en la Región Metropolitana



Porcentaje del Número de Plantaciones en la Región Metropolitana

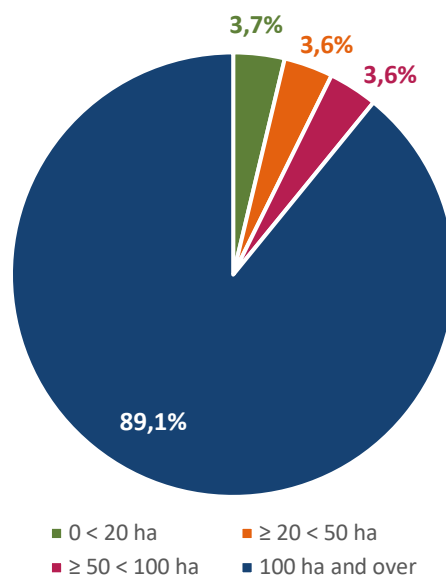


Figura 9. Tamaño de las plantaciones en la Región Metropolitana (izquierda) y porcentaje del total de tierras de cultivo ocupadas por los diferentes tamaños (derecha). Las grandes plantaciones (menos del 10%) ocupan la gran mayoría de los suelos de cultivo (89,1%) (Fuente: Adaptado de ODEPA, 2021).

Según el Censo Agropecuario y Forestal del año 2007, los principales usos del suelo para la agricultura en la Región Metropolitana se destinan a frutales (35,7%), hortalizas (16,9%), plantas forrajeras (14,3%), cereales (10,7%) y viñedos y parras (8,2%) (INE, 2007). Este censo se está actualizando y se espera que los resultados estén disponibles en agosto de 2022 (INE, 2021). A continuación, se presenta la superficie frutícola regional por especies (Tabla 10), la superficie hortícola regional por especies (Tabla 11) y la superficie regional de cultivos anuales por especies. Los datos de estas tablas se han obtenido de diversas fuentes y han sido presentados por ODEPA.

Tabla 10. Superficie frutícola regional por especies (Fuente: Adaptado por Arcadis y elaborado por ODEPA a partir de la información del catastro frutícola de la Región Metropolitana, ODEPA-CIREN 2020).

Especie de Frutales	Superficie (ha)
Nogal	16,430.28
Uva de Mesa	6,847.52
Olivo	4,945.64
Palto	4,229.33
Cerezo	3,681.28
Almendro	3,616.96
Limonero	3,302.53
Ciruelo Europeo	2,719.06
Naranja	2,506.36
Nectarín	1,209.39
Otros	5,173.36
Total	54,661.71



Tabla 11. Superficie hortícola regional por especies (Fuente: Adaptado por Arcadis y elaborado por ODEPA con información de la encuesta de superficie hortícola del INE 2020).

Especies Hortícolas	Área (ha)
Maíz	3,439.5
Lechuga	2,316.8
Cebolla (de guarda)	2,138.1
Cebolla (temprana)	1,571.7
Poroto Granado	1,428.0
Zanahoria	1,362.7
Zapallo (Temprano y de Guarda)	1,129.9
Brócoli	1,010.4
Coliflor	954.7
Haba	929.9
Otros	10,059.4
Total	26,341.0

Tabla 12. Superficie regional de cultivos anuales por especies. (Fuente: Adaptado por Arcadis y elaborado por ODEPA con información de la encuesta de cultivos anuales plantados del INE 2020-2021).

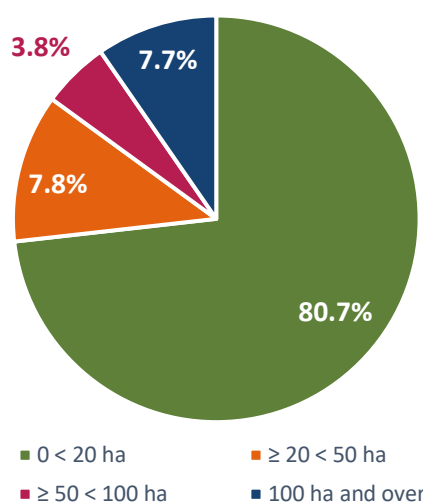
Especies de Cultivos Anuales	Área (ha)
Trigo Harinero	2,075
Maíz (Consumo Humano)	1,841
Avena	1,296
Papa	1,254
Trigo Candeal	1,154
Maíz (Semilla)	634
Maravilla	260
Poroto	72
Cebada (Forrajera)	68
Otros Industriales	26
Total	8,680

c. Región de Valparaíso

La Región de Valparaíso tiene una superficie total de 16.693,1 km² (2,2% del territorio nacional). En su superficie se incluye también el territorio insular, compuesto por las islas de Pascua, Salas y Gómez, San Félix y San Ambrosio, y el archipiélago de Juan Fernández, compuesto por las islas Alejandro Selkirk, Robinson Crusoe y Santa Clara. Presenta un clima templado de tipo mediterráneo, donde las lluvias tienen mayor importancia y regularidad. La mayor parte de las plantaciones de esta región son de menos de 20 hectáreas, que representando el 80,7% del total de las plantaciones de la región, y que equivalen al 4% del total de las tierras de cultivo de la región. Las plantaciones de 100 o más hectáreas representan el 7,7% del total, lo que equivale al 89,7% de la superficie total cultivada. En la

Figura 10 se presentan el resto de los detalles de las plantaciones de 20 a 50 ha, y de 50 a 100 ha, así como el número de plantaciones y las superficies de cada clase de tamaño.

Porcentaje de la Cantidad de Plantaciones en la Región de Valparaíso



Porcentaje de la Superficie de Suelos Agrícolas en la Región de Valparaíso

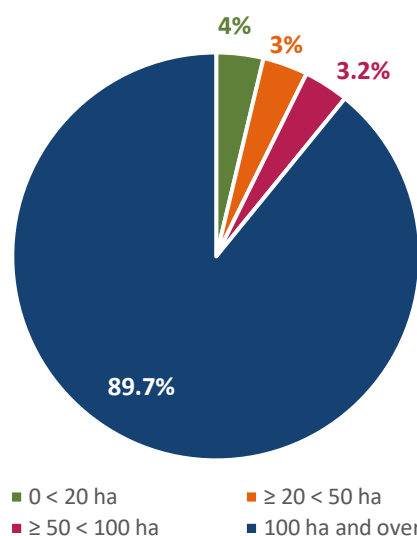


Figura 10. Tamaño de las plantaciones en la Región de Valparaíso (izquierda) y porcentaje del total de tierras de cultivo ocupadas por los diferentes tamaños (derecha). Las grandes plantaciones (menos del 10%), ocupan la gran mayoría de los suelos de cultivo (89,7%). (Fuente; Adaptado de ODEPA, 2021).

Según el Censo Agropecuario y Forestal del año 2007, los principales usos del suelo para la agricultura en la Región de Valparaíso se destinan a plantaciones forestales (37,6%), frutales (34,1%) y forrajeras (10,6%) (INE, 2007). Este censo está en proceso de actualización y se espera que los resultados estén disponibles en agosto de 2022 (INE, 2021). A continuación, se presenta la superficie regional frutícola por especies (Tabla 13), la superficie regional hortícola por especies (Tabla 14) y la superficie regional de cultivos anuales por especies (Tabla 15), estos datos fueron obtenidos de diversas fuentes y presentados por ODEPA.

Tabla 13. Superficie frutícola regional por especies. (Fuente: Adaptado por Arcadis y elaborado por ODEPA a partir de la información del catastro de frutas de la Región de Valparaíso, ODEPA-CIREN 2020.)

Especie de Frutales	Área (ha)
Palto	20,317.80
Uva de Mesa	9,969.77
Nogal	7,003.30
Mandarino	2,321.38
Limonero	2,021.51
Duraznero (Consevero)	1,990.15
Almendro	1,256.94
Naranja	1,186.01
Olivo	820.84
Nectarín	295.41
Otros	1,868.3
Total	49,051.4



Tabla 14. Superficie hortícola regional por especies. (Fuente: Adaptado por Arcadis y elaborado por ODEPA con información de la encuesta de superficie hortícola del INE 2020).

Especies Hortícolas	Área (ha)
Lechuga	1,652.5
Tomate	1,044.5
Poroto Granado	820.2
Maíz	786.2
Zanahoria	708.8
Repollo	537.4
Ajo	302.7
Cebolla (de guarda)	263.9
Cebolla (temprana)	238.8
Apio	228.0
Otros	2,196.0
Total	8,779.0

Tabla 15. Superficie regional de cultivos anuales por especies. (Fuente: Adaptado por Arcadis y elaborado por ODEPA con información de la encuesta de cultivos anuales plantados del INE 2021).

Especies de Cultivos Anuales	Área (ha)
Cebada (Forrajera)	3,512
Papa	608
Trigo Harinero	292
Maíz (Consumo Humano)	211
Trigo Candeal	87
Poroto	14
Total	4,724

d. Salinidad

Salinidad del agua

Como se ha mencionado anteriormente, los agricultores utilizan principalmente el agua del río para el riego. El caudal de los ríos, como se indica para el Río Maipo, presenta fluctuaciones estacionales y esto puede influir no sólo en la cantidad del agua, sino también en la calidad. La conductividad eléctrica del Río Maipo fluctúa entre 800 y 1.300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con valores extremos entre 500 y 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, registrándose las mayores salinidades en el origen del río y en el final del mismo (Arrau, 2015; Comisión Nacional de Riego, 1984). Peña-Guerrero *et al.* (2020) evaluaron los impactos de la sequía en la calidad del agua del Río Maipo en el período 1985-2015. De la investigación se concluyó que variables como la conductividad eléctrica, el SO_4 y el cloruro mostraron un comportamiento exponencial mientras el caudal disminuía, y alcanzando sus concentraciones medias máximas durante los períodos de sequía hidrológica. La mayoría de estas concentraciones máximas se alcanzaron en los últimos periodos de caudales extremadamente bajos (2010-2015), estos resultados se recogen en la Tabla 16. En cuanto a la salinidad del Río Aconcagua, un río principal de la Región Metropolitana, un estudio del CENMA (2008) midió la conductividad eléctrica en las aguas superficiales del río, y presentó valores que usualmente no superan los 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (0,6 dS/m), con la medición más alta de 806 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Por lo tanto, este río parece ser menos salino que el Río Maipo.



Tabla 16. Concentraciones mínimas, máximas y medias de la conductividad eléctrica (CE) y de cloruro medidas en tres estaciones hidrológicas distintas de la cuenca del Río Maipo, en el período 1985-2015 (adaptado de Peña-Guerrero et al. (2020)).

Subcuenca	CE (en dS/m)			Cloruro (en mg/L)		
	min	máx	media	min	Máx	media
Maipo Medio	0.83	1.51	1.27	85	202	137
Mapocho	1.15	2.21	1.66	101	324	211
Maipo Bajo	1.31	2.18	1.71	143	292	204

En general, la geoquímica de la geología del lecho rocoso en el Río Maipo está dominada por evaporitas aflorantes que se asocian con un alto nivel de SO_4^{2-} en el agua y la corriente de agua se caracteriza además por altas concentraciones de Ca, Cl, K y Na, con un rango de pH de 7 a 8,5 (Peña-Guerrero et al., 2020). En este sentido, el elevado nivel de la CE puede ser causado por el aumento de las concentraciones de Na, pero también de Ca, Mg y K, ya que estos cuatro cationes combinados son responsables de los niveles de CE observados en la mayoría de los casos.

Salinidad del suelo

Recientemente, la FAO (Global Soil Partnership) ha lanzado el Mapa Global de Suelos Afectados por la Sal (GSASmap, ver <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/global-map-of-salt-affected-soils/en/>). Aunque Chile aún no ha subido los resultados, basándose en los resultados de los países vecinos, se pueden observar algunas tendencias, como se indica en los mapas que figuran a continuación. En la base de datos GSAS se distingue entre la salinidad de la capa superior del suelo (0-30 cm) y la del subsuelo (30-100 cm), y ambas se presentan a continuación. Mientras que la capa superior del suelo presenta concentraciones de salinidad algo limitadas (en el rango de 2-4 dS/m, Figura 11), es especialmente el subsuelo (30-100 cm) el que muestra altas concentraciones de sal en una amplia zona (Figura 11, derecha). En la Figura 12, se presenta una imagen más detallada del área alrededor de la Región de Valparaíso y de la Región Metropolitana. Basándose en esta figura, parece que los niveles de salinidad elevados se encuentran al este de la Región de Valparaíso y la Región Metropolitana, en las tierras/montañas elevadas. Esta podría ser la fuente de salinidad que se encuentra en las aguas de río que bajan por las montañas, y que posiblemente se acumule en el suelo en cierta medida en la zona de los ríos aguas abajo. Sin embargo, se aconseja tener precaución al extrapolar ampliamente, ya que los Andes se encuentran entre Argentina y Chile y forman una formidable barrera geográfica.

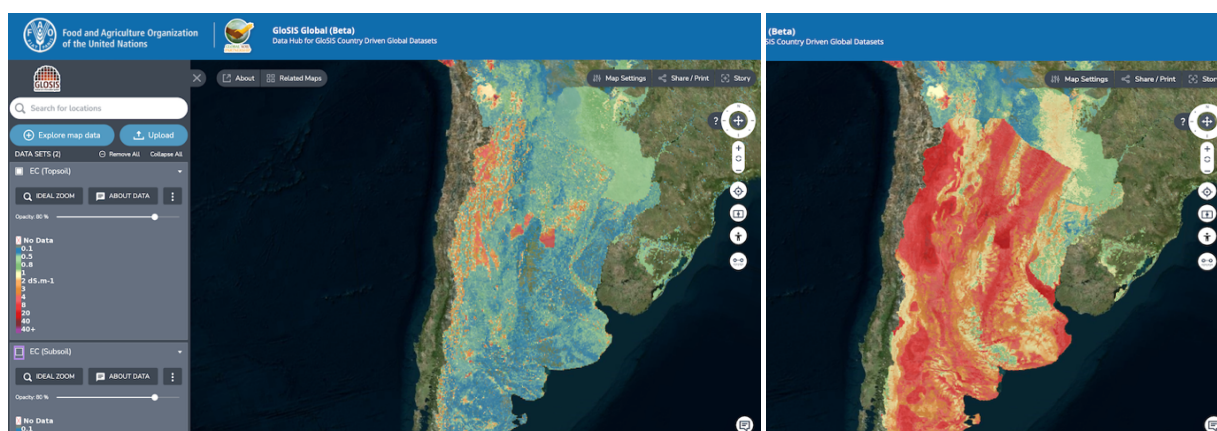


Figura 11. Salinidad del suelo de la capa superior (0-30 cm) (imagen de la izquierda), y salinidad del suelo del subsuelo (30-100 cm), de una parte de América del Sur, según lo disponible en GSASmap (FAO, 2021). El color naranja indica un nivel de salinidad del suelo en el rango de 2-4 dS/m (CEe), mientras que el color rojo indica niveles de salinidad de hasta 20 dS/m.

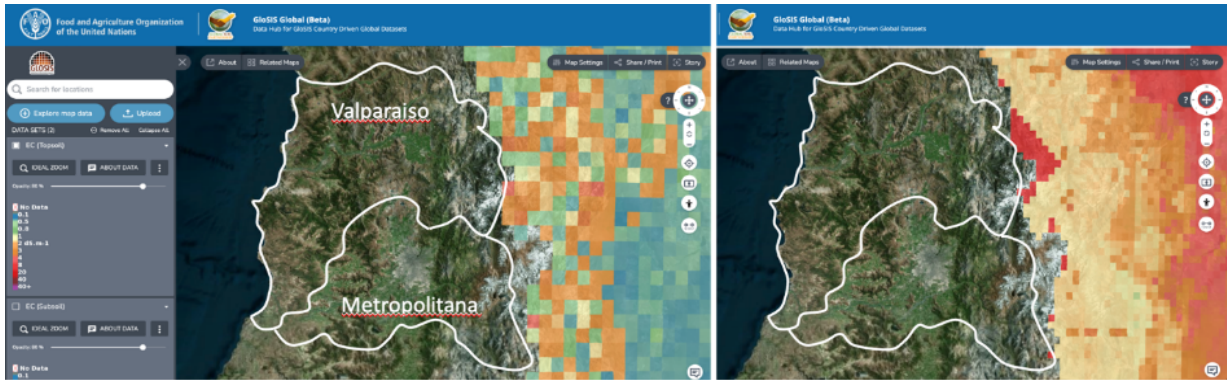


Figura 12. Salinidad del suelo de la capa superior (0-30 cm) (imagen de la izquierda) y salinidad del suelo del subsuelo (30-100 cm), para las áreas de interés (Región de Valparaíso y Región Metropolitana), según lo disponible en GSASmap (FAO, 2021). No se dispone de datos directos sobre la salinidad del suelo, pero en base a este mapa del GSAS parece que los terrenos elevados del este de ambas zonas están efectivamente afectados por la sal. Sin embargo, se aconseja tener cuidado al extrapolar ampliamente, ya que los Andes se encuentran entre Argentina y Chile y forman una formidable barrera geográfica.

Un estudio más detallado sobre los aspectos de la salinidad en Chile fue elaborado por Casanova *et al.* (2013), donde se afirma que alrededor de 759.000 km² en Chile están afectados por la salinidad y otros 33.000 km² por la sodicidad. Se trata principalmente de zonas en el árido norte de Chile y de costras de sal fósil en el oeste del extremadamente árido Valle Central. Entre otras, las sales también se acumulan en el área norte semiárida de la zona mediterránea, debido a la insuficiencia de las precipitaciones (<500 mm al año) para eliminar las sales de la capa superior del suelo. En general, las zonas afectadas por las sales se encuentran en su mayoría en las áreas extremadamente áridas a semiáridas, aunque al norte de la zona mediterránea hay algunos focos de suelos moderadamente salinos a fuertes que surgen del confinamiento, creado por una barrera física al flujo de agua fuera de una depresión en el paisaje (Casanova *et al.* (2013)). En la Figura 13 y la Tabla 17 se presenta la conductividad eléctrica del suelo de la capa superior (0-20 cm) en la zona hiperárida, semiárida y mediterránea. Basándose en la Tabla 17, la mayoría de los suelos de las diferentes zonas climáticas pueden clasificarse como no salinos, aunque el 31% de los suelos de la zona hiperárida y semiárida pueden clasificarse como muy ligeramente salinos hasta fuertemente salinos. En la zona mediterránea, alrededor del 16% de los suelos están afectados por la sal en alguna medida.

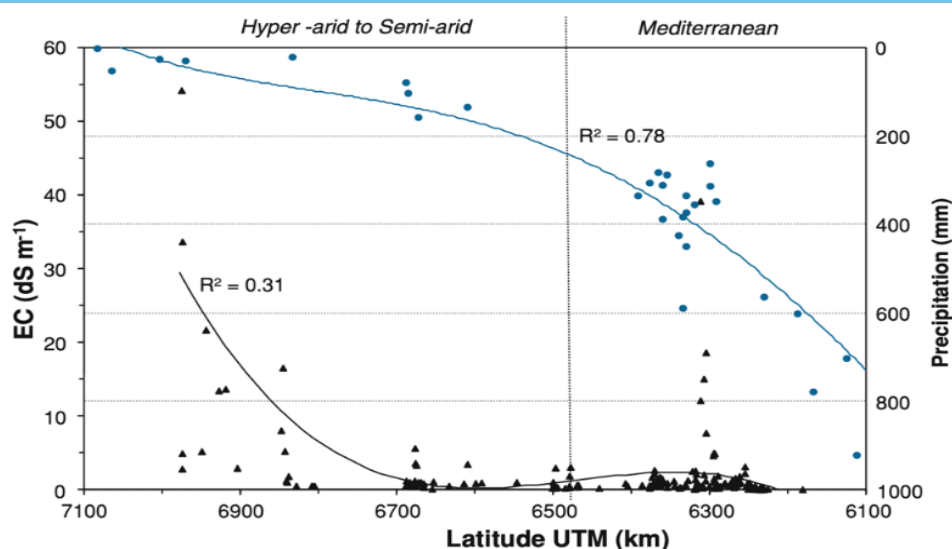


Figura 13. Conductividad eléctrica del suelo 0-20 cm de profundidad entre la zona hiperárida a semiárida y la zona mediterránea. Los triángulos son la CE en muestras de suelo (N=173) y los círculos son la precipitación media anual obtenida de 30 estaciones meteorológicas (Casanova *et al.* 2013).

Tabla 17. Rango de conductividad eléctrica (CE) del suelo a 0-20 cm de profundidad en la zona hiperárida y semiárida (n=68 muestras) y en la parte norte de la zona mediterránea (n= 105 muestras) (Casanova et al. 2013).

Class	EC (ds m - 1)	Hyper-arid to Semi-arid zone (%)	Northern Mediterranean zone (%)
Non-saline	0-2	69	85
Very slightly saline	2-4	12	8
Slightly saline	4-8	6	4
Moderately saline	8-16	4	3
Strongly saline	>16	9	1

e. Información adicional

ODEPA es la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, en su página web es posible encontrar información y estadísticas separadas por regiones. Tienen información en línea sobre precios, costos por hectáreas de cultivos por región, información censal, hectáreas de producción, y otros en su sitio web: <https://www.odepa.gob.cl/>. Otra buena fuente de información es el Censo Agropecuario del Instituto Nacional de Estadísticas de Chile (INE), el último censo disponible es del año 2007, pero se está actualizando ahora. Los resultados deberían estar disponibles en agosto de 2022 en su página web: <https://www.ine.cl/censoagropecuario>.



6. VISITAS A TERRENO Y ENTREVISTAS

a. Agricultores

Dos agricultores respondieron al cuestionario enviado, Helmut Engländer, productor de nogales (plantación de 47 hectáreas) de la Región Metropolitana, y Jaime Cruz, productor de paltos (plantación de 213 hectáreas) de la Región de Valparaíso. Ambos aceptaron una visita al lugar y permitieron a Arcadis coleccionar muestras de suelo y agua. La ubicación de cada una de las plantaciones encuestadas se presenta en la Figura 14.

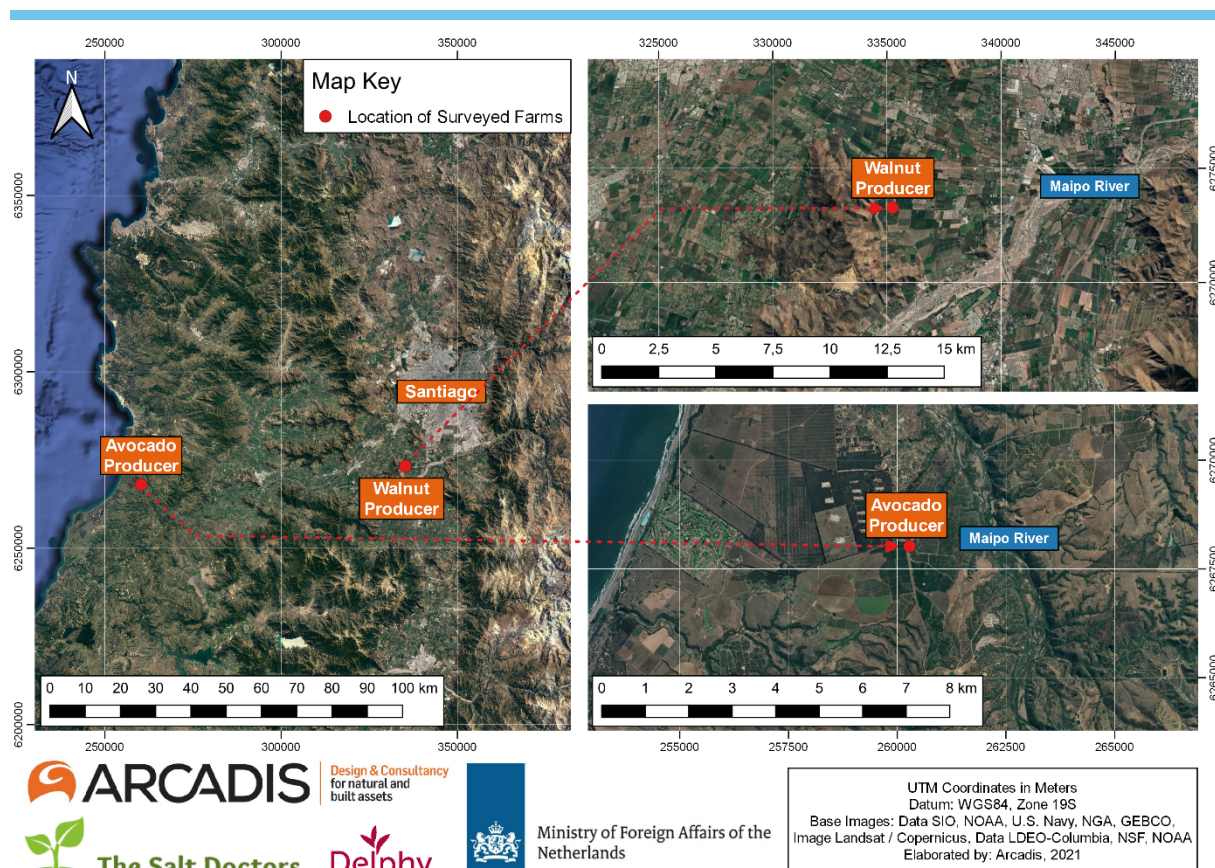


Figura 14. Ubicación de las plantaciones visitadas.

De la información registrada en las visitas a terreno, las entrevistas y los cuestionarios, se observó que ambos productores consideran que tienen algún nivel de problema de salinidad. Ambos reciben agua del Río Maipo como fuente de riego, el productor de nogales se ubicaba más cerca de la Cordillera de los Andes en la Región Metropolitana, y el productor de paltos se ubicaba al final del río, cerca de la costa, en la Región de Valparaíso. A continuación, se describen algunos detalles técnicos de las plantaciones y datos sobre los cultivos, el suelo y el agua. Los resultados de la discusión con los agricultores se exponen en el siguiente capítulo sobre los cuestionarios.

Se tomaron muestras de agua de riego y de suelo en ambos lugares. En la Tabla 18 se presentan algunos aspectos generales y los macronutrientes del agua de riego de ambas plantaciones. En la Tabla 19 se observan los micronutrientes y algunas otras variables relevantes de las mismas muestras. Finalmente, la Tabla 20 presentan algunos cálculos basados en los cuatro cationes principales en las muestras de agua de riego, la Ración de Absorción de Sodio (SAR) y la Ración de Cationes de la

Estabilidad Estructural del Suelo (CROSS). El primer valor es un indicador de la dominancia relativa del Na en comparación con los demás cationes, lo que proporciona una indicación de los problemas estructurales del suelo cuando éste se riega con agua salina. El valor CROSS incorpora las concentraciones de todos los cationes, lo cual es importante ya que tanto el Na⁺ como el K⁺ son cationes monovalentes y, por tanto, tienden a dispersar los suelos arcillosos, mientras que el Ca²⁺ y el Mg²⁺ son cationes divalentes que tienen un efecto de floculación en los suelos arcillosos (Rengasamy y Marchuk, 2011). Tanto el SAR como el CROSS pueden utilizarse como indicación de los posibles problemas de la estructura del suelo cuando se usa esta agua como fuente de riego. Los valores de SAR y CROSS en esos dos lugares no indican el riesgo de afectar negativamente a la estructura del suelo. Además, los elevados valores de CE del agua (como puede verse en la Tabla 18) están causados principalmente por el calcio (Ca), seguido del sodio (Na) (como puede verse en la Tabla 20).

Tabla 18. Características generales del agua de riego y macronutrientes de las dos plantaciones visitadas.

	Unidad				
	dS/m		mg/L	mg/L	mg/L
Plantación	CE	pH	Nitrato	Fósforo	Potasio
Nogal	1,19	7,8	14,5	< 0,005	4,50
Palto	1,70	7,8	42,28	0,39	9,24

Tabla 19. Otros elementos del agua de riego y metales pesados de las dos plantaciones visitadas.

	Unidad					
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Plantación	Cloruro	Sulfato	Boro	Calcio	Cobre	Hierro
Nogal	157,7	351,2	0,16	139,8	0,008	2,48
Palto	235,7	347,9	0,19	187,1	0,006	0,46
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg CaCO3/L	mg CaCO3/L
Plantación	Magenesio	Manganeso	Sodio	Zinc	Bicarbonato	Carbonato
Nogal	13,2	0,081	86,3	0,018	77	< 1
Palto	38,4	0,0381	119,3	0,009	160	< 1

Tabla 20. Concentraciones (en meq/L) de los cuatro cationes principales en las dos plantaciones visitadas. También se indican los valores de CE (en dS/m), SAR y CROSS, véase el texto principal para más explicaciones.

Plantación	Cl	Na	Ca	Mg	K	EC	SAR	CROSS
Nogal	4,45	3,75	6,97	1,08	0,12	1,2	1,87	1,95
Palto	6,65	5,19	9,34	3,16	0,24	1,7	2,07	2,24

En la plantación de Jaime Cruz (paltos), se disponía de análisis de laboratorio de años anteriores. Lo que permitió observar si se han producido cambios en esos años.



En la Tabla 21 se observan algunos parámetros relevantes junto a los macroelementos presentes en el agua de riego entre el año 2016 y el año 2021. En la Tabla 22 se presentan las concentraciones de algunos microelementos y algunos metales pesados.

Tabla 21. Características generales del agua junto a los macroelementos desde el año 2016 hasta el año 2019 en la plantación de palto visitada.

		Unidades						
		dS/m	CaCO3	%	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Fecha	pH	CE	Dureza	Sodio	N (Amonio)	N (Nitrato)	Fósforo	Potasio
08-09-2016	7,9	1,3	455	32,7	2	6,9	0,23	6
16-08-2018	7,4	1,8	640	28,9	1,3	15	0,6	9
27-09-2019	6,5	1,8	670	25,3	2	6,9	0,7	8
07-05-2020	7,7	1,9	660	26,7	1,4	8,5	0,07	9
03-09-2021	7,5	1,9	695	26,9	1	11,2	0,13	9

Tabla 22. Microelementos y metales pesados del año 2016 al año 2021.

	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Fecha	Calcio	Magnesio	Sodio	Cloruro	Sulfato	Bicarbonato	Arsenico
08-09-2016	138	27	104	188	245	171	0,01
16-08-2018	202	33	122	238	365	195	< 0,01
27-09-2019	196	44	106	227	379	238	
07-05-2020	198	40	113	241	413	201	
03-09-2021	216	38	120	238	384	201	
Fecha	Cadmio	Cobre	Hierro	Manganeso	Plomo	Cinc	Boro
08-09-2016	< 0,01	0,02	0,13	0,05	< 0,01	0,01	0,17
16-08-2018	< 0,01	0,01	0,08	0,02	< 0,01	0,03	0,28
27-09-2019		0,02	0,03	0,11		0,02	0,73
07-05-2020		< 0,01	0,04	0,01		0,01	0,41

Además de las muestras de agua, también se tomaron muestras de suelo en ambas plantaciones a dos profundidades diferentes. En la Tabla 23 se presentan los resultados de los análisis de laboratorio de todos los macro y microelementos, además de otras características relevantes del suelo.



Tabla 23. Algunas características del suelo y las concentraciones de (algunos de) los macro y microelementos (concentraciones totales) en el suelo a dos profundidades de las dos plantaciones visitadas.

Plantación y profundidad	Unidades								
	dS/m	dS/m	Meq/L	%		mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
	CE 1:5	CEe calculada*	CEC**	Materia orgánica	pH	Nitrato	Fósforo	Potasio	Sulfato
Nogal 0 – 40cm	0,18	1,23	18,6	35,5	8,3	15,0	1227	1928	452,1
Nogal 40 – 80cm	0,10	0,70	18,0	2,9	8,5	4,9	955	1400	166,9
Palto 0 – 40cm	0,18	1,28	21,0	4,6	6,1	< 4,3	565	875	439,8
Palto 40 – 80cm	0,20	1,40	16,2	5,8	6	51,1	546	690	376,3

* Factor de calibración asumido de 7 (so, ECe= EC1:5 * 7)

** CEC= Capacidad de intercambio catiónico del suelo

Tabla 23 continued.

Plantación y profundidad	Unidades								
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
	Boro	Calcio	Magnesio	Sodio	Cloruro	Hierro	Manganeso	Cobre	Cinc
Nogal 0 – 40cm	<25	20515	8330	567	109	27738	723	56,4	105
Nogal 40 – 80cm	<25	8016	7276	442	36	27234	676	45,6	74
Palto 0 – 40cm	<25	2741	2634	86,8	86	61739	1039	25,9	173
Palto 40 – 80cm	<25	2567	2538	38,6	54	62828	1145	26,3	147



Conclusiones de los análisis del agua y del suelo

A pesar de que se visitaron dos plantaciones para muestrear el suelo y el agua para este informe, nos permite tener una buena visión de la calidad del suelo y del agua a lo largo del Río Maipo, el río del que ambas plantaciones obtienen su agua de riego. Parece que hay menos información sobre los niveles de salinidad del Río Aconcagua, pero los niveles máximos de salinidad parecen ser considerablemente menores, con niveles máximos de salinidad reportados en el rango de 0,6-0,8 dS/m.

La CE del agua de riego está en torno a los valores que esperábamos en base a la revisión bibliográfica, con una CE de 1,2 y 1,7 dS/m para las plantaciones de nogales y paltos, respectivamente (Tabla 18). En la plantación de paltos, donde disponemos de la serie temporal de la CE del agua de riego (Tabla 21), podemos ver que fluctúa entre 1,3 y 1,9 dS/m, con el valor de 1,3 dS/m sólo en 2016. Esto también coincide con los resultados presentados en la Tabla 16, donde los resultados a largo plazo (1985-2015) de los niveles de salinidad del Río Maipo muestran que los valores medios de CE son de 1,7 dS/m en diferentes partes del río. Los valores máximos (2,2 dS/m) se han reportado durante los últimos años (vinculados a la sequía). El umbral de salinidad a partir del cual el agua se clasifica generalmente como moderadamente salina es de 1,5 a 3 dS/m. Estos niveles pueden afectar a los cultivos sensibles a la sal y requieren prácticas de gestión cuidadosas. En la Tabla 24 se presenta un resumen del análisis del agua y del suelo de las dos plantaciones. Basándose en el análisis del agua, parece que la plantación de paltos mayores problemas de salinidad que la de nogales, sin embargo, según el análisis del suelo parece ser al revés, aunque también hay que hacer algunas observaciones. En primer lugar, la CE general de las muestras de suelo parece ser relativamente baja, en comparación con los niveles de salinidad del agua de riego. Como se ha dicho, en general se suele utilizar un factor de 1,5 para "calcular" la CE del suelo. En el caso de las dos plantaciones esto implicaría que la salinidad del suelo debería ser de 1,8 y 2,6 dS/m (asumiendo los niveles de salinidad de 1,2 y 1,7 dS/m) para las plantaciones de nogales y paltos, respectivamente. Por lo tanto, los valores de CE del suelo reportados parecen ser más bajos de lo esperado, especialmente para la plantación de paltos. Las muestras de suelo representan el estado del suelo en el momento del muestreo, por supuesto, por lo que podría ser posible que un muestreo y análisis del suelo más frecuente diera un resultado diferente. Además, la CEe tuvo que ser calculada ya que los resultados del laboratorio proporcionaron los resultados de un método 1:5 (1 parte de suelo mezclado con 5 partes de agua). Basándonos en diversa literatura y en la experiencia de TSD se utilizó un factor 7 para calcular la CEe, pero es aconsejable determinar también el factor de calibración exacto analizando también el extracto de la pasta saturada del propio suelo. Observando las concentraciones de cloruro y sodio en el suelo, las concentraciones son mayores en la plantación de nogales, especialmente en el caso del sodio. Esto puede estar relacionado con la alta concentración de materia orgánica en la capa superior del suelo en las plantaciones de nogales, que puede ligar el sodio y aumentar las concentraciones totales de sodio en la capa superior del suelo. Sin embargo, basándose en la Figura 8, se aprecia que el suelo de la plantación de paltos tiene un alto contenido de arcilla que también tiene la capacidad de fijar el sodio. Otros minerales en las plantaciones de nogales también presentan altas concentraciones (magnesio, potasio), lo que puede ser una indicación de que estas altas concentraciones pueden ser causadas también por las aplicaciones de fertilizantes.

Tabla 24. Resumen de los análisis de agua y suelo de las dos plantaciones visitadas.

Fuente	Ubicación	pH	CE1	Cloruro	Sodio	Calcio	Magnesio	Potasio	Boro
Agua	Plantación de Nogales	7,8	1,2	158	86	140	13	4,5	0,16
Agua	Plantación de Paltos	7,8	1,7	236	119	187	38	9,2	0,19
				en mg/kg	en mg/kg	en mg/kg	en mg/kg	en mg/kg	en mg/kg
Suelo	Plantación de Nogales	8,3	1,2	109	567	20.515	8.330	1.928	<25
Suelo	Plantación de Paltos	6,1	1,3	86	87	2.741	2.634	875	<25

¹CE¹ Cdel suelo según la CE calculada en la Tabla 23



Observando las altas concentraciones de varios minerales, incluyendo el calcio, en la plantación de nogales, no es posible excluir la posibilidad de que estas tengan una causa natural (ligada al propio suelo (origen)). El pH de ambos lugares es también un punto de atención, con el alto pH de la plantación de nogales, potencialmente causante de deficiencias de micronutrientes, y un pH relativamente bajo para la plantación de palto, lo que generaría menos problemas que un alto pH. Basándose únicamente en las concentraciones totales de los distintos elementos es difícil llegar a conclusiones firmes, por lo que se recomienda analizar las muestras de suelo con más frecuencia, centrarse también en las fracciones disponibles de los minerales y comparar los diferentes laboratorios que operan en Chile.

El palto, el nogal y la vid se consideran sensibles al Boro, y las concentraciones de Boro no deben exceder los 0,5-0,75 mg/L en el extracto de saturación del suelo (Ayers y Westcot, 1985). Las concentraciones de Boro reportadas son de 0,16-0,19 mg/L para el agua de riego y para ambas localidades las concentraciones de Boro en el suelo fueron reportadas como <25 mg/kg. En este sentido, parece probable que el Boro no esté causando los efectos negativos en el desarrollo foliar.

b. Plantación de nogales

El productor de nogales presentó algunas manchas más secas en los árboles en algunas zonas, también mostró al personal de Arcadis lo que él creía que era un problema de salinidad, como se ve en la

Figura 15 (imágenes superiores). Las hojas dañadas de la plantación de nogales visitada que se observan en la



Figura 15 no eran fáciles de encontrar y no se observaban en el resto del árbol o en los árboles cercanos, también parecían estar causadas por algún patógeno (posiblemente *Gnomonia leptostyla*, aunque es necesario seguir investigando y tomando muestras para determinarlo). En la misma figura (imágenes inferiores) se presentan imágenes de daños por salinidad en nogales, las cuales difieren de las observadas durante la visita a terreno (imágenes superiores). El productor de nogales no realizó ni tuvo conocimiento de la concentración de salinidad ni de la CE en el agua utilizada para el riego. El personal de Arcadis que visitó las plantaciones midió la CE en el agua utilizada para el riego, registrando 1,2 dS/m. Según los diferentes niveles de toxicidad para diferentes valores de CE identificados por Ibacache (2008), presentados en la Tabla 3, y el valor registrado en terreno, esta concentración podría causar algunas restricciones de crecimiento, sin esperar muchos efectos negativos. Lo mismo parece ocurrir para los niveles de salinidad medidos en el suelo, aunque estos muestran un nivel de sodio algo elevado, el nivel general de CE del suelo debería estar por debajo de los niveles máximos de salinidad reportados para el umbral del nogal. Teniendo en cuenta la información recopilada y lo observado en la visita a terreno y en el cuestionario, no es posible concluir si este productor de nogales está afectado significativamente por un problema de salinidad, aunque, cabe destacar que el productor aplica una fracción de lixiviación cuando riega para reducir los niveles de salinidad en la capa superficial del suelo. Además, dejó de fertilizar con abonos minerales nitrogenados, sustituyéndolos con productos de origen vegetal. El pH del suelo registrado fue de 8,3 para la capa superior del suelo y de 8,5 para el subsuelo, lo cual es un valor relativamente alto. A estos valores de pH, varios oligoelementos serán difíciles de absorber y cabe esperar que se produzcan deficiencias. Sin embargo, dado el valor relativamente bajo de CE y SAR del agua de riego, en combinación con las altas concentraciones de materia orgánica, no se esperan problemas con la estructura del suelo en un futuro (próximo). En resumen, los niveles de salinidad del agua y del suelo registrados deberían estar por debajo del umbral del nivel de tolerancia del nogal, aun así, es necesario un manejo cuidadoso del suelo y del agua para evitar la acumulación de sales (en el futuro).



Figura 15. Hojas dañadas (arriba a la izquierda, ampliadas en la imagen superior-media) y hojas de aspecto sano (arriba a la derecha) en un nogal de un productor de nogales de la región Metropolitana de Chile. En la imagen inferior izquierda se aprecia el daño foliar general causado por el cloruro en el nogal, y en la imagen inferior derecha se aprecia el daño foliar causado por la "salinidad" (fuente: Ibacache, 2008). Así pues, las tres imágenes superiores fueron tomadas en la plantación de nogales visitada y las dos inferiores muestran el daño foliar general causado por el cloruro/salinidad, pero esto no se observó en la plantación visitada.

c. Plantación de Paltos

Esta plantación se encuentra al final del Río Maipo, cerca de la costa. La CE medida en el agua utilizada para el riego fue de 1,7 dS/m, lo que coincidió con lo indicado por el productor en el cuestionario, donde indicó que la CE del agua que utiliza para el riego fluctúa durante el año entre 1,6 a 2,0 dS/m. Este agricultor proporcionó varios análisis de laboratorio de su agua de riego, entre los años 2016 y 2021. En la Tabla 25 se presentan los valores de CE, pH y los cuatro cationes principales en el agua de riego. Se observa que la CE fue más baja el año 2016, lo que posiblemente podría ser un reflejo de la mega sequía de los últimos seis a siete años.



Tabla 25. Evolución de diversos parámetros del agua de riego entre 2016 y 2021 en la plantación de paltos.

Fecha de muestreo	Unidades						
	(dS/m)		(%)	(Meq/L)			
	EC	pH	Na ⁺ / ESP	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
08-09-2016	1,3	7,9	32,7	4,5	6,9	2,2	0,15
16-08-2018	1,8	7,4	28,9	5,3	10,1	2,7	0,22
27-09-2019	1,8	6,5	25,3	4,6	9,8	3,6	0,21
07-05-2020	1,9	7,7	26,7	4,9	9,9	3,3	0,22
03-09-2021	1,9	7,5	26,9	5,2	10,8	3,1	0,23

Se observó una importante cantidad de daños en las hojas en la plantación del productor de paltos. El tipo de quemadura observada (Figura 2) parece ser causada por el exceso de cloruro, como se aprecia en la Figura 16. El estudio de Ayers (1977), evidencia la sensibilidad del palto a la salinidad, donde se registraron pérdidas entre 10 a 25 % en paltos regados con agua con una CE entre 1,2 y 1,7 dS/m (Tabla 4), lo que podría ser una de las razones que explican que el productor tenga un 20% menos de rendimiento del cultivo (8 ton/ha) en comparación con el rendimiento promedio del cultivo en la región (10 ton/ha), como se indica en el Censo Frutícola de la Región de Valparaíso para el año 2020, realizado por CIREN y ODEPA. Los niveles de salinidad reportados (valores de CE y concentraciones de cloruro, especialmente del agua de riego) están cerca o por encima de los niveles máximos de salinidad que el palto puede tolerar sin pérdida de rendimiento o daño foliar. Basándose en el estudio de Ayers (1977), la reducción del rendimiento debería estar en torno al 25% cuando la CE del agua de riego es de 1,7 dS/m, como es el caso de la plantación visitada. Pero este nivel máximo de salinidad también depende del cultivar o del portainjerto que se utilice. Ayers y Westcot (1985, ver Tabla 5) concluyeron que el portainjerto Antillano es el más tolerante a la sal, tolerando hasta 5,0 meq/L de cloruro en el agua de riego (en comparación con los portainjertos Mexicano y Guatemalteco que toleran 3,3 y 4,0 meq/L de cloruro, respectivamente). Castro *et al.* (2015) informaron de resultados similares, con un portainjerto Antillano (llamado UCV7) que mostró el mejor potencial para el cultivo en condiciones salinas. Como se puede observar en la Tabla 20, la concentración de cloruro (en meq/L) del agua de riego de la plantación de paltos fue de 6,65, por lo que sigue estando por encima del nivel de tolerancia reportado por Ayers y Westcot (1985). Celis *et al.* (2018) evaluaron la tolerancia a la sal de 13 portainjertos de pato y concluyeron que existen diferencias en la tolerancia a la sal entre las distintas variedades. En esta investigación, la mayor concentración de salinidad fue de 1,5 dS/m (ECw), lo que dio lugar a una ECe del suelo de 3-6 dS/m durante los 3 años en los que se realizó el seguimiento del terreno. El rendimiento y el crecimiento se correlacionaron mejor con las concentraciones de cloruro en la hoja, indicando que el daño por sal en el palto se debió principalmente resultado de la toxicidad por iones cloruro. También hay que señalar que en esta investigación ninguno de los portainjertos se comportó satisfactoriamente cuando se regó con agua con una CE de 1,5 dS/m.

El productor de la plantación de paltos visitada se encuentra en proceso de cambio a portainjertos Antillanos. La mayor tolerancia a la salinidad se ha demostrado por una mayor biomasa bajo y sobre el suelo, una menor acumulación de sodio y cloruro y un área de la hoja relativamente baja dañada por un tratamiento de alta salinidad (Castro *et al.*, 2015). El productor también indicó que el menor rendimiento de su cultivo podría deberse adicionalmente, a malas prácticas no especificadas en el pasado que está intentando solucionar.

En Australia, la recomendación oficial es utilizar agua de riego que no contenga más de 0,6 dS/m, con 80 mg/L de cloruro como máximo (Gobierno de Queensland, 2018). Las diversas publicaciones mencionadas anteriormente, todas muestran que la tolerancia está estrechamente vinculada a la capacidad de un portainjerto específico para evitar el transporte de sodio y cloruro a las hojas.

Hay que tener en cuenta que el exceso de cloruro y de sodio puede tener diferentes causas:

- Agua de riego salina



- Suelos mal drenados, lo que provoca la acumulación de sales en la zona de las raíces
- El riego insuficiente (sin lixiviación) también puede provocar la acumulación de sales
- Aplicación excesiva de abonos y fertilizantes que contienen sodio y/o cloruro
- Una combinación de lo anterior



Fig. 4 Increasing degrees of tip and margin necrosis due to chlorine excess. Normal leaf, left.

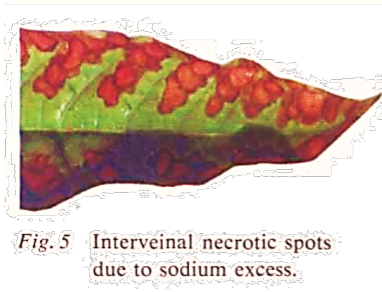


Fig. 5 Interveinal necrotic spots due to sodium excess.

Figura 16. Patrones típicos de quemaduras en las hojas del palto causadas por un exceso de cloruro (imagen superior, "Fig 4") y por un exceso de sodio (imagen inferior, "Fig 5") (fuente: Lahav y Kadman, 1980).

7. RESULTADOS DE LAS ENTREVISTAS CON LAS PARTES INTERESADAS Y LOS AGRICULTORES

Se recibieron dos cuestionarios de *stakeholders*, divididos en diferentes temas. A continuación, se resumen sus respuestas siguiendo los temas del cuestionario. Las respuestas para los temas que formasen parte de los cuestionarios de los agricultores también se incluyeron en este apartado.

a. Preguntas generales

Se habló con Ernesto Cortes (ECo) de la Universidad Católica del Norte y con Francisco Meza Alvarez (FA) del INIA. ECo trabaja principalmente en una zona fuera de nuestra área focal, pero ambos entrevistados están bien informados sobre los temas. También se ha añadido la información pertinente de ambos agricultores Jaime Cruz (palto, JC) y Helmut Engländer (nogal, HE).

Tanto los científicos entrevistados como los agricultores conocen varios problemas relacionados con la salinidad en nuestras regiones focales y más allá. Por ejemplo, FA mencionó que, al norte de Santiago, en la región de Lampa y Noviciado, hay suelos salinos debido al mal drenaje. Ambos agricultores obtienen su agua de riego del Río Maipo, que también está afectado por la salinidad durante todo el año y afecta negativamente a sus rendimientos (JC, HE). Asimismo, en las regiones costeras como Santo Domingo, Mallea y Longotoma, existen diferentes niveles de salinidad de los suelos y de las aguas de riego. Allí, los problemas se deben principalmente al mal drenaje, y se agravan en los años secos y en las épocas de sequía dentro de los años. ECo está de acuerdo con esto, y actualmente está trabajando en la recarga artificial de una cuenca en la captación del Río Elqui en la región de Coquimbo, llamada Pan de Azúcar, donde los valores de CE están alrededor de 1 dS/m en algunas zonas y entre 4-5 dS/m en otras partes (ver Tabla 26).

Tabla 26. Niveles de salinidad de diferentes zonas de la cuenca de Pan de Azúcar. Todos los niveles de CE indican que el agua se encuentra afectada por sal (cortesía de Ernesto Cortés).

Criterio- subcriterio/ Campañas	Pan de Azúcar 13-11-18	Pan de Azúcar 26-04-19	Elqui Bajo 15-11-18	Elqui Bajo 24-04-19
Homogeneidad Piper- Hill	4	2	1	1
Homogeneidad Stiff	4	3	2	3
Grado homogeneidad	4	2.5	1.5	2
Estado homogeneidad	Muy alto	Medio-Alto	Bajo-Medio	Medio
CE	3.2	3.1	2.4	2.4
Dureza	4	4	4	4
Grado de salinidad	3.6	3.6	3.2	3.2
Estado de salinidad	Alto-Muy Alto	Alto-Muy Alto	Alto	Alto
Grado de salinización	3.8	3.1	2.4	2.6
Estado salinización	Muy Alto	Alto	Medio-Alto	Medio-Alto

Este acuífero se utiliza tanto para el agua potable como para el riego. Es en estos dos sectores, el del agua de riego y el del agua potable, donde más se nota la disminución de la disponibilidad y la creciente salinización de las aguas superficiales y subterráneas. Ya se ha observado que esta salinización creciente ha llevado a los agricultores a adaptarse eligiendo cultivares más tolerantes a la sal (FA, JC), pero en algunos casos también ha llevado a los agricultores a cambiar sus cultivos, por ejemplo, de lechugas a plantaciones de olivos (ECo). La disminución de la disponibilidad de agua está afectando a los agricultores al restringir la cantidad de agua que tienen para el riego y para poder lixiviar las sales de la zona de las raíces (FA).



Una de las respuestas a la disminución de la disponibilidad de agua dulce es la desalinización de las aguas subterráneas, y otra es tapar los canales de riego como hacen en California (HE). También menciona el uso de productos que desplazan las sales y que mejoran la humedad del suelo.

Cuando se les pregunta por la disponibilidad de mapas de salinidad del suelo o del agua, ambos entrevistados indican que hay información, pero dispersa. No hay un organismo centralizado que tenga una buena visión de los problemas de salinidad. Sin embargo, es evidente que hay problemas en torno a este tema, y también en torno a la disponibilidad de agua, ya que Chile se ve afectada actualmente por una megasequía, donde las precipitaciones han sido inferiores a la media durante siete años consecutivos.

b. Agricultura

Este apartado se centra en las respuestas de los dos científicos entrevistados, donde ambos coinciden en que los rendimientos están disminuyendo como consecuencia de los problemas de salinidad y la falta de agua dulce disponible. Sin embargo, FA observa que los bajos rendimientos no son sólo resultado de esos dos factores abióticos, sino también del estrés térmico. Las largas y calurosas sequías probablemente intensifican los problemas de salinidad (FA). Cada diez años se realiza un amplio censo con el fin de levantar información sobre qué cultivos se realizan, en qué superficie, cuáles son los rendimientos, etc. Este censo se ha realizado en el año 2021, y los resultados deberían estar disponibles a mediados del próximo año (2022).

Existe una distinción entre los grandes y los pequeños agricultores, en el sentido de que los pequeños producen sobre todo cultivos anuales, mientras que las grandes plantaciones se enfocan en especies arbóreas. Las grandes plantaciones disponen de más recursos para invertir en su actividad, incluyendo en sistemas de riego adecuado, no así los pequeños agricultores, por lo que estos últimos suelen verse más afectados por problemas de salinidad y falta de agua para riego (FA).

En cuanto a la disponibilidad de insumos externos, en la mayoría de los casos no es un problema, sin embargo, no siempre se dispone de semillas de alta calidad y esto afecta directamente a los rendimientos (FA). Hay fertilizantes disponibles, pero el adecuado puede ser demasiado caro para los pequeños agricultores. Por otro lado, existen programas que estimulan y apoyan el uso de insumos orgánicos como el estiércol y el compost para suelos degradados, práctica ya efectuada por ambos agricultores entrevistados. Basado en la información levantada, se cree que aún existe la posibilidad de mejorar rendimientos aumentando el contenido de materia orgánica en las zonas afectadas por salinidad.

c. Gobernanza y administración del agua

La distribución y gestión del agua se rige por el Código de Aguas chileno, vigente desde 1981 (FA). Según FA, el código es eficaz, pero no perfecto, ya que no considera los aspectos medioambientales, además de estar separado de la gestión de las aguas subterráneas. ECo está de acuerdo con que el sistema es ineficaz, ya que no incorpora todo el sistema hidrológico y menciona como ejemplo de un organismo de gestión debidamente integrado, la región de Copiapó, donde los problemas de agua son aún mayores que en la zona focal de este estudio, por lo que las autoridades locales se vieron obligadas a mejorar el sistema. Según ECo hay esperanza en ese mensaje: cuando la tensión en el sistema sea demasiado grande, las autoridades responderán eficazmente. En este sentido, también menciona la recarga de Pan de Azúcar como ejemplo de éxito en la gestión.

El gobierno apoya una serie de proyectos que buscan optimizar el uso del agua dulce y que trabajan en la desalinización de las aguas, pero esos proyectos son muy pocos para tener un gran impacto (FA). Lo mismo dicen las dos partes interesadas encuestadas sobre los proyectos que pretenden abordar los problemas generados por el cambio climático. ECo añade que sería inteligente centrarse más en la restauración de los ecosistemas naturales, ya que esto tendrá un efecto de goteo en la estabilidad de todo el sistema, junto a las partes utilizadas por los humanos.



En las regiones objetivo de este estudio, existen numerosos canales de riego para administrar el agua donde se necesita, y durante los años normales, la disponibilidad de agua es menos problemática (JC, HE). Además, se han construido embalses para administrar el agua. La DGA es responsable de su gestión, y ésta es ejecutada por las Juntas de Vigilancia Fluvial y las asociaciones de regantes (FA). El sistema ha demostrado su eficacia a lo largo de los años, pero por supuesto se hace más difícil cuando no hay agua disponible, lo que es una tendencia creciente, como señalan ambos entrevistados.

En Coquimbo, fuera de nuestra área focal (norte), se han construido grandes cuencas para captar las precipitaciones cuando caen y ponerlas a disposición de la estación seca. ECo menciona un embalse de 200 Mm³ en el Valle del Río Elqui y uno con capacidad de 700 Mm³ en el Valle del Limarí. Sin embargo, debido a que las precipitaciones (y la caída de nieve) han sido mucho más bajas que el promedio durante muchos años consecutivos, debido a la megasequía, estos embalses tienen cada vez menos agua en ellos y por consiguiente, la gente ha recibido una menor cantidad de agua cada año.

d. Calidad del agua

La DGA mide la calidad del agua cada tres meses en las regiones objetivo de este estudio, y debería tener información al respecto (FA). Sin embargo, la información sobre las aguas superficiales y subterráneas no se encuentra unificada y llevará mucho tiempo recopilar y combinar toda la información. Uno de los agricultores mencionó que la única información sobre la calidad del agua a la que tiene acceso es a los análisis que él mismo realiza (JC). Aunque no fue posible obtener datos sobre los niveles de salinidad de la región y la región focal de ECo, tanto los encuestados como los dos agricultores entrevistados coinciden en que los niveles de salinidad están aumentando en el tiempo, por lo que esto también incluye los niveles de salinidad en el Río Maipo.

Recientemente, en algunas localidades los agricultores cercanos al mar experimentan salinización por intrusión de agua de mar, pero esto ocurre muy localmente (FA, ECo). Un ejemplo fuera de las regiones objetivo es la intrusión de agua de mar en el Río Elqui, en Coquimbo. Sin embargo, en general en Chile, el origen de las sales está en el suelo, ya que la mayor parte de Chile ha sido fondo marino hasta hace relativamente poco tiempo, cuando las placas tectónicas levantaron el fondo marino y crearon la Cordillera de los Andes en el proceso. En general, la intrusión de agua de mar y/o las inundaciones no son un gran problema en Chile, ya que la mayor parte del país se encuentra en una pendiente.

Para concluir, ambos entrevistados indican que actualmente Chile se encuentra bajo estrés hídrico ya que han tenido seis o siete años de niveles de precipitación por debajo de la media. En parte como consecuencia de esto, el agua disponible es cada vez de peor calidad. Según los agricultores entrevistados, esto también provoca conflictos por los recursos hídricos. Este hecho es ampliamente reconocido y se están llevando a cabo varios proyectos para solucionar estos problemas.



8. EVALUACIÓN DE LAS NECESIDADES Y RECOMENDACIONES

a. Salinidad

La información más obvia que falta al escribir este informe es una *visión clara de los problemas de salinidad* en Chile. Esto se ejemplifica con el hecho de que Chile no está en el mapa global de salinidad del suelo recientemente producido como se muestra en la Figura 11 y la Figura 12. Tanto la salinidad del suelo como la del agua no se monitorean de manera centralizada, por lo que no fue posible encontrar un buen mapa de salinidad de Chile, ni de las dos regiones destacadas en este informe.

Recomendación: Obtención de datos y elaboración de mapas a nivel regional

Siguiendo la necesidad de mapas de salinidad, se recomienda desarrollar un enfoque gradual para mapear la salinidad en Chile, empezando por mapear las dos regiones destacadas en el informe. El propósito de los mapas es determinar los problemas de salinidad, los riesgos y las ubicaciones potenciales en la que se desarrolla la agricultura salina, para así potenciar soluciones adecuadas. Para ello es necesario seguir los siguientes pasos:

- Definir detalladamente el tipo de mapas que se van a elaborar, por ejemplo, mapa de usos del suelo, mapa de aguas subterráneas, mapa de salinidad de las aguas superficiales, mapa de salinidad de las aguas subterráneas (clases y riesgos de salinidad), mapa de suelos
- Entrevistar a los institutos de investigación, las universidades y los gobiernos pertinentes para ver qué mapas y datos existen, pero aún no se conocen
- Comprobar la disponibilidad de datos de código abierto. El motor de Google Earth (GEE), los satélites, los sensores y los datos abiertos permiten recopilar información sobre el clima, la cantidad de agua en el suelo y la situación de los cultivos
- Realizar un análisis de las carencias de los datos que aún faltan para poder determinar ubicaciones detalladas en las dos regiones
- Elaborar un plan de medición y seguimiento centrado en los parámetros de los datos (para la salinidad del suelo y del agua: el mínimo es la CEE, el pH y el Na, Ca, Mg y K disponibles (para calcular el ESP/SAR). En el caso del suelo, deben tomarse muestras de la capa superior y del subsuelo), la frecuencia, los momentos relevantes del año/mes y las ubicaciones mínimas necesarias para rellenar los vacíos de información. Idealmente en colaboración con los departamentos gubernamentales pertinentes en el terreno de la agricultura y la gestión del agua. Un punto de partida pertinente podría ser el análisis DAFO para comprender los puntos fuertes, los puntos débiles, las oportunidades y las amenazas de 1) las actividades actuales de colección de datos 2) los instrumentos y laboratorios disponibles y su calidad y 3) la capacidad en términos de conocimientos y experiencia, así como el número de personas en los departamentos gubernamentales que trabajan en la toma de datos
- Analizar los datos y elaborar los mapas, basándose en las necesidades y la relevancia para la futura planificación de actividades
- Compartir y discutir los mapas y el plan de medición y seguimiento con los departamentos gubernamentales pertinentes (como la Dirección General del Aguas, el Ministerio de Agricultura y el Instituto de Investigaciones Agropecuarias [INIA], entre otros) y las asociaciones de agricultores. Esto creará conciencia y al mismo tiempo proporcionará retroalimentación. Lo ideal es que se produzca una colaboración para la medición y el seguimiento futuros mientras se discuten los mapas y el plan de medición y seguimiento propuesto



- Los mapas propuestos también pueden utilizarse para indicar las zonas específicas que son adecuadas para determinados cultivos, y las zonas en las que es mejor evitar determinados cultivos (basándose en la cantidad y calidad del agua disponible y necesaria, por ejemplo)

Se pueden considerar medidas similares para otras regiones de Chile.

Recomendación: Obtención de datos y seguimiento a nivel de los agricultores

Dado que la falta de datos es un problema general, podría considerarse la posibilidad de discutir con los agricultores si vale la pena desarrollar una red de toma de datos a nivel de los agricultores utilizando una aplicación para registrar y compartir los datos. Esto podría centrarse en una amplia gama de parámetros. Se sugieren los siguientes pasos:

- Preparar una exploración rápida sobre los parámetros que podrían considerarse en relación con lo más relevante
- Entrevistar a los agricultores sobre el valor añadido para ellos, su voluntad de implicarse y los aspectos prácticos para tener en cuenta
- Considerar la posibilidad de organizar un grupo de agricultores entusiastas a pequeña escala durante todo el año, para evaluar y utilizar las lecciones aprendidas para ampliar el grupo de agricultores y la zona, o concluir que no tiene éxito

Algunos agricultores son muy conscientes de los problemas de salinidad de su suelo y del agua de riego, tienen conocimientos precisos al respecto y realizan mediciones con regularidad, aunque se centran sobre todo en los aspectos relacionados con el agua (y menos en las propiedades del suelo). Como riegan con agua ligeramente salina, también aplican una fracción de lixiviación periódica para lavar las sales acumuladas a capas más profundas, lejos de la zona de las raíces. Sin embargo, se desconocen los detalles exactos de la gestión del riego. El primer indicio es que el balance hídrico global estacional se ajusta a las necesidades hídricas del cultivo, pero cuando se riega con agua salina, es necesario un riego de precisión, basado en la demanda de agua del cultivo y la lixiviación necesaria. Por ejemplo, se necesita un riego más frecuente en condiciones de salinidad para mantener la capacidad del terreno por encima del 80%. Esto es necesario para evitar la acumulación de sales cuando el suelo se seca entre los riegos. Esto es especialmente crítico cuando los niveles de salinidad ya están cerca o justo por encima de los límites del umbral del cultivo, como es el caso del palto cuando se riega con agua de 1,7 dS/m. Por otro lado, la lixiviación debe producirse en equilibrio con la absorción de nutrientes (evitar la lixiviación de nutrientes, especialmente del nitrato que es muy móvil) y el anegamiento debe evitarse a toda costa. La mejor manera de controlar la cantidad exacta de agua que se aplica es el riego por goteo. Sin embargo, según la Tabla 7 y la Tabla 8, parece que sólo alrededor del 28% y el 38% de la superficie total regada utiliza el riego por goteo para la Región Metropolitana y de la Región de Valparaíso, respectivamente. Las dos plantaciones visitadas utilizan riego por goteo, como se puede ver en la Figura 17. Cabe destacar que, bajo ciertas circunstancias, el uso del riego por inundación puede ser una forma eficiente de asegurar la lixiviación adecuada de todo el perfil del suelo.

Ambas plantaciones visitadas para este informe son consideradas como grandes. Estas plantaciones ocupan la mayor superficie de las tierras destinadas a cultivos, como se aprecia en la Figura 9 y la

Figura 10, a pesar de eso, cabe destacar que la mayoría de los agricultores poseen una menor superficie de tierras. De estos pequeños agricultores, se sabe menos sobre su *conocimiento de los problemas de salinidad* en sus plantaciones y sus métodos para afrontarlos.

Al examinar las medidas adoptadas por los agricultores para combatir la salinidad, salen a la luz muchas buenas prácticas. Entre las medidas adoptadas por los agricultores figuran:

- El uso de portainjertos más tolerantes a la sal
- Aplicar una fracción de lixiviación periódica para lixiviar las sales acumuladas
- Aplicar materia orgánica al suelo (en forma de podas y hojas)



- Aplicar ácidos húmicos líquidos al suelo para potenciar la salud del suelo y sus microorganismos
- Medir y controlar periódicamente la calidad del suelo y del agua de riego
- Utilizar los métodos de riego adecuados



Figura 17. Impresión del sistema de riego de la plantación de nogales (izquierda) y del palto (derecha). Ambas plantaciones utilizan el riego por goteo, con las líneas de goteo colocadas sobre el suelo.

Recomendación: Entrenamientos a medida sobre métodos para tratar los problemas de salinidad a nivel de los agricultores

Teniendo en cuenta que algunos agricultores tienen experiencia en la aplicación de una fracción de lixiviación periódica para lixiviar las sales acumuladas a las capas más profundas, es pertinente considerar las oportunidades de intercambio de conocimientos, así como los conocimientos sobre las necesidades de agua dulce y la gestión del agua. Por lo tanto, recomendamos:

- Colectar información más detallada sobre sus prácticas y datos sobre la demanda de agua de los agricultores en general y dividida por actividades como el riego y la lixiviación de la sal acumulada en lo posible
- Colectar las necesidades de los problemas que aún se experimentan
- Colectar información sobre el nivel de concienciación de los programas de salinidad de los agricultores con menos tierras
- Desarrollar un entrenamiento a medida para los pequeños agricultores sobre los métodos para tratar los problemas de salinidad y la gestión del agua en Chile, basándose en (o incluso en colaboración con) las mejores prácticas de los agricultores chilenos experimentados y los ejemplos mundiales de The Salt Doctors, Delphy y Arcadis. Idealmente, la formación puede aplicarse como un concepto de formación de formadores en Chile, de agricultor a agricultor.
- Desarrollar una "caja de herramientas" de posibles medidas que puedan utilizarse en los entrenamientos a medida y apoyar el concepto de formación de formadores.

Como parte de la formación, también puede ser de gran valor añadido aplicar un primer piloto sobre el terreno que incorpore algunas de las recomendaciones, de la siguiente manera:

- Poner en marcha proyectos piloto en una o varias plantaciones existentes para desarrollar y mostrar la estrategia de cultivo más adecuada, en lo que respecta a la mejora de la gestión de los cultivos, el suelo y el agua
- Mejorar el contenido de materia orgánica en el suelo para impulsar la vida del suelo y estabilizar/mejorar su estructura
- Aplicar mulch para reducir la evaporación del suelo
- Probar los productos disponibles en el mercado que dicen ayudar en condiciones de salinidad

Hasta ahora no ha sido posible analizar con exactitud qué fertilizantes están disponibles, qué fertilizantes se están utilizando, cuál es la composición exacta de estos fertilizantes, cuándo se aplican y en qué cantidad. Esta estrategia general de fertilización puede mejorar aún más las prácticas de plantación, y la calidad y cantidad general de los frutos. Posiblemente, esto también puede formar parte de una próxima fase. Lo mismo ocurre en cierta medida con la estrategia de riego.

Como ya se ha indicado, *el riego es un factor crítico para combatir la salinidad*. Curiosamente, los daños en las hojas, como los observados en la plantación de nogales, indican una infección por un virus, que es más común en los árboles que sufren de estrés hídrico (demasiada agua), que puede ser causado por el anegamiento. Durante las entrevistas también se puso de manifiesto que en algunos lugares se produce una mala infiltración del agua y un anegamiento. Esto es un indicio de que la estructura del suelo no es óptima (puede ser causado por la salinidad que afecta a la estructura de los suelos arcillosos). Lamentablemente, disponemos de (muy) *poca información sobre el tipo y la estructura* del suelo en Chile. Sin embargo, existe toda una gama de tipos de suelo en Chile (Arcadis Chile, comunicación personal), incluidos los suelos arcillosos (pesados). Por otro lado, la mala infiltración del agua y el anegamiento pueden ser una causa directa de un drenaje subóptimo. Además, el palto es muy sensible a las condiciones de mal drenaje y también es susceptible a la podredumbre de la raíz por *Phytophthora*, que prospera en suelos mal drenados. Un riego adecuado sólo puede tener lugar en combinación con un drenaje apropiado (a nivel de terreno y plantación, pero también a nivel de región). Pareciera que el drenaje se basa primordialmente en la capacidad natural del suelo, mientras que casi no se instalan o desarrollan sistemas de drenaje de forma activa (como lo serían canales de drenaje superficial o tuberías de drenaje bajo la superficie). Además, quedó claro que los niveles de salinidad del agua del río fluctúan. Por lo tanto, tiene sentido vigilar de cerca el nivel de salinidad del agua del río y utilizar el agua sólo cuando la salinidad sea relativamente baja. También puede ser aconsejable la construcción de embalses de agua a nivel de plantación, para almacenar el agua en los momentos de baja salinidad y utilizarla en los momentos de alta salinidad del río. Estos embalses también pueden utilizarse para la recolección de agua de lluvia. A continuación, se exponen algunos puntos adicionales sobre la gestión del agua y el riego en las plantaciones.

Recomendación: Gestión del agua y del riego en las plantaciones:

- Construir depósitos de agua en las plantaciones para coleccionar el agua cuando la salinidad es baja y utilizarla cuando la salinidad es alta
- Colectar el agua de lluvia si es posible y mezclarla con el agua del río
- Utilizar el riego subterráneo (es más eficiente y puede evitar que el agua de riego se caliente demasiado) y aplicar cantidades frecuentes pero pequeñas de agua de riego
- Instalar un drenaje que permita la lixiviación de la sal
- Centrarse en la mejora de la estructura del suelo añadiendo materia orgánica y calcio para mejorar la infiltración y la lixiviación del agua



- Centrarse en los detalles del riego y la demanda de agua de los cultivos (durante la temporada). En muchos casos se puede mejorar la eficiencia del uso del agua, tanto del sistema de riego como de la propia aplicación del agua

Recomendación: Estudiar las causas del problema y la interacción de los tipos de agua y suelo

Se necesitaría un estudio más profundo sobre los tipos y estructuras de suelo en Chile, comenzando por las dos regiones objetivo de este estudio, para indicar lo que ocurre en la interacción entre el agua y el suelo. En otras palabras, ¿cuál es la causa del problema de la salinidad? ¿Es el propio anegamiento, el que da lugar a suelos degradados con menor productividad? Se requerirá un estudio a mayor profundidad de las causas sobre los tipos de suelo, las estructuras del suelo, el riego y el drenaje para proporcionar más recomendaciones sobre el potencial de la agricultura salina en las dos regiones y/o en Chile como país.

b. Agua

En lo que respecta al agua, el problema más notorio es el de la *gobernanza del agua* en lo que respecta a los derechos de agua y su distribución. Históricamente, el sistema de adjudicación de derechos de agua permitía la especulación, ya que en algunos casos se adjudicaban a personas que en un principio no los utilizaban y ahora venden esos derechos a quienes los necesitan. Sin embargo, no existe una correlación entre la cantidad de derechos de agua que tienen esos propietarios y cuánto necesitan el agua que reclaman, es decir, cuánta tierra poseen. Por tanto, existe una discrepancia entre los que tienen acceso al agua y los que la necesitan, lo que da lugar a un mercado del agua.

Además de la falta de correlación entre los que tienen derecho al agua y los que la necesitan, los derechos de agua (especialmente para las aguas subterráneas) se concedieron independientemente del presupuesto de agua de la cuenca o de las condiciones meteorológicas especiales. Asimismo, los antiguos cálculos en los que se basaba la cantidad de agua a distribuir tampoco han resultado ser precisos y no tienen en cuenta un uso sostenible de los recursos a largo plazo. Además, hay que tener en cuenta que están cada vez más desfasados ahora que las cantidades de precipitaciones están disminuyendo como consecuencia de los cambios en los patrones climáticos.

Las extracciones de aguas subterráneas no están debidamente controladas por el gobierno ni por las comunidades de regantes, como resultado, los agricultores bombean las aguas subterráneas también de forma insostenible. Esto hace que disminuyan los recursos de agua subterránea en los acuíferos. En consecuencia, se produce un deterioro de la calidad del agua, como el aumento de la salinización.

Cuando el nivel freático desciende en los acuíferos, se produce una desigualdad en el acceso a las aguas subterráneas, ya que los grandes agricultores disponen de recursos para perforar nuevos pozos y bombear a mayores profundidades. Este no es el caso de los pequeños agricultores, ya que estos costes de perforación son prohibitivos para ellos.

Estos grandes agricultores disponen de conocimientos, equipos y tecnología avanzados en sus plantaciones y dirigen sus negocios de forma profesional, además de disponer de los medios necesarios para invertir en nuevas intervenciones cuando es necesario. Sin embargo, se sabe mucho menos sobre las tierras que cultivan los pequeños agricultores. Estos agricultores están menos informados que los grandes y carecen de medios para invertir en tecnología moderna que les ayude a aumentar su producción y/o sostenibilidad.

Las aguas subterráneas están reguladas, pero carecen de control por parte de las autoridades. En consecuencia, los agricultores bombean las aguas subterráneas también de forma insostenible, lo que provoca la disminución de las capas freáticas. Sin embargo, también provoca el deterioro de la calidad



del agua, como el aumento de la salinización. Esto lo hacen sobre todo los grandes agricultores. Cuando el nivel freático desciende demasiado o cuando la calidad es demasiado pobre, simplemente perforan un nuevo pozo a cierta distancia.

Recomendación: Disponibilidad y demanda de agua (cantidad de agua)

La disponibilidad de agua dulce requiere la comprensión del sistema y, por tanto, el análisis del sistema hídrico, de los acuíferos subterráneos, etc. Un primer paso es ser capaz de mapear la disponibilidad de agua, por ejemplo, en un sistema hídrico o en una región para determinadas estaciones del año (siendo conscientes de que el agua atraviesa las fronteras administrativas, en la superficie, pero también en el subsuelo). A continuación, es necesario mapear las demandas de agua, relacionadas con las funciones/usuarios/propiedad de la tierra y las ubicaciones sobre una base anual o estacional. Una vez que el equilibrio esté claro con respecto a la disponibilidad y la demanda, sería pertinente trazar un mapa de los derechos de agua en la situación actual y en la situación ideal y ver lo que se necesitaría para llegar a ella.

Adicionalmente, se podría realizar un análisis FODA sobre la gestión del gobierno al respecto, para entender el factor de éxito como la recarga de Pan de Azúcar cuando parece haber un problema de disponibilidad de agua. El FODA, que puede ser completado en base a estudios de escritorio y entrevistas, también contribuirá a nuevas oportunidades sobre el uso del agua y la sostenibilidad, así como soluciones técnicas y de gobierno. Es necesario tener en cuenta todo el sistema hidrológico en este análisis (incluyendo las aguas subterráneas).

Recomendación: Contaminación del agua y salinidad (calidad del agua)

Para la calidad del agua se pueden seguir pasos similares que los indicados para la cantidad de agua, centrándose en el análisis FODA y mapeando los problemas actuales de la calidad del agua. Es importante tener en cuenta los aspectos relacionados con la calidad del agua a la hora de prestar asesoramiento sobre gobernanza, como se indica a continuación.

Recomendación: Gobernanza del agua a partir de la comprensión del sistema

El "negocio de los derechos de agua" parece ser lucrativo y aún no está totalmente controlado o gestionado, aunque ya se están produciendo mejoras en la respuesta precisa cuando el agua escasea. Podría considerarse la posibilidad de elaborar directrices o pautas sobre cómo proceder con los derechos de agua ahora y en el futuro. Podrían formularse recomendaciones basadas en los resultados del análisis de la cantidad y la calidad del agua y en un análisis en profundidad del actual sistema de gobernanza del agua. Las recomendaciones relacionadas con la gobernanza incluyen el desarrollo de políticas, la coordinación y la colaboración y las específicas sobre derechos de agua, por ejemplo, planes de zonificación basados en el sistema, priorización de las necesidades de agua (para el consumo, para la producción de alimentos, para las industrias, etc.). Las lecciones aprendidas de los proyectos en todo el mundo pueden trasladarse también a la situación chilena.



COASTAR: relevant example on fresh water and the 'Water bank'

El proyecto COASTAR involucra una colaboración entre varias juntas distritales de aguas y la provincia de Zuid-Holland para desarrollar un concepto innovador que permita satisfacer las necesidades de agua dulce. En zonas densamente pobladas como Zuid-Holland, el aumento de los periodos de fuertes precipitaciones exige esfuerzos adicionales. El almacenamiento eficaz de grandes volúmenes de agua de lluvia ocupa valiosos metros cuadrados de terreno. El innovador concepto COASTAR (COastal Aquifer STorage And Recovery) consiste en un robusto suministro de agua dulce del subsuelo a gran escala, que permite el almacenamiento temporal de agua dulce en el suelo. El proyecto también estudió soluciones de gobernanza como el concepto de Banco de Agua. La extracción de agua subterránea cuesta al agricultor "dinero o derechos", mientras que la inyección de agua de lluvia produce "dinero o derechos". De este modo se garantiza un mayor equilibrio entre la oferta y la demanda de agua. La investigación actual se centra en varios aspectos de la viabilidad, como los cálculos de los posibles efectos en el subsuelo, los aspectos legale y los financieros.

Recomendaciones para el desarrollo de capacidades en materia de gobernanza del agua mediante el juego serio

Además del análisis y el asesoramiento, se podría desarrollar una formación a medida sobre la gobernanza del agua para el gobierno de Chile y/o los gobiernos regionales implicados. A medida, debido a la necesidad de profundizar realmente en la situación de Chile con respecto a la gobernanza del agua y relacionarla con los retos de los agricultores y la salinidad. Se podría desarrollar un juego serio, o una simulación de políticas, con la participación de los funcionarios del gobierno y/o los agricultores como herramienta para el desarrollo de capacidades. El juego crea una experiencia de aprendizaje interactiva y puede utilizarse para la toma de decisiones en colaboración y los procesos de diseño. Basándose en las experiencias de los juegos serios, se requiere una buena explicación del propósito, el valor añadido y la importancia del enfoque interactivo para los participantes. El desarrollo de un juego serio tiene como objetivo:

- Crear un sentimiento compartido de urgencia y centrarse en la gestión de la presión temporal relacionada con los retos de cada caso
- La transferencia de conocimientos: ¿qué mecanismos están en juego? ¿quién tiene qué responsabilidades, quién puede influir, etc.?
- Trabajar para conseguir una solución que organice los conocimientos y los datos con (en última instancia) una amplia aplicación
- Hacerlo de forma que se empodere a los actores locales y se permita un diálogo constructivo
- Asegurarse de que los actores locales se conviertan en los propietarios de esta solución, es decir, de esta caja de herramientas de módulos de juego y otras herramientas de cocreación. Debe ser reconocible y específica para cada caso
- Comprender los objetivos conflictivos y las posibles trampas relacionadas con las distintas soluciones
- El desarrollo de posibles vías de gobernanza.

El juego contribuye a aumentar la capacidad de resolución de problemas de los funcionarios y/o stakeholders.

Estos grandes agricultores disponen de conocimientos, equipos y tecnología avanzados en sus plantaciones y dirigen sus negocios de forma profesional. Además, disponen de medios para invertir en nuevas intervenciones cuando es necesario. Sin embargo, se sabe mucho menos sobre las tierras que cultivan los pequeños agricultores. Además, esos agricultores están *menos informados* que los grandes y carecen de medios para invertir en *tecnología modernas* que les ayude a aumentar su producción y/o sostenibilidad.



9. OPORTUNIDADES DE PREVENCIÓN, MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN

Basándose en los datos obtenidos de la literatura, de las entrevistas y de las visitas al terreno, se identificaron varias oportunidades para mejorar la resiliencia climática de la agricultura en zonas con escasez de agua y salinidad en Chile. Estas oportunidades están relacionadas con los cultivos, el suelo y el agua, y también se basan en las necesidades y recomendaciones del capítulo anterior. Debido al COVID-19 no fue posible para The Salt Doctors y Delphy visitar Chile y discutir en detalle con los agricultores en terreno. Por ello, fue difícil precisar realmente los detalles de las oportunidades de mejora de la estrategia general de cultivo. Pero los desafíos y problemas de los agricultores son claros y en base a esto podemos identificar varias oportunidades que pueden mejorar la resiliencia general y la producción de los cultivos.

a. Cultivos

En el caso de los cultivos, es difícil formular oportunidades para prevenir y mitigar los efectos de la salinidad, ya que estos aspectos están más relacionados con las oportunidades del suelo y del agua (véase más adelante). Tanto el nogal como el palto son muy sensibles a la salinidad. En el caso del palto se sabe que los diferentes portainjertos también difieren en la tolerancia a la sal, por lo que una forma de adaptarse a la salinidad es utilizar los portainjertos Antillanos más tolerantes a la sal. En resumen, las oportunidades en relación con los cultivos pueden ser:

- Seleccionar y utilizar cultivares/portainjertos más tolerantes a la sal. En el caso del palto, los portainjertos Antillanos han presentado una mayor tolerancia
- La aplicación de fertilizantes foliares puede garantizar la correcta absorción de los (micro) nutrientes esenciales y, de este modo, prevenir o mitigar algunos efectos de la salinidad. La aplicación de un fertilizante foliar a base de calcio también puede mejorar la calidad general de la fruta. Además, hay varios productos que dicen mejorar la resistencia general de un cultivo (hacerlo más robusto) y esto podría probarse en las condiciones locales
- Los vientos cálidos y secos intensifican las quemaduras de las hojas en las plantaciones de palto, debido al aumento de la transpiración y a una mayor tasa de absorción y acumulación de cloruro en las hojas. En este sentido, puede tener sentido realizar cortavientos alrededor de las plantaciones, posiblemente en forma de una línea de árboles (por lo tanto, una forma adicional de agroforestería)
- La última forma de adaptación es la selección de cultivos adecuados a los niveles de salinidad del suelo y del agua de riego. En la práctica, esto implica que el palto y el nogal no son los mejores cultivos en condiciones de salinidad (muy sensibles a la sal) y, por ejemplo, tiene más sentido cambiar al olivo, donde se ha observado una mayor tolerancia a la salinidad

b. Suelo

Para el suelo, muchos aspectos de las oportunidades tienen el propósito de evitar que las sales afecten negativamente a las condiciones del suelo (desde un punto de vista químico, físico y biológico) y mitigar el efecto de la salinidad del crecimiento de los cultivos, principalmente en la forma de la presencia y disponibilidad de varios nutrientes. Muchas de las oportunidades que se mencionan a continuación deberían basarse en un análisis fiable del suelo que debería realizarse cada cuatro años como mínimo. Debe saberse qué nutrientes están presentes y sus concentraciones. A partir de esto, se puede componer una estrategia de fertilización equilibrada. Considerando esto, las oportunidades identificadas son:

- El pH del suelo puede ser elevado, debido a la "salinidad" (cuando el carbonato de sodio es la principal fuente de sales, el (bi)carbonato puede dar lugar a un pH del suelo muy elevado). La adición de ácidos (orgánicos) puede mejorar mucho el rendimiento de los cultivos en ese caso



- Utilizando materia orgánica y/o calcio (yeso si el pH del suelo es alto y el sulfato no está ya presente en el suelo en cantidades excesivas, utilizar cal si el pH es bajo) como aditivo del suelo, se puede mejorar la estructura general del suelo. Además, existen paletas de cal que funcionan bien en condiciones de humedad y "encharcamiento". Al mejorar la estructura general del suelo, también se puede mejorar la infiltración y la lixiviación del agua
- Asegúrese de que la materia orgánica que se utilice tenga un bajo contenido en sales. Si se utiliza la poda y las hojas de las plantaciones afectadas por la sal, es probable que ésta también contenga sales. Invertir en materia orgánica sin sal puede ser una solución rentable en ese caso
- Aplicar un mulch orgánico (una capa de 5 cm de, por ejemplo, paja de trigo o cebada) en la zona de riego. Esto limitará la evaporación del suelo y reducirá la necesidad de agua. Cuando se utiliza menos agua, se añaden menos sales. Además, esto hace que la lixiviación sea más eficaz en épocas de calor y sequía.
- La lixiviación sólo es posible con un drenaje adecuado. En muchos casos, la instalación de un drenaje subsuperficial es una forma adecuada de garantizar la lixiviación de las sales por debajo de la zona de las raíces de forma rentable (a menudo las raíces del palto se encuentran principalmente en los 30 cm superiores del suelo, por lo que hay que asegurarse de que las sales se lixivien por debajo de este nivel). El drenaje también puede evitar el "encharcamiento" en una capa más profunda del suelo. El drenaje puede instalarse de forma que se convierta en un "sistema cerrado"
- La instalación de ventosas puede ser una forma rápida y sencilla de tomar muestras del agua del suelo (agua de los poros) a diferentes profundidades para comprobar los niveles de salinidad de las diferentes capas y afinar el momento y la cantidad de lixiviación (en combinación con la medición de nitratos)
- Utilizar únicamente fertilizantes sin sodio ni cloruro. Se recomienda enviar algunas muestras al laboratorio para comprobar el contenido real de sodio y cloruro cuando se utilicen marcas locales. Además, en muchos casos las concentraciones de magnesio son altas en las zonas afectadas por la sal. En ese caso también deben utilizarse fertilizantes sin magnesio. Analizando los minerales presentes en el agua de riego y añadiendo exactamente los nutrientes que faltan, se pueden añadir todos los fertilizantes mediante el riego (fertiirrigación). Esta aplicación equilibrada de fertilizantes también puede ser una forma eficaz de reducir la CE global del suelo
- El análisis de las muestras de suelo no proporcionó la información de calidad que necesaria. Por ejemplo, se debería saber cuáles son las fracciones disponibles de los diferentes nutrientes, qué minerales (y porcentajes) ocupan la CEC, y también uno de los resultados del análisis de la materia orgánica parece poco probable (aunque se volvió a comprobar). Además, se necesita más información sobre la actividad microbiana del suelo, para saber cómo y cuánto debe mejorarse (bacterias, hongos micorrizas, ...)
- El uso de cultivos de cobertura entre las hileras de árboles (véase la imagen inferior) también puede mejorar en gran medida las condiciones/estructura general del suelo, la infiltración del agua y la lixiviación
- El estrés salino puede aliviarse en cierta medida mediante diversos aditivos para el suelo y aplicaciones foliares (aminoácidos, ácido húmico/fúlvico, diversas enzimas, etc.). Si se conocen las condiciones locales, a menudo es posible identificar un producto que pueda mejorar la calidad y la cantidad de los cultivos de forma rentable. Se recomienda probarlo en el entorno local
- Es bueno mencionar que el sodio puede unirse al complejo arcilla-humus (CEC, principalmente en forma de arcilla y materia orgánica), mientras que el cloruro suele permanecer en la solución del agua del suelo. Esto facilita la lixiviación del cloruro, en comparación con el sodio, aunque la absorción también puede ser mayor en comparación con el sodio





Figura 18. Ejemplo de una plantación con cultivos de cobertura para mejorar la infiltración del agua y la fertilidad del suelo (izquierda) y una de las plantaciones visitadas en Chile sin cultivos de cobertura (derecha).

c. Agua

Oportunidades de prevención, mitigación y adaptación para la gestión del agua:

A nivel de terreno/plantación:

- Crear depósitos de agua para la colecta de agua de lluvia y de agua de río en épocas de baja salinidad
- Mezclar el agua de lluvia con el agua del río también puede ser una forma rentable de garantizar un bajo nivel de salinidad del agua de riego
- Controlar el nivel de salinidad del agua de riego y, cuando sea posible, mantenerlo por debajo de 0,6 dS/m
- La desalinización del agua de riego, mediante ósmosis inversa, puede ser rentable para los cultivos de alto valor. Esto puede estudiarse más a fondo en función de las condiciones locales, aunque hay que tener en cuenta que la fracción de salmuera (con concentraciones de salinidad más elevadas) también debe tratarse de forma sostenible
- El agua tratada magnéticamente a veces mejora la lixiviación de la sal de la capa superior del suelo, pero al mismo tiempo los resultados reportados son inconsistentes
- Instalar estaciones meteorológicas y/o sensores de humedad del suelo para determinar el nivel exacto de evapotranspiración y la demanda de agua de los cultivos, de modo que sea posible un riego de precisión, incluyendo el momento y la cantidad de lixiviación necesarios
- Garantizar el buen funcionamiento del sistema de riego y maximizar la eficiencia del uso del agua, especialmente cuando el agua de riego contiene sales (cuanta menos agua haya que aplicar, menos sales se añaden al suelo)
- El riego por goteo subsuperficial (colocando las líneas de goteo en el suelo) es más eficiente y se suele instalar en las nuevas plantaciones en zonas secas.
- El riego debe ser más frecuente, pero hay que aplicar menos cantidad por evento de riego en condiciones de salinidad. Podría ser necesario lixiviar cada pocos riegos con exceso de agua, superando en un 30-50 % la necesidad de riego estándar (por lo que puede ser necesaria una fracción de lixiviación del 30 al 50 %)



A nivel regional/nacional:

- Crear departamentos gubernamentales de "captación" que se encarguen del control del agua. Estos departamentos deben existir en un nuevo marco institucional
- Estudiar la sostenibilidad de las fuentes de agua potable en la región, saber hasta qué punto los acuíferos pueden seguir siendo estresados
- Generar más investigaciones para conocer el real aporte al suministro de agua que brindan los glaciares
- Contar con información actualizada respecto a la ubicación geográfica de los Derechos de Agua
- Asesoramiento legal a las organizaciones de usuarios dentro de las regiones que reclaman el uso histórico de las aguas
- Constitución y registro de comunidades de aguas subterráneas en sectores acuíferos
- Llevar a cabo un programa de control de las extracciones en los sectores acuíferos
- Implementar un sistema de subsidios para corregir el aumento del costo de bombeo debido a la disminución de los niveles de agua subterránea. Dichos subsidios deben ser debidamente controlados para evitar el aumento de los bombeos y la consecuente disminución de los acuíferos
- Promover la recarga artificial de los acuíferos
- Declarar zonas de restricción o zonas de prohibición, en los acuíferos según su nivel de explotación o sobreexplotación
- Mejorar la calidad y cantidad de la información pluviométrica, fluviométrica y de calidad del agua
- Mejorar la calidad y cantidad de la información sobre el nivel de las aguas subterráneas
- Mejorar la información y el análisis del estado actual de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas
- Instalar una red de seguimiento de la calidad de las aguas subterráneas
- Mejorar la red de seguimiento de la calidad de las aguas superficiales
- Animar a las organizaciones de usuarios a actualizar su información y datos e integrarlos en un sistema común
- Estudiar la promoción de la profundización de pozos en sectores críticos
- Mejorar el control en la actividad de extracción de áridos, para evitar efectos adversos en los ríos
- Mayor control y supervisión del cumplimiento de las normas y compromisos ambientales
- Incrementar las capacidades técnicas de los funcionarios públicos de cada región para la evaluación de los recursos hídricos, las pruebas de campo y la relación con las organizaciones de usuarios del agua, junto con una mejor coordinación interinstitucional
- Mejorar los canales de comunicación de las instituciones con los ciudadanos
- Adoptar medidas inmediatas para garantizar el suministro futuro ante el cambio climático



Referencias

- ▶ Ayers R. 1977. *Quality of water for irrigation* R.S Ausers. *Journal of the irrigation and drainage division, ASCE*. Vol 103.
- ▶ Arrau Ingeniería EIRL. 2015. *Diagnóstico Plan Maestro de Recursos Hídricos Región Metropolitana de Santiago, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile*.
- ▶ Arbol. 1990. *Salt-affected soils: Their reclamation and management for crop production*. *Adv. Soil Sci.* 11:223–288
- ▶ Ayers and Westcot, 1985. *Water quality for agriculture*. *FAO Irrigation and Drainage Paper 29, rev. 1*.
- ▶ Bernier R, Alfaro M, 2006. *Soil acidity and lime effect*. *Agriculture and Livestock Research Institute (INIA), INIA Bull 151. Osorno (in Spanish)*
- ▶ *Center for Climate and Resilience Research (CR2), (2015), Report to the Nation The 2010 – 2015 mega-drought: A lesson for the future*.
- ▶ Casanova MA, Seguel O, Salazar O, Luzio W. 2013. *The Soils of Chile*. *World Soils Book Series*, DOI 10.1007/978-94-007-5949-7_1.
- ▶ Castro M, Fassio C, Cautin R, Ampuero J. 2015. *UCV7, an avocado rootstock tolerant to salinity*.
- ▶ *Rev. Filotec. Mex, 38: 85-92*
- ▶ Celis et al., 2018. *Salt tolerance and growth of 13 avocado rootstocks related best to chloride uptake*. *Hortiscience 53 (12), pp. 1737-1745*.
- ▶ *FAO, 2002. FAO Irrigation and drainage paper 61. Rome, 2002*
- ▶ *FAO, 2020. Mapping of salt-affected soils - Technical specifications and country guidelines. Rome*.
- ▶ *FAO, 2021. Global Map of Salt-Affected Soils. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. <https://www.fao.org/3/cb7247en/cb7247en.pdf> Gupta, R.K., and I.B.*
- ▶ *Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA). 2008. Análisis de la Composición Físico Química de los Sedimentos Fluviales y su Relación con la Disponibilidad de Metales en Agua, Cuenca del Río Aconcagua. Volume IV. Santiago*.
- ▶ *Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)/Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). 2016. Evaluaciones del desempeño ambiental: Chile, Santiago*.
- ▶ *Comisión Nacional de Riego. 1984. Proyecto Maipo, Estudio Hidrológico e Hidrogeológico, Calidad de las Aguas*.
- ▶ *Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos (DCPRH). 2016. Diagnóstico de la Calidad de las Aguas Subterráneas de la Región de Valparaíso. Dirección General de Aguas*.
- ▶ *Dirección de Planeamiento (DIRPLAN) MOP Región Metropolitana de Santiago. 2012. Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2021*.
- ▶ *Dirección Regional de Planeamiento (DIRPLAN) MOP Región de Valparaíso. 2012. Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2021*.



- ▶ Figueroa LS. 1995. *Asignación y distribución de las aguas terrestres*, Santiago de Chile, Universidad Gabriela Mistral, inédito. Hopmans et al., 2021. *Critical knowledge gaps and research priorities in global soil salinity*. Article in press. *Advances in Agronomy*, <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2021.03.001>
- ▶ Ibacache A. (2008). *Fisiología y Nutrición del Nogal*. INIA- CRI Intihuasi. Online: <https://www.yumpu.com/es/document/view/13582668/fisiologia-y-nutricion-del-nogal-chilenut>
- ▶ Instituto Nacional de Estadísticas (INE), (2007). Website accessed 11-11-2021. <https://www.ine.cl/estadisticas/economia/agricultura-agroindustria-y-pesca/censos-agropecuarios>
- ▶ Instituto Nacional de Estadísticas (INE), (2021). Website accessed 11-11-2021. <https://www.ine.cl/censoagropecuario>
- ▶ Lahav E, Kadman A. 1980. *Avocado fertilization*. IPI-bulletin No. 6.
- ▶ Lantze N, Calder T, Burt J, Prince R. 2007. *Water Salinity and Plant Irrigation*, Department of Agriculture and Food, Government of Western Australia, South Perth WA Maas EV, Hoffman GJ, 1977. *Crop salt tolerance, current assessment*. *ASCE J. Irrig. Drain Div.*, 103, pp. 115-134.
- ▶ Muchnik E, Luraschi M, Maldini F. 1989. *Comercialización de los Derechos de Aguas en Chile*. Unidad de Desarrollo Agrícola de la División de Desarrollo Productivo y Empresarial CEPAL. Serie Desarrollo Productivo 47.
- ▶ Munns R. 2004. *The Impacts of Salinity Stress*, CSIRO Division of Plant Industry, Canberra ACT Neiro P. 2018. *Regulación del Agua como Derecho. ¿Por qué es importante la regulación de aguas?*
- ▶ *Iniciativa Científica Milenio. Biblioteca del Congreso Nacional.*
- ▶ Neuenschwander A. 2010. *El Cambio Climático en el Sector Silvoagropecuario de Chile*. Fundación para la Innovación Agraria.
- ▶ Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). 2019. *Panorama de la Agricultura Chilena*. Ministerio de Agricultura. ISBN: 978-956-7244-31-7.
- ▶ Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) & Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). 2020. *Catastro Frutícola Principales Resultados Región de Valparaíso 2020*. Santiago, Chile.
- ▶ Pearson KE. adapted from R. Waskom. 2007. *Diagnosing salinity problems*. Adapted from ASA-CSSA-SSSA, 2003 Annual Mtg., Denver, CO, published by Dept. Land Resources and Environ. Sci., Montana State Univ., Bozeman, MT
- ▶ Peña-Guerrero MD, Nauditt A, Muñoz-Robles C, Ribbe L, Meza F. 2020. *Drought impacts on water quality and potential implications for agricultural production in the Maipo River Basin, Central Chile*, *Hydrological Sciences Journal*, DOI: 10.1080/02626667.2020.1711911
- ▶ Queensland government. 2018. See, <https://www.daf.qld.gov.au/businesspriorities/agriculture/plants/fruit-vegetable/fruit-vegetable-crops/avocado/planting-and-growing-avocados>
- ▶ Rengasamy P and Marchuk A. 2011. *Cation ratio of soil structural stability (CROSS)*. *Soil Research* 49, 280-285
- ▶ Rosegrant W, Mark y Renato Gazmuri S. 1994. *Reforming water allocation policy through markets in tradable water rights: Lessons from Chile, Mexico, and California*. EPTD Discussion Paper, N° 6, Washington, D.C., Instituto Internacional de Investigaciones sobre Políticas Alimentarias.
- ▶ Ríos M, Quiróz J. 1995. *The market of water rights in Chile: Major issues*, *Cuadernos de economía (Santiago)*, vol. 32, N° 97, Santiago de Chile, diciembre.



- ▶ *Rising J, Devineni N. 2020. Crop switching reduces agricultural losses from climate change in the United States by half under RCP 8.5. Nat Commun 11, 4991. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18725-w>*
- ▶ *Sloat LL, Davis SJ, Gerber JS, et al. 2020. Climate adaptation by crop migration. Nat Commun 11, 1243.*
- ▶ <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15076-4>
- ▶ *Soil Survey Staff. 2014. Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 51, Version 2.0. R. Burt and Soil Survey Staff (ed.). U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.*
- ▶ *Solanes J. 1997. Institutional and legal issues relevant to the implementation of water markets: A review of experiences", Santiago de Chile, División de Medio Ambiente y Desarrollo, Comisión*
- ▶ *Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), inédito.*
- ▶ *Van Straten G, De Vos AC, Rozema J, Bruning B, van Bodegom PM. 2019. An improved methodology to evaluate crop salt tolerance from field trials. Agricultural Water Management 213, 375-387.*

