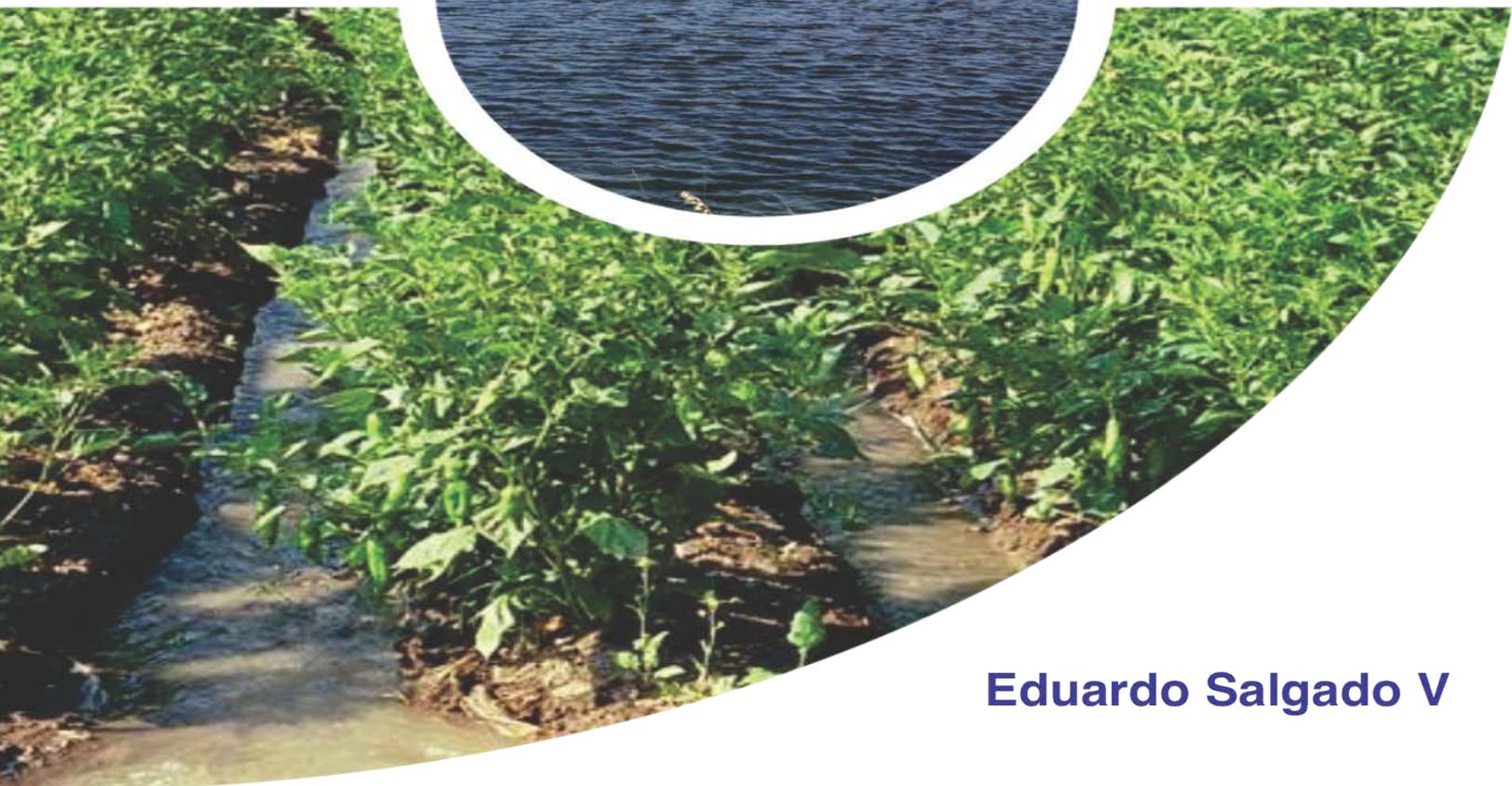


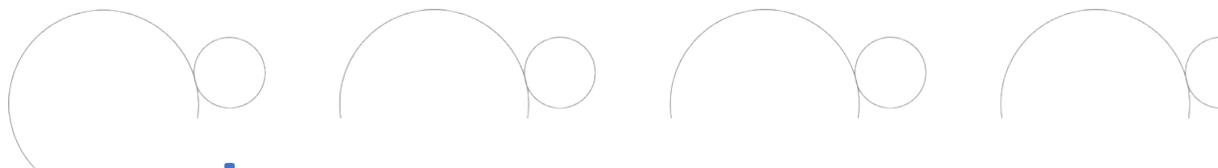


EL AGUA. CONCEPTOS BÁSICOS

CICLO DEL AGUA
DISPONIBILIDAD Y USO,
RIEGO EN CHILE,
MÉTODOS, EFICIENCIA,
ACUMULACIÓN, DERECHOS,
GOBERNANZA



Eduardo Salgado V



El Agua: conceptos básicos



Documento preparado y editado por
Eduardo Salgado, Académico Correspondiente de la
Academia Chilena de Ciencias Agronómicas y
Profesor de la Universidad Católica de Valparaíso.

Son altamente reconocidas las presentaciones de
los expositores, los académicos y profesionales



Oscar Miranda, ingeniero agrónomo, MS
Cesar Morales, ingeniero agrónomo, Dr
Samuel Ortega, ingeniero agrónomo, PhD
Carlos Estévez, abogado



Octubre 2021

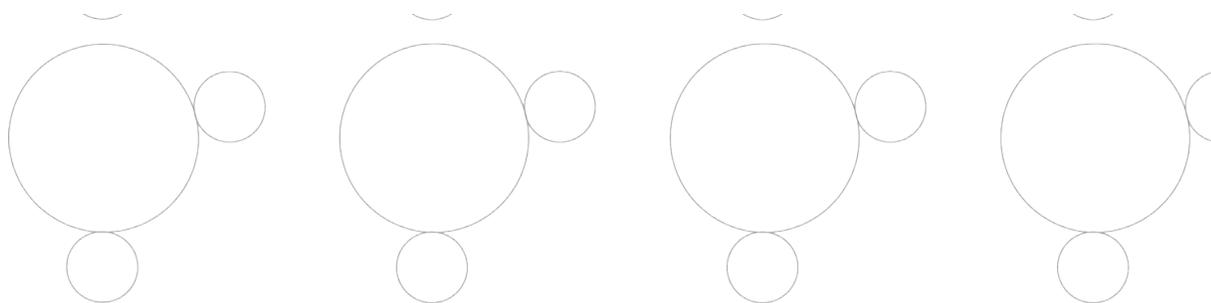




TABLA DE CONTENIDO

PRESENTACIÓN	2
INTRODUCCIÓN	3
EL AGUA EN LA TIERRA	4
CICLO DEL AGUA	4
LA CUENCA HIDROGRÁFICA	7
USO DEL AGUA	8
USOS Y DISPONIBILIDAD DEL AGUA EN EL MUNDO	8
USOS Y DISPONIBILIDAD DEL AGUA EN CHILE	10
RIEGO EN CHILE	14
ALGUNOS DATOS HISTÓRICOS	14
DATOS ACTUALES DE RIEGO EN CHILE DE INTERÉS GENERAL	14
CAPTACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS Y EFICIENCIA	15
AGUAS SUPERFICIALES	15
AGUAS SUBTERRÁNEAS	16
ACUMULACIÓN	17
EMBALSES	18
TRANQUES	20
RECARGA DE ACUÍFEROS	21
DISTRIBUCIÓN EXTRA PREDIAL	21
DERECHOS	22
EFICIENCIA	22
SEGURIDAD DE RIEGO	23
REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DE LOS CULTIVOS	24
USO DEL AGUA POR LAS PLANTAS	24
TRANSPIRACIÓN	24
MEDICIÓN Y ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE AGUA POR EL CULTIVO	25
CANTIDAD DE AGUA QUE UTILIZAN LAS PLANTAS	27
MÉTODOS DE RIEGO PEDIALES	29
RIEGO SUPERFICIAL	29
	31
RIEGO PRESURIZADO	31
EFICIENCIA DE RIEGO	34
	2



TASA DE RIEGO	35
CALIDAD DEL AGUA	36
EROSIÓN Y SALINIZACIÓN DEL SUELO BAJO RIEGO	38
LEY DE FOMENTO AL RIEGO Y DRENAJE (LEY 18.450 Y RENOVACIONES)	39
MEJORAMIENTO DEL RIEGO DE BAJO COSTO (PEQUEÑA AGRICULTURA)	40
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA EN RIEGO Y AGROCLIMATOLOGÍA (CITRA)	41
GOBERNANZA DEL AGUA EN CHILE	43
INSTITUCIONES CHILENAS EN LA ADMINISTRACIÓN DEL AGUA	49
REFERENCIAS	50

TABLA DE FIGURAS

Figura 1.	Distribución del Agua en la Tierra	4
Figura 3.	Esquema del Ciclo del Agua	5
Figura 3.	Nivel de estrés hídrico físico por región	6
Figura 4.	Esquema de circulación general de la atmósfera	6
Figura 5.	Esquema de una Cuenca Hidrográfica (Ejemplo Cuenca del Aconcagua)	7
Figura 6.	Demanda de agua (litros) para la producción de diversas unidades de alimentos	8
Figura 7.	Distribución del Uso del Agua, Promedio Mundial	9
Figura 8.	Comparación de usos del agua entre continentes	9
Figura 9.	Relación entre magnitud de la población y disponibilidad de agua a nivel continental	10
Figura 10.	Usos del agua en Chile. Comparación entre 2006 y 2015	11
Figura 11.	Grados de estrés hídrico proyectado para diversas zonas del mundo	12
Figura 12.	Escorrentía (m ³ /persona/año)	12
Figura 13.	Caudales (Q) promedio 2018-2019 comparado con el promedio histórico 1981-2010 (m ³ /s)	13
Figura 14.	Déficit/superávit de Precipitaciones Respecto de la Normal	13
Figura 15.	[A] Bocatoma Tecnificada; [B] Bocatoma Tradicional	16
Figura 16.	Esquema de Pozo Somero	17
Figura 17.	Esquema de Pozo Profundo	17
Figura 18.	Precipitación Histórica y Proyectada en Cinco Zonas Climáticas de Chile, mm/año	18
Figura 19.	A - E (Eb. La Paloma, Ovalle). (Eb. Recoleta, Ovalle)	19
Figura 20.	Déficit/superávit de embalses 2019/2020	20
Figura 21.	Diversos Tipos de Tranques Rurales	20
Figura 22.	Esquema de Recarga de Acuífero	21
Figura 23.	Sistema de Distribución del Agua (Ejemplo)	22
Figura 24.	Sistemas de Distribución	22
Figura 25.	Estudio Hidrológico de Probabilidad de Excedencia	23
Figura 26.	Relación Suelo Planta Agua Atmósfera	24
Figura 27.	Esquemas de Lisímetro de Drenaje [A]; Lisímetro de Pesada [B]	25
Figura 28.	Instrumentos para la medición de la humedad del suelo	26
Figura 29.	Instrumentos para estimar la demanda hídrica de la atmósfera	27
Figura 30.	Instalaciones para estimar estatus hídricos de las plantas	27
Figura 31.	Evapotranspiración Potencial (ET _o), Evapotranspiración del Cultivo (ET _c) y Coeficiente de Cultivo (K _c).	28
Figura 32.	Evolución de la Superficie y Consumo de Agua de las Nueve Principales Especies Frutales	28
Figura 33.	Campo Preparado para el Riego por Tendido	29
Figura 34.	Esquema de Mojamiento del Suelo en Riego por Surco sin Diseño Adecuado	30
Figura 35.	Desarrollo de Curvas de Avance y Retroceso en el Surco con Q _{MNE}	30
Figura 36.	Distanciamiento entre Surcos Adyacentes según Tipo de Suelo	30
Figura 37.	Riego por Surcos Rectos [A], Surcos en Curva de Nivel [B]	31
Figura 38.	Riego por Surcos. Cabezal tipo Riego Californiano [A], Campana Distribuidora Riego	31
Figura 39.	Riego por Aspersión.	32
Figura 40.	Algunos Tipos de Aspersores.	32
Figura 41.	Microaspersores para Diversos Usos	33
Figura 42.	Goterros. En Línea [A], Botón [B], Salidas Múltiples [C], Incorporados [D]	33
Figura 43.	Esquema de Plano para Riego por Microaspersión o Goteo	33
Figura 44.	Calidad del Agua en Algunos Ríos 2019 (porcentaje sobre la norma CH 1333)	36
Figura 45.	Descarga de Riles a Alcantarillado y Aguas Superficiales, m ³ x10 ³ / año	37
Figura 46.	Descargas en Aguas Subterráneas (ton)	37
Figura 47.	Sistema de asignación de puntajes a los proyectos según criterio de evaluación	39



Figura 48.	[A] Trailla; [B] Niveladora; [C] Plano Topográfico	40
Figura 49.	Riego Californiano. Esquema de Sistema Fijo (A), Sistema Móvil (B) y Sistema Móvil (C)	40
Figura 50.	Impacto del SIGESH	41
Figura 51.	Área de Cobertura y Estación Meteorológica	42
Figura 52.	Diferentes Sistemas de Riego de Bajo Costo	42
Figura 53.	Brecha y riesgo hídrico de las cuencas: Copiapó, Aconcagua, Maipo, Maule, Lebu y Baker	44
Figura 54.	ONU. Objetivos de Desarrollo Sostenible	44
Figura 55.	Relación entre tres conceptos cuyas fronteras son relativamente permeables	45
Figura 56.	Brechas que debe Considerar la Gobernanza del Agua	45
Figura 57.	Herramientas con se está Abordando la Brecha Política en Chile	46
Figura 58.	Reforma al Código de Aguas (ejes principales)	46
Figura 59.	Instituciones con Algún Grado de Injerencia en el Agua	49



PRESENTACIÓN

El agua, elemento natural e integrante de los ecosistemas, es fundamental para el sostenimiento y la reproducción de la vida en el planeta ya que constituye un factor indispensable para el desarrollo sostenible de los procesos biológicos que la hacen posible. Desde 2010 el acceso al agua fue consagrado como derecho humano fundamental por Naciones Unidas y la protección de las fuentes de agua dulce está priorizada como uno de los Objetivos del Desarrollo Sustentable (ODS-6), llamándose a los países a incluir la inseguridad hídrica como un desafío clave en las políticas de adaptación al cambio climático. Las características naturales de Chile hacen que la distribución del agua no sea homogénea, tanto en cantidad como en calidad, y que, por lo tanto, existan zonas del norte y centro del país donde se reportan déficits.

El documento, preparado por el Dr. Eduardo Salgado, Académico experto en el tema de los recursos hídricos, pretende contribuir al entendimiento de la importancia de proteger el agua en Chile donde existían en 2020, 116 comunas de 6 regiones en estado de Emergencia Agrícola debido a la crítica situación hídrica ocurrente desde hace más de diez años. Entre sus causas multidimensionales se destaca especialmente la debilidad y fragmentación de las estructuras de gobernanza que pueden conducir a la formulación de políticas sectoriales futuras poco integradas. Nuestra institución espera, de este modo, contribuir a la difusión del conocimiento sobre el recurso, su acceso y su regulación que promueva y permita la planificación de políticas de I+D aplicables al desarrollo sostenible de la producción agrícola enfrentada al cambio ambiental.

Juan Izquierdo Fernández

Presidente

Academia Chilena de Ciencias Agronómicas

Período 2019-2021



INTRODUCCIÓN

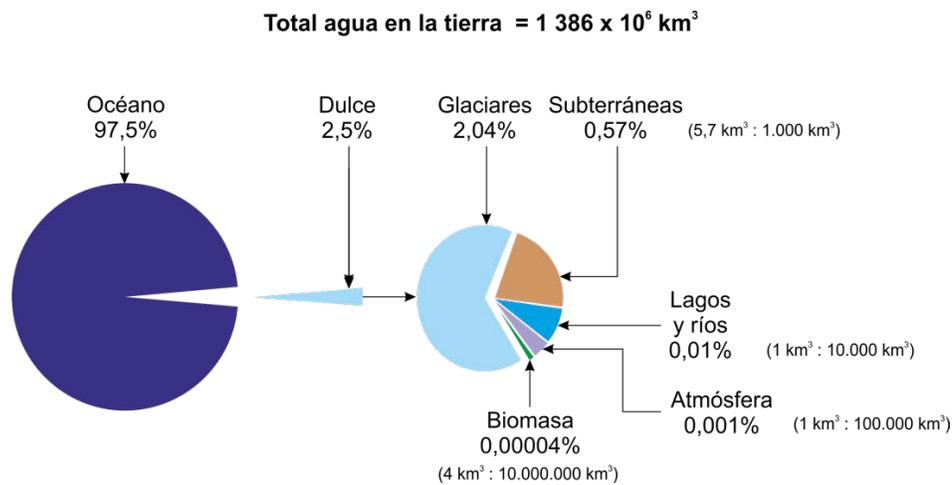
Como resultado de un ciclo de conferencias denominadas mesa del agua, organizado por la Academia Chilena de Ciencias Agronómicas en el año 2020, se presentaron mociones sobre diversas temáticas relacionadas principalmente con el uso del agua por la actividad agropecuaria en Chile. Hicieron valiosos aportes Oscar Miranda N, ingeniero agrónomo, MS; Cesar Morales E, ingeniero agrónomo, Dr; Samuel Ortega F, ingeniero agrónomo, PhD; Carlos Estévez V, abogado y el autor de este documento, Eduardo Salgado V, ingeniero agrónomo, PhD. Con el fin de aprovechar este material para hacer una contribución pública al debate sobre el agua, su uso beneficioso y regulaciones, el Directorio de la Academia solicitó la preparación de un texto que resumiera las contribuciones recibidas.

Así surge este documento que además de los aportes mencionados incorpora un conjunto de elementos relacionados, con el propósito de contribuir al desarrollo del lenguaje especializado en personas que sin ser profesionales del rubro deben participar en el debate. El documento, en consecuencia, incluye conceptos y datos sobre aspectos generales del agua en la Tierra, usos a nivel mundial y en Chile, prácticas de riego y gobernanza.

La idea de este documento es que si más personas conocen información técnica sobre el tema, el diálogo público se facilitará enormemente. Se incurrirá en menos errores conceptuales, se dimensionarán con más precisión los datos y se abrirán vías de comunicación con las fuentes de información confiable. Se espera que este trabajo sea de utilidad para todos quienes deban involucrarse directa o indirectamente con el agua.

EL AGUA EN LA TIERRA

En la Tierra el agua se encuentra en diversas formas y lugares. Las formas pueden ser: agua sólida (hielos y nieves), agua líquida y agua gaseosa (vapor). El cambio de una forma o estado físico a otra depende principalmente del intercambio de calor. Si el agua en estado sólido es calentada pasa al estado líquido y si ésta es calentada, pasa al estado de vapor. El enfriamiento provoca los procesos inversos. Este efecto está condicionado por otras variables que influyen en determinar la cantidad de calor necesario en cada caso, por ejemplo la presión atmosférica, el contenido de sales, entre otros. Respecto de los lugares el agua se encuentra mayoritariamente en los océanos, glaciales, depósitos subterráneos o acuíferos, ríos, lagos, atmósfera y en la biósfera (plantas y animales). La Figura 1 muestra las cantidades y proporciones en que el agua se encuentra presente en los diversos lugares.



Fuente: USA. 2017-A.

Figura 1. Distribución del Agua en la Tierra

CICLO DEL AGUA

El Ciclo del Agua es un ciclo porque el agua que se encuentra en océanos, lagos, ríos y vegetación recibe la energía calórica desde el sol, se calienta y pasa al estado de gaseoso (vapor). El vapor tiene menor densidad que el aire frío y por tanto asciende. A medida que el vapor sube en la atmósfera pierde calor, se enfría, y se condensa en pequeñas gotitas de agua líquida que forman las nubes. Estas nubes son arrastradas por los vientos, y eventualmente precipitan en forma de lluvia o, en las partes más altas, como nieve. Si la precipitación ha sido en forma de lluvia, el escurrimiento hacia las partes más bajas se produce de inmediato. Si la precipitación ha sido en forma de nieve, esta se acumula en las altas cumbres¹ y con las temperaturas más altas del período estival se calienta

¹ Los glaciares cubren un 10-11% de toda la superficie de la Tierra. Si todos los glaciares se derritieran, el nivel del mar subiría alrededor de 70 metros. Durante la última edad de hielo el nivel del mar se encontraba alrededor de 122 metros más abajo del nivel a que está actualmente, y los glaciares cubrían casi un tercio de la superficie terrestre. En el último período cálido, 125,000



y pasa al estado líquido, lo que genera su escurrimiento hacia las partes más bajas. En ambos casos el agua puede escurrir en forma superficial (cascadas, quebradas, esteros, ríos) o puede infiltrarse en el suelo y escurrir de manera subsuperficial. Cualquiera sea la vía del escurrimiento el agua pasará a alimentar lagos, ríos, vegetación y finalmente volverá al mar y así cierra el ciclo.

La vegetación por su parte requiere cantidades importantes de agua para mantener sus funciones fisiológicas (lo que será detallado más adelante). Las plantas absorben agua a través de sus raíces y por mecanismos de diferencias de presión la llevan hasta sus hojas donde ocurre el proceso fisiológico llamado transpiración, es decir el paso del agua en estado líquido al estado gaseoso (vapor) y eliminación hacia la atmósfera a través de los pequeños orificios existentes en las hojas llamados estomas. En la Figura 2 se presenta una esquematización del llamado Ciclo del Agua.

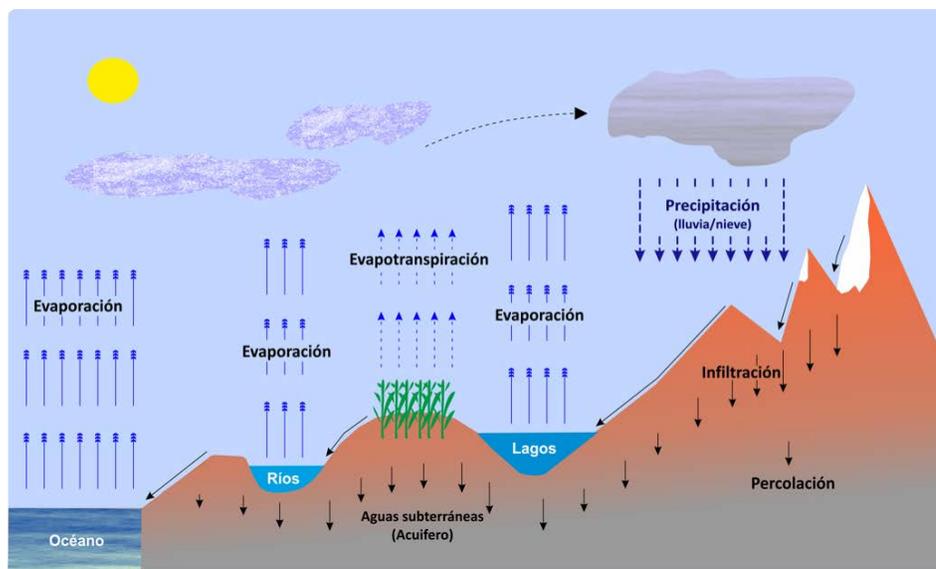
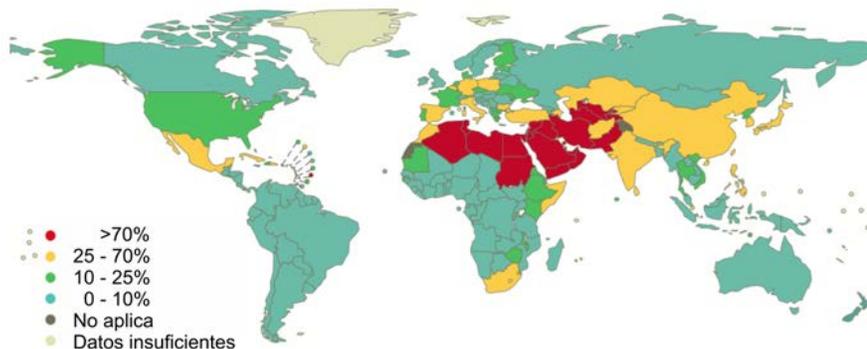


Figura 2. Esquema del Ciclo del Agua

Cabe señalar que el esquema de la Figura 2 representa la situación global del ciclo del agua que no necesariamente ocurre completo en un mismo lugar. Es así que en la Tierra existen importantes diferencias geográficas respecto de la abundancia de agua dulce proveniente de las precipitaciones (Figura 3). Este fenómeno se explica mayormente por el desplazamiento de las masas de aire húmedo y de las nubes por el viento, —que principalmente es generado por la llamada Circulación General de la Atmósfera—, y los efectos del relieve local. Esto significa que en ciertas partes del planeta se generan desiertos y en otras zonas abundancia de agua (Figura 4).

años atrás, los mares estaban alrededor de 5.5 metros más arriba del nivel al que están hoy. Alrededor de tres millones de años atrás, los mares podrían haber estado 50 metros más arriba. (Fuente: Centro Nacional de Datos de Nieve y Hielo, USGS)



Fuente: ONU-B, 2018

Figura 3. Nivel de estrés hídrico físico por región

El océano², como se aprecia, es el gran reservorio de agua, provee aproximadamente el 90% de la evaporación hacia la atmósfera. No obstante, no es posible utilizar directamente el agua del mar para la mayor parte de las actividades humanas debido a su alto contenido de sales (30 gramos por litro). El proceso de evaporación natural significa que las sales quedan en el océano y por tanto cuando el vapor se condensa y pasa al estado líquido en las nubes lo hace como agua dulce. A su vez el agua dulce recorre varios caminos hasta llegar nuevamente al mar, caminos en que adquiere sales, partículas sólidas de diversos tamaños, productos biológicos, desechos, contaminantes, que pueden deteriorar significativamente su composición y calidad.

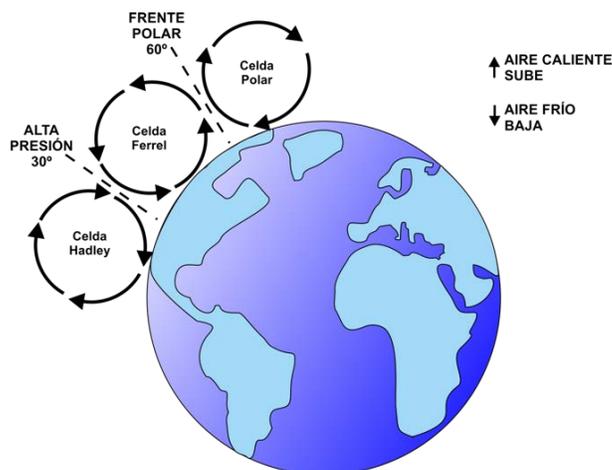


Figura 4. Esquema de circulación general de la atmósfera (se duplica en ambos hemisferios)

² El océano cubre aproximadamente el 70% de la superficie de la Tierra. Por otra parte, la Corriente del Golfo se mueve a 97 km/día con más agua que todos los ríos de la Tierra (USGS)



LA CUENCA HIDROGRÁFICA

La cuenca —o *divortium aquarum*— esta formada por todo el territorio contenido al interior de la línea que une las altas cumbres o “línea divisora de aguas” y el sistema hidrográfico compuesto por quebradas, esteros, ríos afluentes y río principal que finalmente desemboca en el mar. En el interior de la cuenca existen diversos espacios tales como altas cumbres, bosques, praderas, terrenos de secano, terrenos regados, viaductos, ciudades y otros. En general las cuencas pueden clasificarse en tres tipos principales: (a) las que drenan al mar; (b) las que drenan a un lago que no tiene salida al mar y, (c) las que el agua se evapora o se infiltra a capas profundas. Independientemente de su sistema de drenaje, la cuenca es la unidad hidrológica para las aguas superficiales ya que cuenta con un sistema de alimentación por las precipitaciones (lluvia y nieve), ingresos, y un sistema de drenaje, egresos. En la Figura 5 se presenta como ejemplo la delimitación de la cuenca del río Aconcagua.

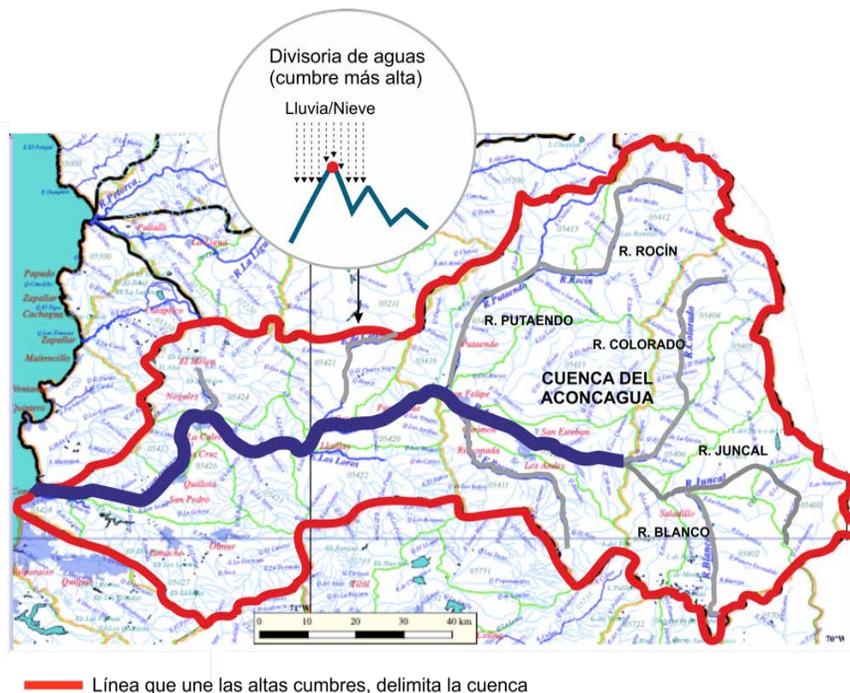
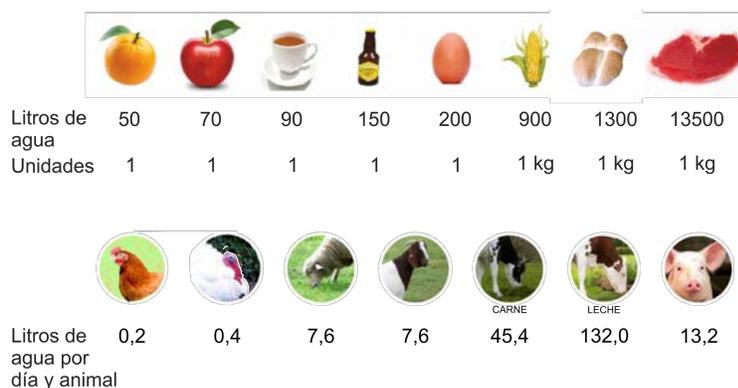


Figura 5. Esquema de una Cuenca Hidrográfica (Ejemplo Cuenca del Aconcagua)

USO DEL AGUA

El agua es uno de los elementos esenciales para la vida. La célula, animal o vegetal, como unidad básica de todo sistema biológico requiere agua para su funcionamiento. A nivel de organismos los animales y vegetales utilizan agua para cumplir diversas funciones. Una persona promedio requerirá beber aproximadamente 800 litros de agua por año. Por otra parte, es interesante observar el consumo de este vital elemento para la producción de algunas unidades de alimentos básicos (Figura 6)³.



Fuente: BID, 2015

Figura 6. Demanda de agua (litros) para la producción de diversas unidades de alimentos

USOS Y DISPONIBILIDAD DEL AGUA EN EL MUNDO

A nivel mundial los principales usos del agua son el doméstico, también llamado municipal o uso directo para la vida humana; el uso industrial para el procesamiento de diversos productos y la extracción minera, y el uso agropecuario para el riego y en menor medida limpieza de productos y sitios. La Figura 7 muestra la distribución porcentual promedio mundial entre los diferentes tipos de uso del agua. Se observa que a nivel mundial el sector agropecuario utiliza dos tercios del todo el consumo.

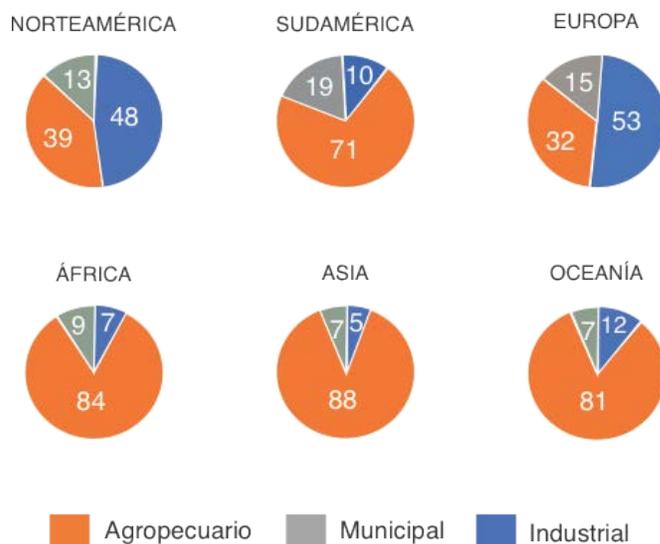
³ Se puede agregar que se necesitan 870 litros de agua para producir 1 litro de vino y 610 litros de agua para producir 1 tonelada de concentrado de cobre.



Fuente: ONU-B, 2018

Figura 7. Distribución del Uso del Agua, Promedio Mundial

No obstante lo anterior, la Figura 8 señala que existen pronunciadas diferencias en las proporciones entre los principales usos que se presentan en los diversos continentes. Se aprecia que en los países más industrializados el uso preferente es en la industria, mientras que la agricultura se mantiene como el segundo mayor usuario. En el caso de los restantes conglomerados la agricultura pasa a ser el mayor consumidor en una proporción considerablemente más alta que el promedio mundial.

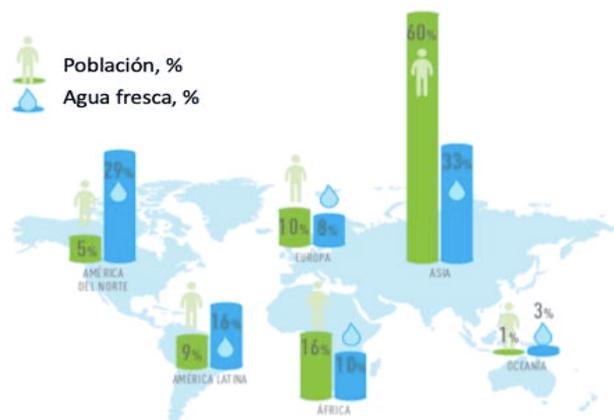


Fuente: ONU-B, 2018

Figura 8. Comparación de usos del agua entre continentes

Un aspecto de interés adicional es observar la relación entre la magnitud de la población de cada continente respecto de su disponibilidad de agua. La Figura 9 muestra como en América (norte y sur) la población corresponde al 14% del total mundial pero la disponibilidad de agua es del 46%.

En el otro extremo en Asia la población alcanza al 60% del total mundial y la disponibilidad de agua solo al 33%. En tanto que en Europa y África las proporciones son algo más equilibradas. Todo esto a nivel continental, lo que significa que eventualmente hay países o regiones cuyas proporciones pueden diferir notablemente.



Fuente: Torras, 2017

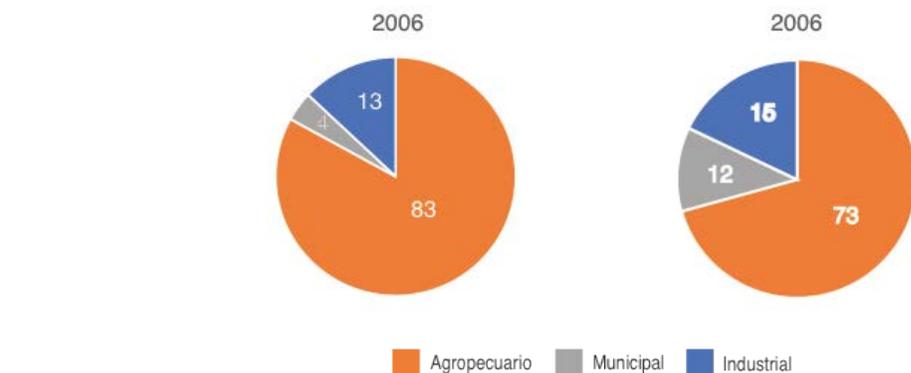
Figura 9. Relación entre magnitud de la población y disponibilidad de agua a nivel continental

A nivel mundial se observa que los grandes problemas del lado de la oferta son los impactos económicos y sociales de las grandes sequías (2014 adelante) especialmente en el mundo desarrollado; y que la mayoría de las cuencas y fuentes de agua están sobre explotadas, contaminadas o al límite de sus capacidades. Por el lado de la demanda los principales problemas son el crecimiento de la población y que el desarrollo socioeconómico incrementó la demanda por agua, la que en 2050 se estima alcanzará un 30% más que el nivel actual. Además se estima que el 52% de la población mundial enfrentará severa escasez de agua y que el 45% del PIB mundial estará en riesgo⁴.

USOS Y DISPONIBILIDAD DEL AGUA EN CHILE

En general las proporciones de uso del agua en la agricultura son muy similares el promedio de los países menos industrializados esto es alrededor del 80% del consumo. En el período 2006 – 2015 se observa un incremento significativo en el uso municipal y doméstico y, un pequeño incremento en el área industrial, ambos a costa de la correspondiente reducción del uso agropecuario (Figura 10). Como se verá más adelante las regulaciones sobre los derechos de uso del agua en Chile se encuentran contenidas en el Código de Aguas y leyes complementarias.

⁴ Fuentes: OCDE, ONU, IFPRI, Foro Económico Mundial



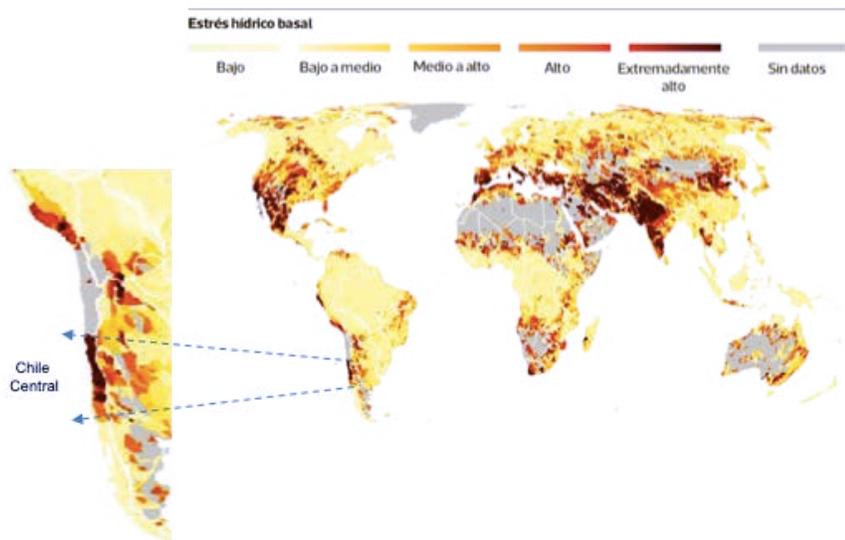
Fuente: Chile-C

Figura 10. Usos del agua en Chile. Comparación entre 2006 y 2015

Por otra parte, la Figura 11 muestra la distribución y los grados de escasez del agua en el planeta proyectados como consecuencia del cambio climático. Se aprecia que en la zona central de Chile se presentaría una condición de extremadamente alto estrés hídrico, al igual que en el sur de los Estados Unidos, México, la cuenca del Mediterráneo, el Medio Oriente incluyendo partes importantes de India.

Sobre un total de 164 países del mundo, Chile aparece en el grupo de alto estrés hídrico. En el territorio desértico, árido y semiárido, vive el 60% de la población y se produce más del 70% del PIB que en alto grado es dependiente del agua, o contiene este elemento –especialmente el sector agro-exportador. Entre 1990 y 2018 el PIB creció 3,3 veces y la demanda total de agua entre 2 y 3 veces. El cambio climático reduce la disponibilidad de agua y aumenta fuertemente la vulnerabilidad del país (Morales, 2020⁵).

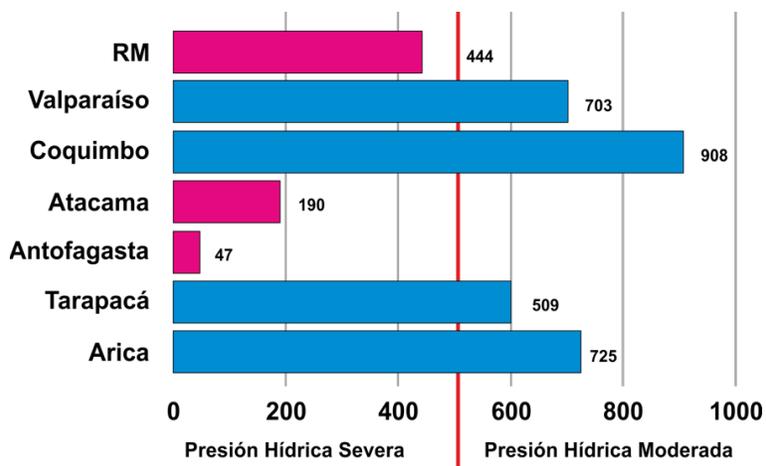
⁵ César Morales E. Centro de Análisis de Políticas Públicas (CAPP), Instituto de Asuntos Públicos. Universidad de Chile



Fuente: Sengupta y Welyl. 2019

Figura 11. Grados de estrés hídrico proyectado para diversas zonas del mundo

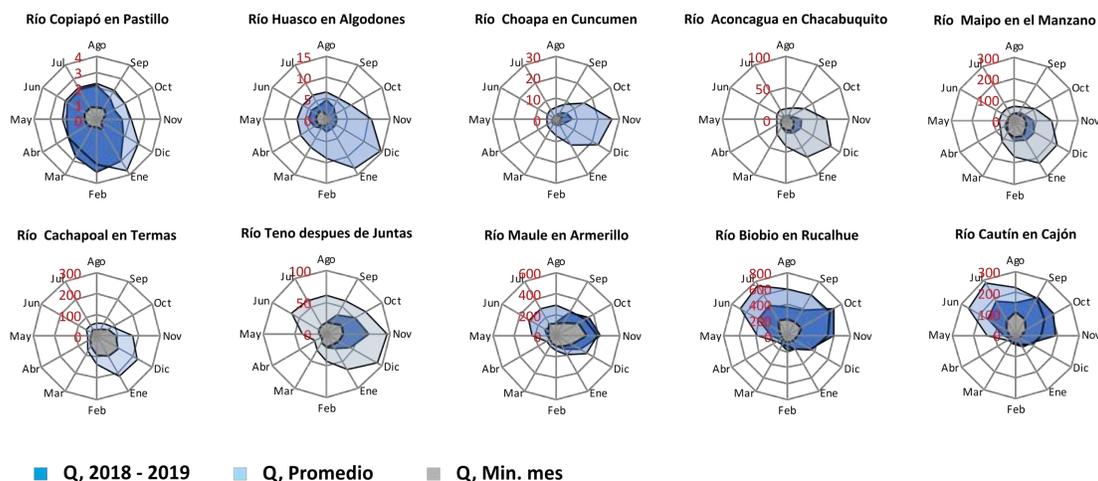
Un análisis más detallado revela que las regiones de Antofagasta, Atacama y Metropolitana se encuentran bajo el nivel crítico de disponibilidad de agua por habitante/año y que las restantes regiones de la zona más crítica tienen una situación de estrés hídrico moderado (Figura 12).



Fuente: Morales, 2020

Figura 12. Escorrentía (m³/persona/año)

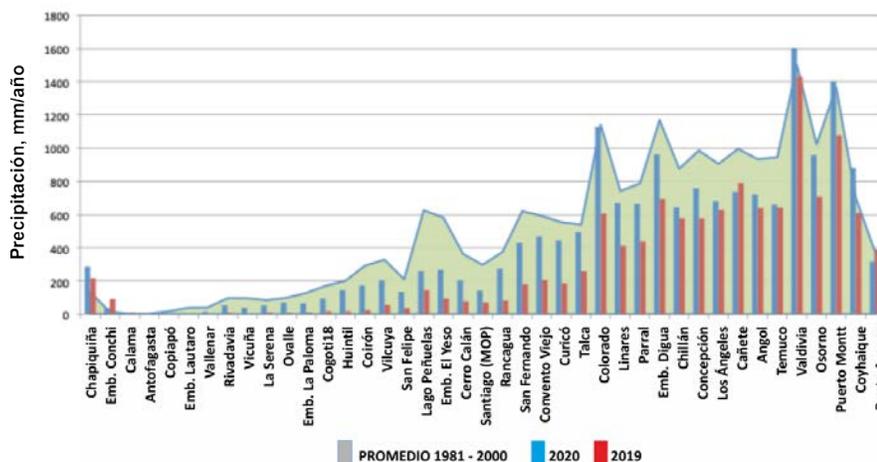
Asimismo, los ríos Choapa, Aconcagua, Maipo, Teno y Maule, ubicados en la zona más crítica, durante 2018-2019 muestran una fuerte reducción de sus caudales, la que también se observa en el Bío-Bío aunque en menor grado (Figura 13).



Fuente: Morales, 2020

Figura 13. Caudales (Q) promedio 2018-2019 comparado con el promedio histórico 1981-2010 (m³/s)

Por otra parte, en la Figura 14 se observa el comportamiento de las lluvias respecto del año considerado normal, es decir el promedio entre 1981 y 2000 en todo Chile. Como se aprecia, prácticamente en todo el país las precipitaciones registradas en los dos últimos años (2019 y 2020) fueron menores que el año normal y las del 2019 en general menores que el 2020, aunque esto último se presenta más marcado en la llamada zona crítica.



Fuente: Morales, 2020

Figura 14. Déficit/superávit de Precipitaciones Respecto de la Normal



RIEGO EN CHILE

ALGUNOS DATOS HISTÓRICOS

Desde antiguo y hasta inicios del siglo XIX⁶ todas las acciones para el uso del agua, es decir la construcción de canales y algunos pequeños embalses, fueron iniciativas privadas. No obstante, la primera intervención estatal ocurrió en 1816 con algunas normas para la venta de regadores y la definición de elementos básicos de infraestructura de riego como regadores, marcos partidores y bocatomas, promulgadas por el Director Supremo don Bernardo O'Higgins. A continuación se fueron dictando leyes y normas que fijaron el caudal de un regador, autorizaciones para abrir nuevos canales en varios sectores de la zona central, se crea la sección Hidráulica y Navegación Fluvial del Ministerio de Industrias y Obras Públicas. En 1835 se promulga la primera ley de obras públicas en la que se otorga la prioridad al riego. En 1872 se establecen ordenanzas para la distribución del agua en diversas cuencas, y en 1875 se da inicio al estudio del Código Rural⁷, del cual se realizaron varias versiones, ninguna de las cuales llegó a ser ley. Ya en 1928 se promulga la ley general de regadío en que se establecen normas para estudios, construcción, explotación y financiamiento de infraestructura de riego. Por otra parte, en 1927 se inicia la discusión para la formulación de un código de aguas, cuyas versiones principales⁸ también fracasaron hasta que en 1948, luego de extensas discusiones parlamentarias se aprobó el primer Código de Aguas (ley 8.944) cuya aplicación debió ser suspendida debido a fuertes polémicas. Solo en 1951 se aprueba el primer código, que fue reemplazado en 1967 con la ley de Reforma Agraria que introdujo significativas modificaciones. Por último en 1981 se estableció el tercer código que en los años siguientes ha experimentado diversas modificaciones.

DATOS ACTUALES DE RIEGO EN CHILE DE INTERÉS GENERAL

Según Miranda O (2020)⁹ existen 116 comunas de 6 regiones en estado de Emergencia Agrícola debido a la crítica situación que se presenta desde hace 10 años. Indica que el Consejo de Políticas e Infraestructura (CPI) atribuye esta situación a causas multidimensionales. Debido a la disminución de las precipitaciones y por tanto del caudal de los ríos, la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) propone varias medidas, entre las cuales: construir obras de acumulación (tranques y embalses) mejorar la gestión del recurso hídrico, aumentar la eficiencia de uso y explotar nuevas fuentes de agua, tales como desalación, reutilización de aguas, recarga de acuíferos, captación de aguas lluvias y explotación de pozos profundos. El autor señala que la Fundación Chile indica como principal causa del problema la mala gestión del recurso a nivel de cuenca, la carencia de adecuada coordinación entre las instituciones públicas y de éstas con las privadas, además de descoordinación

⁶ Referencias:

Sandoval JJ. 2003. El Riego en Chile. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas. Santiago, Chile

Vergara BA. 1991. La Codificación del Derechos de Aguas en Chile (1875 – 1951). Revista de Estudios Histórico-Jurídicos [Sección Historia del Derecho] XVI Valparaíso, Chile

⁷ 1875, Lastarria; 1884, Ravest; 1886, Vásquez

⁸ Moreno (proyecto de Código de Aguas). Varias revisiones y mejoramientos (1928, 1930, 1936)

⁹ Miranda O, 2020. Tecnologías de Riego de Bajo Costo para la Pequeña Agricultura. Academia de Ciencias Agronómicas.



entre las organizaciones de usuarios (OUA). Agrega que según estudio de la Universidad del Desarrollo (UDD) el mercado del agua no funciona.

En la actualidad en Chile se riegan 1,2 millones de hectáreas¹⁰ de las cuales solo 300.000 se encuentran tecnificadas, con sistemas de riego por goteo, microaspersión, aspersión con eficiencias cercanas al 90%. Por otra parte, existen en Chile 330.000 agricultores de los cuales el 75% pertenecen a la llamada pequeña agricultura que, en general, no tienen la posibilidad de tecnificación, esto es unas 900.000 ha. Para la tecnificación de sus sistemas de riego los pequeños agricultores deben enfrentar altos costos de inversión (USD 2.000/ha) y de operación (energía); el sistema de turnos semanales lo que sin contar con tranques reguladores, impide el riego de alta frecuencia; y la necesidad de instalar filtros automáticos de alto costo debido a los altos contenidos de sedimentos que se presenta en los ríos Aconcagua, Cachapoal, Teno, Tinguiririca y Maule. Si esta gran superficie se tecnificara se podría liberar grandes volúmenes de agua, con lo que se podría resolver una parte de los problemas de escasez.

CAPTACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS Y EFICIENCIA

Aguas superficiales

Como muestra la Figura 2 las fuentes de agua para la agricultura son las aguas superficiales, provenientes del escurrimiento superficial de lluvias y deshielos de las zonas altas, y las aguas subterráneas contenidas en los acuíferos alimentados por la infiltración y percolación. Las aguas superficiales escurren desde las zonas altas a través de quebradas, esteros, ríos pequeños y ríos, desde donde pueden ser captadas, en parte y de acuerdo a derecho, para los diversos usos. Por su parte, las aguas subterráneas pueden ser obtenidas a través de pozos de acuerdo a la normativa que los rige según el uso de las aguas extraídas.

En el país la mayor parte de las aguas superficiales se captan a través de canales derivados de los ríos. Se emplea una variedad de sistemas de captación río-canal, algunos de construcción sólida, tecnificados, con compuertas tradicionalmente de operación manual y en los últimos años con telecomandos, con buenos niveles de precisión y eficiencia de captación. Otros de construcción tradicional a base de las llamadas “patas de cabra”, frágil, con algunos mejoramientos de duración limitada, con baja precisión y baja eficiencia (Figura 15). En general los sistemas sólidos son capaces de soportar crecidas moderadas a moderadas altas de los ríos, por el contrario los sistemas frágiles muchas veces son parcial o totalmente destruidos con crecidas moderadas. En un panorama de escasez hídrica estas estructuras debieran ser altamente tecnificadas de manera de evitar por un lado las pérdidas y por otro asegurar la correcta asignación del agua de acuerdo a derecho.

¹⁰ Cifra no muy diferente de la superficie que se regaba en 1914 de 1,03 millones de ha. Salgado E, 2020. Riego en Chile. Breve Historia en Quince Minutos. Academia de Ciencias Agronómicas.



Figura 15. [A] Bocatoma Tecnificada; [B] Bocatoma Tradicional

Aguas subterráneas¹¹

Las aguas subterráneas se captan a través de pozos entre los que se distinguen al menos dos grandes tipos: pozos someros o norias y pozos profundos. Los pozos someros se utilizan para la extracción de agua desde napas relativamente poco profundas, esto es como máximo entre 15 y 20 m desde la superficie del terreno. Cuando la profundidad de extracción es mayor se recurre a los llamados pozos profundos, con un diseño y funcionamiento muy diferente a los anteriores.

La ubicación del pozo debe respetar ciertas reglas en relación a otros pozos existentes. Se estima que la distancia, como mínimo de 200 m entre uno y otro que fija la norma, evita que se produzcan interferencias durante la operación. No obstante, por acuerdo entre las partes involucradas y con autorización de la DGA esta distancia podría ser menor. Esta norma no rige para consumo humano y/o abrevadero.

Para la legalización del derecho de aprovechamiento de agua subterránea se requiere solicitarlo a la DGA y cumplir diversos requisitos entre los que destacan (i) la existencia de disponibilidad en el Sector Hidrológico de Aprovechamiento Común; (ii) solicitar un determinado caudal respaldado por las pruebas de bombeo correspondientes y, (iii) dar cumplimiento a lo establecido en el artículo 140 del Código de Aguas. El derecho de aprovechamiento tendrá plena validez legal una vez inscrito en el Conservador de Bienes Raíces y Aguas correspondiente.

Pozo somero

En general corresponde a una excavación manual o muy ligeramente tecnificada, cuya profundidad debe considerar las posibles fluctuaciones que experimenta la napa a través de la temporada. El diámetro del pozo, comúnmente entre 1 y 6 m, depende de varios factores entre ellos del caudal de agua que se espera extraer, del tipo de suelo del lugar, de la necesidad de acumulación, entre otros. Para la extracción del agua lo más habitual es utilizar una bomba centrífuga, aunque también es posible usar bomba de inyección o bomba sumergible. El problema de la bomba centrífuga que la máxima profundidad de la cual puede captar agua es de unos 8 m o algo menos por seguridad. En caso de napas algo más profundas la bomba puede ubicarse dentro del mismo pozo ya sea en forma fija o sobre una plataforma flotante. La bomba de inyección no presenta este tipo de limitaciones pero su capacidad es menor (Figura 16).

¹¹ Decreto Supremo No. 203/2014. Ministerio de Obras Públicas

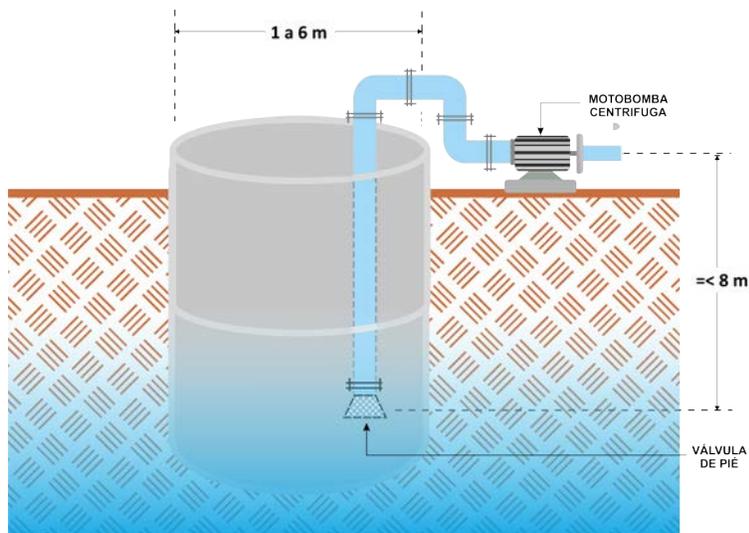


Figura 16. Esquema de Pozo Somero

Pozo profundo

Como su nombre lo indica corresponde a una perforación que permite extraer agua desde acuíferos ubicados a 30 m o más desde la superficie del terreno. En este caso la perforación necesariamente debe realizarse con maquinaria especializada, en la que se introduce una tubería generalmente de diámetro de entre 10 y 12 pulgadas. Esta tubería debe ser perforada en su tramo en contacto con el agua de la napa para permitir su entrada desde donde será impulsada por la bomba sumergida ubicada al final del tubo. Para evitar el posible arrastre de partículas sólidas al interior de la tubería y así disminuir la calidad del agua a impulsar y a la vez impedir el taponamiento de las ranuras, el tubo de acero debe ser rodeado por un filtro de gravas angulosas (Figura 17).

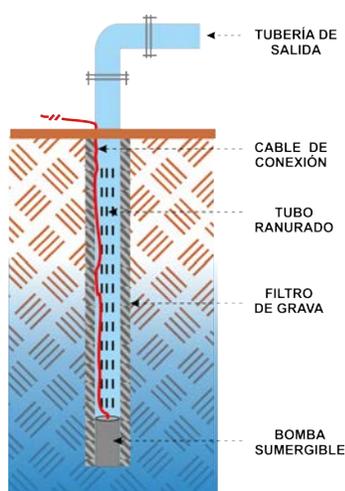


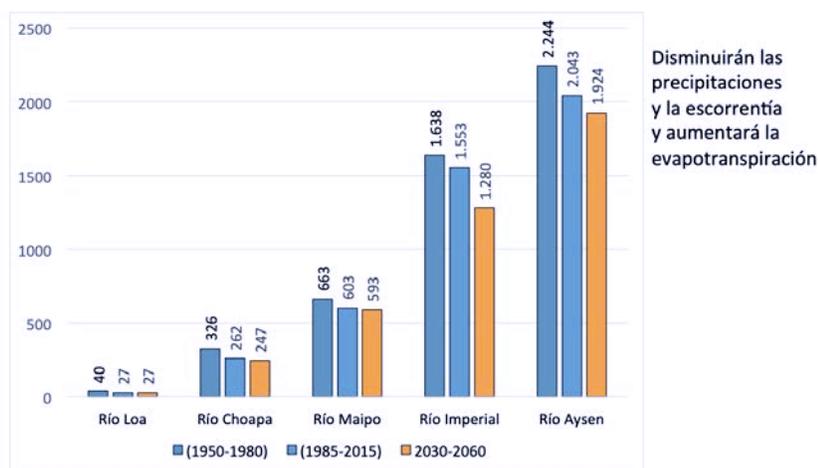
Figura 17. Esquema de Pozo Profundo



La acumulación de agua en Chile puede tener distintos significados y procedimientos según la zona en consideración. En las zonas norte y centro-norte, con un balance hídrico claramente deficitario¹², la idea es acumular una parte importante de la descarga de agua dulce al mar, cuando existe. Esto no obstante, debe respetar los caudales mínimos necesarios para la sobrevivencia de la flora y la fauna en toda la extensión del respectivo río: “caudal ecológico”. El proceso de acumulación en estos casos puede implementarse de al menos dos formas principales, no excluyentes: (a) la construcción y operación de embalses y, (b) la construcción de zonas de infiltración para la recarga de acuíferos. En ambos casos con tamaños y diseños apropiados a la hidrología del lugar.

En las zonas con balance hídrico favorable, la acumulación en términos estrictos no es necesaria, aunque si manejar reservas para la producción de servicios específicos como la preservación ecológica, la generación de energía eléctrica, la acuicultura, la recreación y otros menores.

Una visualización de las zonas y sus respectivos balances hídricos se puede observar en la (Figura 18). Al comparar períodos de 30 años, desde 1950 hasta la proyección al 2060, en los cinco casos considerados se observa un decrecimiento de las disponibilidades de agua.



Fuente: Morales, 2020

Figura 18. Precipitación Histórica y Proyectada en Cinco Zonas Climáticas de Chile, mm/año

Embalses

Estructuras de acumulación de aguas superficiales de muy diversos diseños y tamaños. En Chile el término embalse se ha reservado para estructuras de gran tamaño y para las de menor se utiliza el

¹² $P = ET + Es \pm A_{sub} \pm A_{sup} \dots$ Si A_{sub} y $A_{sup} > 0$

Donde:

- P : precipitación/año
- ET : evapotranspiración/año
- Es : escorrentía superficial/año (descarga al mar)
- A_{sub} : almacenamiento subterráneo/año (acuífero)
- A_{sup} : almacenamiento superficial/año (embalse)



término tranque. No obstante, esta última también en muchas ocasiones se aplica a las de gran tamaño. Por tanto, no existe una definición unívoca. Los grandes embalses, en general, son lagos artificiales generados como consecuencia de la construcción de una presa sobre un río, estero u otra corriente. La presa misma —también llamada cortina— puede ser de varios tipos, en algunos se construye con una pared de hormigón armado, en otros con un núcleo de arcilla anclado recubierto aguas arriba y aguas abajo por material sucesivamente más grueso hasta alcanza la cubierta más externa con roca. En todos los casos la presa debe estar provista de un sistema de evacuación de crecidas —llamado vertedero— cuyo propósito es dejar pasar rápidamente el exceso de agua que de otro modo pondría en peligro su estabilidad. Este dispositivo es una pieza delicada de todo embalse, que adquiere su importancia según el volumen de agua que almacena, su ubicación respecto de lugares críticos aguas abajo y otras consideraciones hidrológicas. Por ejemplo un embalse de gran tamaño debe tener un vertedero capaz de evacuar el mayor caudal que se pudiera producir una vez cada mil años.

Además de lo anterior el embalse debe disponer de un sistema de medición del volumen de agua almacenado en un momento dado, un sistema de descarga controlada para entregar el agua a los usuarios y, un túnel —llamado *bypass*— que permita desviar las aguas directamente hacia el río. En la Figura 19 se presentan vistas de los principales componentes.

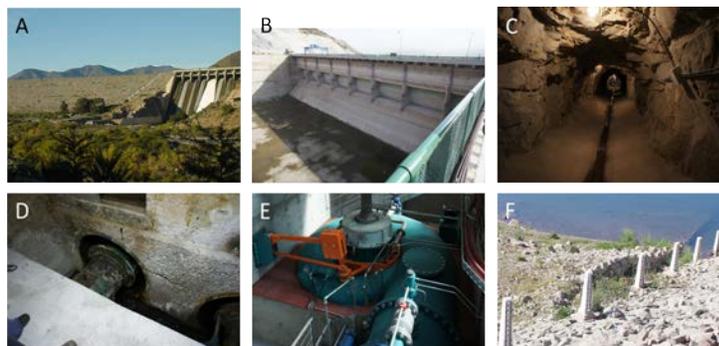
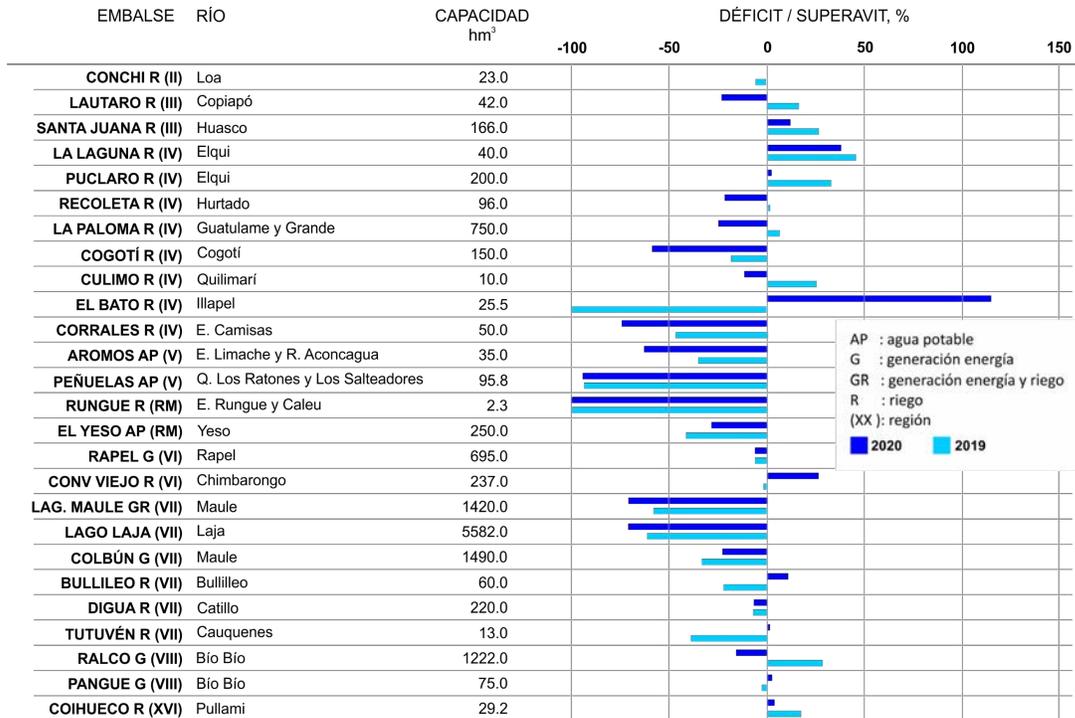


Figura 19. A - E (Eb. La Paloma, Ovalle). A. Presa y Vertedero; B. Detalle Vertedero; C. Túnel ByPass; D. Válvula de Descarga; E. Turbina Producción Electricidad; F. Limnímetros (Eb. Recoleta, Ovalle)

El estado de los principales embalses en Chile en términos del porcentaje de superávit o déficit comparativo entre 2019 y 2020, muestra claramente que la situación más deficitaria corresponde a la llamada zona crítica, entre la región de Coquimbo hasta la del Maule. No obstante, llama la atención que algunos de los embalses de la región de Bío-Bío también muestran déficit aunque menos severos (Figura 20).

Como se ha indicado el término tranque se refiere preferentemente a los acumuladores pequeños, del tipo rural, aunque también algunas veces para referirse a algún embalse. Estas obras son generalmente de tamaño menor comparados con los embalses, comúnmente de al menos uno o dos órdenes de magnitud menor en cuanto a su capacidad de almacenaje. Casi en su totalidad son construidos como excavaciones en la tierra o con muros de tierra para aprovechar una condición topográfica favorable, como una pequeña quebrada o similar. Tradicionalmente el tranque recién

construido perdía una importante cantidad de agua por infiltración y percolación en el suelo, cuyo sellamiento se obtenía en un cierto tiempo a medida que se depositaba en su fondo y paredes el material fino arrastrado por el agua. Actualmente existen geo-membranas que evitan desde la partida las pérdidas de agua en profundidad (Figura 21).



Fuente: Morales, 2020

Figura 20. Déficit/superávit de embalses 2019/2020

Estos tranques pueden ser de tipo individual de cada predio o de una comunidad de regantes que lo ha construido, la que fija las normas de explotación. Son útiles para la acumulación de aguas nocturnas, de turnos periódicos de riego, y especialmente para la posibilidad de utilizar sistemas de riego tecnificados de alta frecuencia. Los problemas importantes de mantención son evitar la acumulación de arena que en el tiempo disminuye la capacidad de almacenaje, y la producción de algas o eutrofización que puede dificultar severamente el uso del agua para el riego presurizado.



Figura 21. Diversos Tipos de Tranques Rurales

Recarga de acuíferos

Una parte importante de las aguas provenientes de las precipitaciones (lluvia y nieve), como parte del proceso natural, infiltran en el suelo y percolan hacia capas profundas (Figura 2), formando los llamados acuíferos. Existen varios factores que condicionan la magnitud y velocidad de estos procesos, los más importantes son la capacidad de infiltración del suelo y la pendiente del terreno en el que cae y/o escurre el agua. Estos procesos naturales claramente son favorecidos cuando el agua cae o escurre en suelos con alta capacidad de infiltración y con pendientes suaves.

La recarga de acuíferos como opción de almacenaje de agua es un proceso artificial, especialmente diseñado para aprovechar y/o adecuar las condiciones de sitios apropiados (Figura 22). Se reconocen varios tipos de construcciones para implementar el proceso de recarga, cuya selección debe ajustarse a criterios ecológicos, sociales y económicos. Respecto de un río, los principales tipos de construcciones para la recarga son: fuera del río, dentro del río y pozos secos. Fuera del río se pueden construir piscinas, galerías, canales o zanjas de infiltración. Dentro del río estanques de percolación, represas subterráneas o descarga de agua de represa.

La evaluación de un proyecto de recarga de acuífero debe considerar los siguientes criterios básicos¹³. Demanda de agua, disponibilidad de una fuente de agua, evaluación hidrogeológica, espacio para capturar y tratar el agua, capacidad y experiencia, gobernanza y sostenibilidad económica, calidad de la fuente de agua (obstrucción), capacidad de almacenamiento del acuífero, impactos en vecinos y ecosistemas, presencia de roca reactiva / fracturada (potencial movilización de arsénico), encuesta sanitaria (fuentes y rutas potenciales de contaminación), evaluación económica detallada.

En general la acumulación de agua en un acuífero presenta algunas ventajas respecto de embalses ya que los eventuales impactos sociales y ambientales son mínimos en comparación. La construcción de las obras de recarga no deberían requerir grandes zonas de inundación, lo que evita el traslado de viviendas y otros, y la construcción de represas que tienen una vida útil determinada. No obstante, la extracción del agua para sus diferentes usos requiere energía de alto costo, al menos hasta ahora, lo que representa una desventaja. Por otra parte, la gestión del acuífero y los derechos de extracción debe ser de mucho mayor intensidad.



Figura 22. Esquema de Recarga de Acuífero

¹³ Guías MAR: Marco operativo para proyectos de recarga artificial de acuíferos. Comisión Nacional de Riego.

Derechos

Tradicionalmente los derechos de aguas para riego se expresaron en regadores. Así lo decreta en 1816 el Director Supremo don Bernardo O'Higgins. Luego en 1819 se fija el caudal de un regador en 26 L/s, agua considerada suficiente para regar una cuadra. Posteriormente, con las sucesivas divisiones y subdivisiones de la tierra se aceptó que para regar una hectárea se requería 1 L/s como caudal continuo, esto es 24 horas por día durante toda la temporada de riego¹⁴. En la actualidad con los sistemas de riego más eficientes esta cifra puede ser reducida a la mitad e incluso a un tercio.

El proceso de distribución de las aguas se realiza a través de compuertas y marcos partidores, graduados de acuerdo a los derechos de cada uno de los segmentos del sistema de distribución. El agua es colectada desde el río (o sección del río en algunos casos) mediante el canal matriz, de acuerdo al derecho de dicho canal (o de la asociación de canalista correspondiente) sobre el río. De este canal puede pasar a uno de carácter secundario, lo mismo de acuerdo a su respectivo derecho y así sucesivamente hasta alcanzar el canal o acequia predial. En la Figura 23 se presenta un ejemplo en que los flujos de cada segmento corresponden al porcentaje de derechos que posee respecto del segmento anterior.

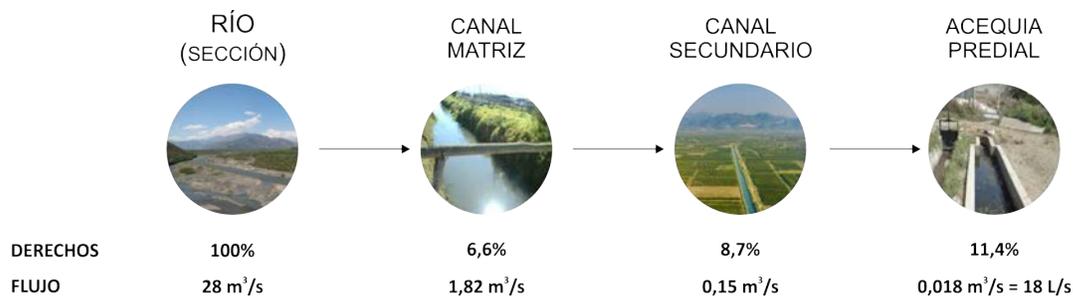


Figura 23. Sistema de Distribución del Agua (Ejemplo)

Eficiencia

La entrega del agua desde el canal principal a los secundarios prediales o comunitarios se realiza en general a base de compuertas y marcos partidores (Figura 24). Estos instrumentos son de moderada precisión y muy vulnerables a cambios que puedan ocurrir en las condiciones del flujo y en el sitio de emplazamiento. Las compuertas automáticas y el entubamiento de canales y acequias representan sistemas modernos de alta precisión y eficiencia.



Figura 24. Sistemas de Distribución: [A] Compuerta; [B] Marco Partidor; [C] Compuerta Lateral; [D] Múltiple

¹⁴ En la zona central de Chile usualmente se consideró la temporada de riego entre el 1 de septiembre y el 30 de abril



Seguridad de riego

En las zonas áridas y semiáridas las variaciones estacionales e interanuales en los ríos pueden ser muy amplias. Las temporadas de sequías generan caudales muy bajos y por el contrario los años de abundancia de agua pueden producirse caudales muy altos fuera de lo común. Frente a esta situación cabe la pregunta respecto del caudal disponible en el río con algún grado de seguridad. Para definir esto se recurre a un estudio hidrológico que consiste en analizar la estadística histórica de los caudales registrados en el río y determinar la probabilidad de cada caudal de ser excedido. Desde luego los caudales menores presentan una alta probabilidad de ser excedidos y lo contrario ocurre con los caudales altos.

En la Figura 25 se presenta un ejemplo para un río cualquiera. Se observa la variación estacional, representada por los meses, y la variación interanual, representada por las curvas de diferentes colores, cada una correspondiente a un año. En todos los años el caudal máximo se registró en el mes de diciembre y en el recuadro se consigna la probabilidad de que dicho caudal máximo se presente nuevamente o sea excedido por uno mayor. El caudal más alto de cerca de 180 m³/s solo tiene un 5% de probabilidad de ser excedido por uno mayor, es decir una vez cada 20 años en promedio. El caudal menor de algo más de 20 m³/s tiene una probabilidad de ser excedido de un 95%, es decir en promedio una vez cada 1,1 años. Convencionalmente se acepta que existe seguridad de riego con el caudal cuya probabilidad de ser excedido es de 85%, es decir que al menos dicho caudal se presenta en promedio una vez cada 1,2 años que en la práctica es casi todos los años. En consecuencia, cualquier plan de riego regional o particular debe considerar el caudal 85% para tener adecuada disponibilidad de agua todos los años, con una pequeña probabilidad de falla. En el caso del ejemplo, la línea gruesa de color café representa el caudal con 85% de probabilidad de excedencia y por tanto la disponibilidad segura de agua mes a mes.

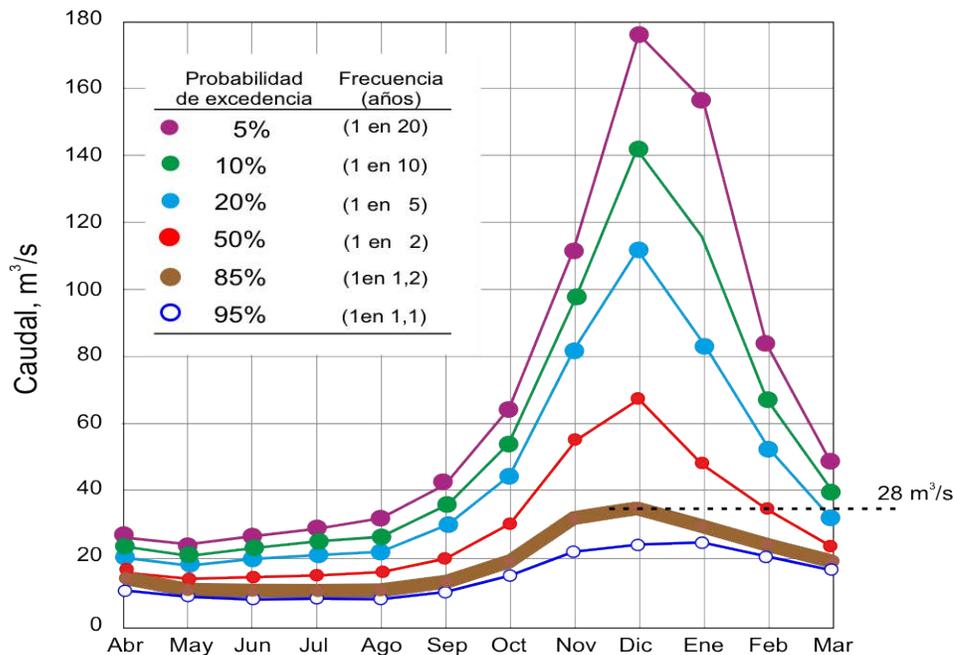


Figura 25. Estudio Hidrológico de Probabilidad de Excedencia



REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DE LOS CULTIVOS

Uso del Agua por las Plantas

Las principales funciones del agua en la planta son: (i) aportar para la fotosíntesis, (ii) constituir el medio en el que ocurren las reacciones químicas y bioquímicas de las células, (iii) actuar como disolvente, (iv) ser agente de transporte de elementos químicos y nutrientes desde el exterior, a través de las raíces, y dentro de la planta, (v) proveer turgencia a las células para el funcionamiento adecuado y, (vi) como elemento básico de la transpiración. No obstante que todas estas funciones son cruciales para el crecimiento y desarrollo, el proceso de transpiración consume aproximadamente el 98 - 99% del total de agua que requiere la planta.

Transpiración

El requerimiento de agua de los cultivos depende, al menos, de tres factores simultáneos: la planta, el suelo y la condición atmosférica. La planta absorbe agua desde el suelo a través de su sistema de raíces y la conduce por diferencia de presiones internas hacia la parte aérea a través de los vasos del xilema. Esta, una vez en las hojas, pasa a la cavidad sub-estomática donde, de acuerdo a la demanda de la atmósfera, cambia de estado de líquido a vapor, gas que sale al aire a través de los estomas¹⁵. Este proceso llamado transpiración consume el exceso de energía calórica proveniente del sol a razón de 560 calorías por gramo de agua evaporada. De este modo la planta evita sobrecalentarse y permite que su actividad metabólica funcione normalmente, con máxima eficiencia y productividad (Figura 26). Para la planta la transpiración es un sistema de refrigeración que además provoca una corriente ascendente de agua que arrastra nutrientes.

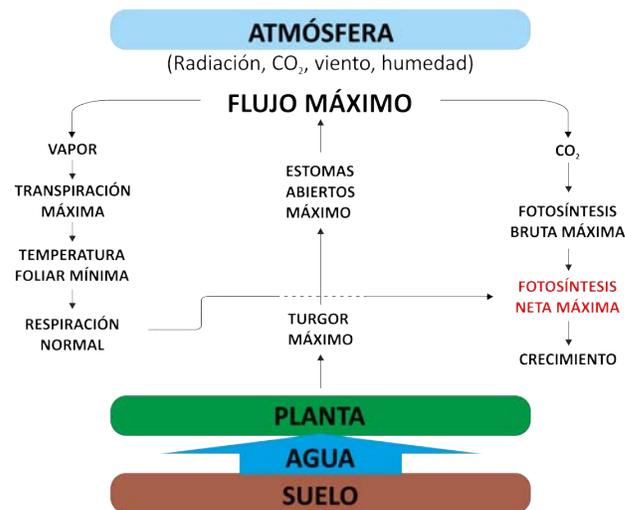


Figura 26. Relación Suelo Planta Agua Atmósfera

¹⁵ Estomas son poros muy pequeños (0,6 - 3,5 micrómetros) ubicados en toda la estructura vegetal y particularmente en las hojas.



Cuando el abastecimiento de agua en el suelo falla o es restringido, la planta pierde turgencia, los estomas se cierran total o parcialmente lo que restringe la transpiración y por lo tanto la temperatura de la planta se eleva. Este hecho significa que la respiración de las células vegetales se hace más intensa. Por otra parte con el cierre total o parcial de los estomas, la absorción de CO₂, gas fundamental para la fotosíntesis, se restringe. Considerando que la fotosíntesis neta, que produce el crecimiento, es la diferencia entre la fotosíntesis bruta (restringida) menos la respiración (aumentada), la consecuencia final de la restricción de agua en el suelo es menor crecimiento además de otros efectos fisiológicos negativos.

Medición y Estimación del Consumo de Agua por el Cultivo

Existen diversas formas de medir y/o estimar el consumo de agua por un cultivo. El lisímetro de pesada (Figura 27-A) es, hasta ahora, el único instrumento que permite medir con exactitud dicho consumo. Se trata de un equipo de muy alto costo, diseñado para “pesar” una fracción de cultivo y por diferencia, en días consecutivos, obtener la disminución de peso que corresponde a la pérdida de agua¹⁶.

El lisímetro de drenaje obtiene el valor de consumo de agua por las plantas —evapotranspiración, es decir la suma de transpiración de la planta más evaporación directa desde el suelo— mediante la diferencia del agua de drenaje que es medida en un foso de observación (Figura 27-B).

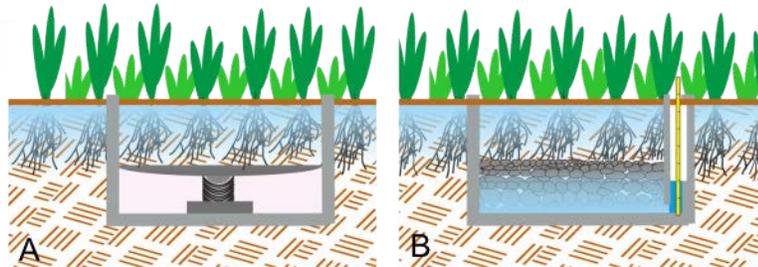


Figura 27. Esquemas de Lisímetro de Drenaje [A]; Lisímetro de Pesada [B]

Existen numerosos y diversos métodos que permiten realizar estimaciones, más o menos aproximadas, del requerimiento de agua por los cultivos para un momento o un período determinado. Constantemente se están proponiendo nuevas y más precisas metodologías con diferentes grados de éxito y acogida. En general estas metodologías abordan el problema desde

¹⁶ Lisímetro de pesada, $ET = P + R - (pp=0) - (es=0) \pm \Delta peso \dots$ $ET = P + R \pm \Delta peso$
 Lisímetro de drenaje, $ET = P + R - (\Delta pp) - (es=0) \pm \Delta \theta \dots$ $ET = P + R \pm (\Delta pp) \pm \Delta \theta$

- ET : evapotranspiración del período
- P : precipitación del período
- R : riego del período
- Pp : percolación profunda
- Es : escurrimiento superficial
- $\Delta peso$: variación de peso
- Δpp : variación del nivel de drenaje
- $\Delta \theta$: variación de humedad del suelo

tres perspectivas diferentes: mediciones de humedad del suelo; mediciones de la demanda atmosférica y, mediciones del estatus hídrico de la planta. Algunos ejemplos:

- Medición de la humedad del suelo, se utilizan tensiómetros, conductivímetros de varios tipos, sondas de neutrones, sondas de capacitancia, TDR¹⁷, FDR¹⁸ entre varios otros (Figura 28).

Estos instrumentos, aunque muy precisos en sí mismos, presentan un uso limitado en suelos heterogéneos como en general son los del tipo aluvial. La gran variabilidad de estos suelos tanto en superficie como en profundidad significa que las mediciones puntuales como las de estos instrumentos sean poco extrapolables.



Figura 28. Instrumentos para la medición de la humedad del suelo

- Medición de la demanda atmosférica, se utilizan evaporímetros de diversos tipos, el más común es el Clase A de USWS; numerosos modelos matemáticos que incorporan algunos de los más importantes factores meteorológicos, como son el balance de energía, contenido de humedad del aire, velocidad del viento, temperatura del aire.

Varios de estos modelos matemáticos para estimar demanda atmosférica han sido desarrollados para condiciones relativamente locales y para períodos determinados. Por ejemplo Blaney-Criddle es apropiado para cálculos mensuales en zonas intermedias; Makkink para cálculos mensuales en zonas altas; Penman-Monteith para períodos cortos, incluso días y horas, en cualquier sitio, por nombrar algunos. En cualquier caso y como es obvio, la precisión de estas estimaciones depende de la calidad de los datos meteorológicos empleados. Un mejoramiento de la calidad de datos y frecuencia se obtiene usando estaciones meteorológicas automáticas. No obstante, este tipo de procedimiento ignora las situaciones hídricas del suelo y de la planta por lo que al utilizarlos se asume que existe plena hidratación.

La demanda atmosférica se puede definir como la capacidad de la atmósfera de extraer agua, en forma de vapor, desde las superficies de agua libre y/o vegetación bien hidratada. En el caso de las

¹⁷ TDR : Time Domain Reflectometry

¹⁸ FDR : Frequency Domain Reflectometry



plantas, cuando están bien hidratadas, la demanda de agua por la atmósfera es equivalente a la evapotranspiración¹⁹ o requerimiento de agua de dicha comunidad vegetal (Figura 29).



Figura 29. Instrumentos para estimar la demanda hídrica de la atmósfera

- Mediciones del estatus hídrico de la planta, tales como temperatura foliar, potencial hídrico de la hoja, potencial hídrico xilemático, pulso de calor, dendrometría, conductancia estomática, efecto Doppler, procesamiento de imágenes, entre otros.

En principio las mediciones practicadas sobre las propias plantas son las realmente relevantes. Estas nos indican si la planta está adecuadamente hidratada o no. Sin embargo, existen diversas restricciones que limitan el uso práctico de estos instrumentos. En general son instrumentos sofisticados, de uso complejo, algunos de alto costo. Desde otro punto de vista, aun no existe total validación respecto de cuál o cuáles instrumentos proporcionan las mediciones que son relevantes y sus respectivos niveles críticos (Figura 30).



Figura 30. Instalaciones para estimar estatus hídricos de las plantas

Cantidad de Agua que Utilizan las Plantas

La cantidad total de agua que requieren las plantas en una período de crecimiento depende de varios factores, entre los más importantes son edad la planta, período de crecimiento y desarrollo (fenología), época del año, estructura de la parte aérea. Normalmente este conjunto de factores se expresa a través del llamado coeficiente de cultivo (K_c). Este coeficiente corresponde a la fracción de la evapotranspiración potencial (ET_0) que efectivamente evapotranspira un cultivo (ET_c)

¹⁹ Evapotranspiración potencial se define como el máximo requerimiento de agua por una cubierta vegetal si (1) cubre totalmente el suelo, (2) tiene una altura máxima de entre 15 y 20 cm, (3) sin limitaciones de crecimiento, (4) bien hidratada, todo en un cierto momento o período.

determinado en un cierto momento. La metodología para medir este coeficiente es bastante compleja debido a que es necesario disponer de datos de buena calidad tanto de ET_o como de ET_c . No obstante existe una metodología, bastante aceptada, para estimar estos valores a base de información fenológica del cultivo propuesta por FAO20. En la Figura 31 se presenta un ejemplo de la variación anual de estas variables.

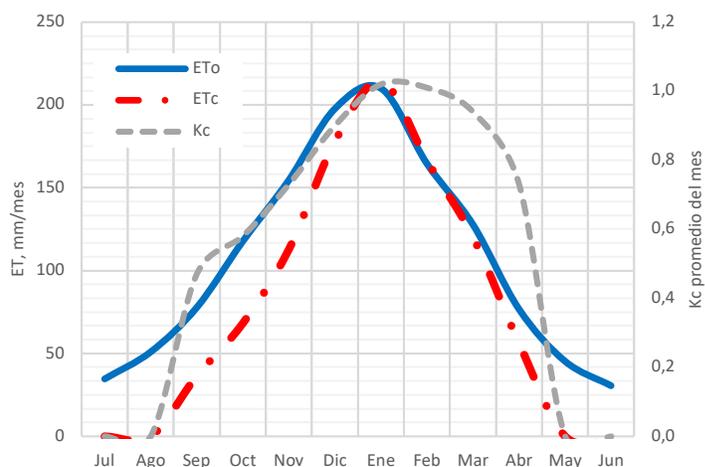
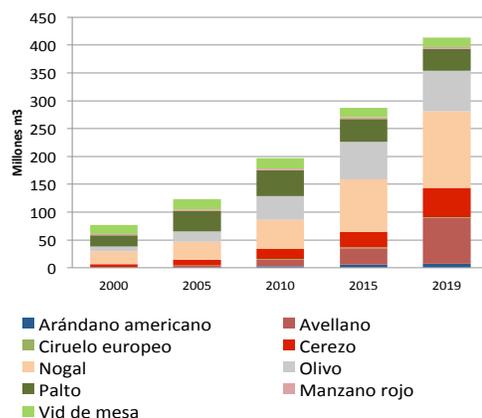


Figura 31. Evapotranspiración Potencial (ET_o), Evapotranspiración del Cultivo (ET_c) y Coeficiente de Cultivo (K_c). Ejemplo de Variación Anual

En la Figura 32 se presenta el caso de la expansión significativa del consumo de agua que ha tenido lugar en los últimos 20 años como consecuencia del aumento de la superficie frutal en el país. Se aprecia que las mayores incrementos de superficie corresponden principalmente a nogal, ciruelo europeo, avellano y cerezo, lo que en consumo de agua corresponde a un aumento de unos 75 millones de metros cúbicos al año en el 2000 a unos 410 millones en 2019, es decir el consumo se ha multiplicado por 5,5 veces en 20 años.



FUENTE: Morales C. (2020) con datos del Catastro Frutícola ODEPA/CIREN

Figura 32. Evolución de la Superficie y Consumo de Agua de las Nueve Principales Especies Frutales

²⁰ FAO. 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Paper 56



MÉTODOS DE RIEGO PREDIALES

Los requerimientos de agua de los cultivos deben ser satisfechos mediante la precipitación o, en las zonas donde esta no alcanza, a través del riego. El riego entonces consiste en el traslado del agua tanto en el espacio como en el tiempo. En el espacio porque el agua debe ser conducida desde las fuentes hasta el sitio del cultivo. En el tiempo porque como se aprecia en la Figura 31 el requerimiento no es constante a través de los meses, si no que se acumula principalmente en los períodos más cálidos. Esto último se logra cuando se cuenta con la infraestructura adecuada, en este caso embalses.

La red de canales primarios, secundarios, acequias y otros, más sifones, túneles, sistemas de distribución, elevaciones y otra infraestructura hidráulica permite trasladar el agua desde la fuente hasta el acceso a los predios de acuerdo a sus derechos (Figura 23). Dentro del predio el agua debe ser conducida hasta los sectores regados y distribuidas de la forma más homogénea posible entre las plantas.

La aplicación del riego a las plantas se realiza a través de alguno de los varios métodos de riego, algunos de los cuáles datan de varios siglos y otros, en contraposición, son los más modernos existentes. A continuación se revisan someramente los métodos más comúnmente utilizados en Chile.

Riego superficial

En lo esencial los métodos de riego superficial consisten en conducir el agua desde la fuente (acequia, tranque, estanque) hasta la planta a través de un conjunto de canalículos, acequias y surcos en los que el agua se mueve como respuesta a la diferencia de altura o pendiente del terreno, es decir por la gravedad.

Riego por tendido

Corresponde al método de riego más tradicional. Consiste en aplicar el agua como una lámina sobre todo el campo, para lo cuál se conduce por unas acequias en dirección de la pendiente. Mediante un implemento hechizo²¹ se provoca un rebalse de las acequias en determinadas zonas, procurando mojar lo más homogéneamente posible la superficie a su alrededor. Este método utiliza gran cantidad de agua, con muy baja eficiencia de aplicación, baja uniformidad y alto consumo de mano de obra (Figura 33).



Figura 33. Campo Preparado para el Riego por Tendido

²¹ En diferentes zonas de Chile a este implemento se le denomina de varias formas distintas, entre las más comunes se le llama "poncha"

Riego por surcos

Constituye un mejoramiento importante respecto del método de riego por tendido. Los surcos permiten ejercer un significativo mayor control del agua y eventualmente lograr mayor eficiencia de aplicación y también mayor uniformidad. El agua se toma desde una acequia cabecera y se deja escurrir por el surco en el sentido de la pendiente (Figura 34). Con el fin de minimizar la erosión se regula el largo de los surcos de acuerdo a la pendiente y la naturaleza del suelo, aplicando el llamado caudal máximo no erosivo (QMNE). Para lograr una adecuada profundidad de mojamiento en todo el surco es necesario regular su largo a base del tiempo de riego y las respectivas curvas de avance (o llenado del surco) y de retroceso (o vaciado del surco) según se muestra en la (Figura 35). Otro factor que debe ser tenido en cuenta para el diseño de este método de riego es la distancia entre surcos, la que depende básicamente de la naturaleza del suelo (Figura 36).

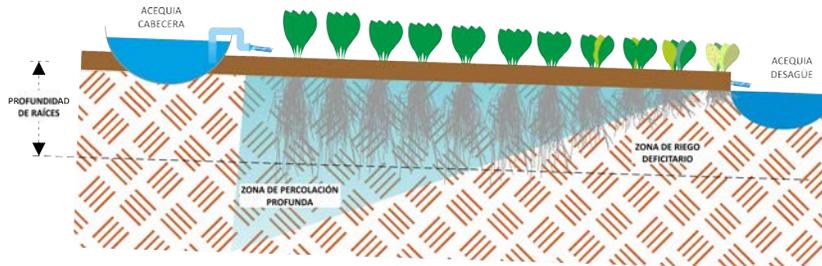


Figura 34. Esquema de Mojamiento del Suelo en Riego por Surco sin Diseño Adecuado

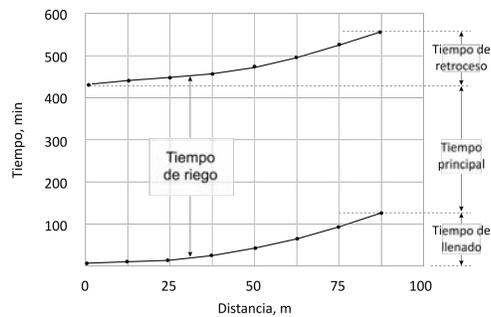


Figura 35. Desarrollo de Curvas de Avance y Retroceso en el Surco con Q_{MNE}

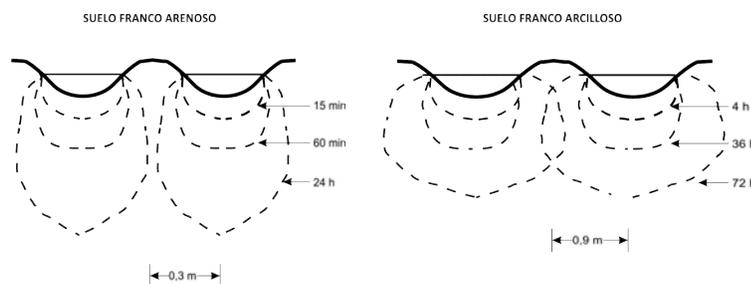


Figura 36. Distanciamiento entre Surcos Adyacentes según Tipo de Suelo

Con el fin de no exceder las pendientes máximas aceptables según el tipo de suelo y así evitar el efecto de la erosión, es posible construir surcos en curva de nivel en los cultivos que lo permitan (Figura 37).

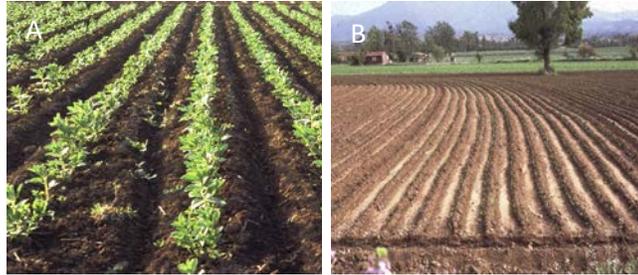


Figura 37. Riego por Surcos Rectos [A], Surcos en Curva de Nivel [B]

El llamado riego californiano consiste en un mejoramiento del riego por surcos que reemplaza la acequia cabezal abierta por una tubería —superficial o subsuperficial— provista de válvulas para permitir la sectorización y un sistema de entrega uniforme del agua a cada surco (Figura 38 A y B). Un mejoramiento similar pero de menor eficiencia se consigue cubriendo la acequia cabezal abierta con plástico y conduciendo el agua hacia los surcos mediante sifones (Figura 38).



Figura 38. Riego por Surcos. Cabezal tipo Riego Californiano [A], Campana Distribuidora Riego Californiano Subsuperficial [B], Cabezal Protegido con Polietileno y Sifones [C]

Riego Presurizado

Este tipo de métodos de riego consiste en conducir el agua desde la fuente (canal, tranque, pozo) hasta la planta a través de tuberías y mecanismos de entrega denominados en general emisores. Existen diversos tipos de tuberías en cuanto a material y tamaño y también diversos tipos de emisores. La conducción requiere energía que eventualmente puede ser provista por la gravedad y en su defecto debe serlo a través de un sistema de bombeo. Esto último justifica la denominación de riego presurizado.

Riego por Aspersión

Consiste en transportar el agua a través de un conjunto de tuberías y aplicarla mediante emisores de alto caudal que dependiendo del modelo puede variar entre 300 y 4.000 o más litros por hora, con diámetro de mojamiento variable entre 5 y 40 metros o más. Existen variados diseños tales como sistemas fijos, móviles, semimóviles, cañones de alta descarga y pivote central. Estos sistemas son apropiados en general para cultivos de tipo extensivos que pueden ser regados con baja frecuencia (Figura 39). En la (Figura 40) se muestran algunos de los múltiples modelos de aspersores con características apropiadas para diversos usos.

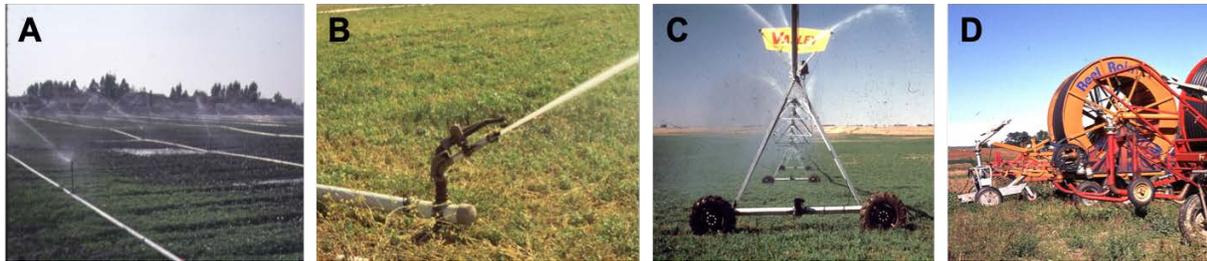


Figura 39. Riego por Aspersión. Sistema Fijo [A], Aspersor [B], Sistema Móvil Pivote Central [C], Cañón Móvil [D]

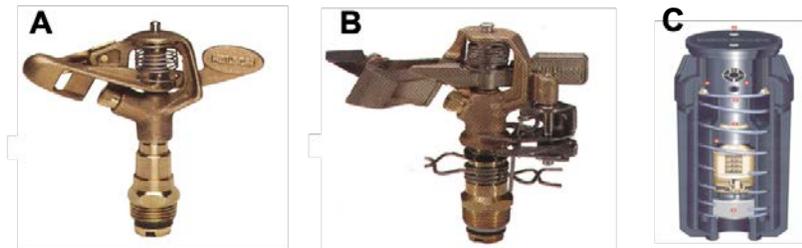


Figura 40. Algunos Tipos de Aspersores. Aspersor de Giro Completo [A], Giro Regulable [B], Pop-up [C]

Riego por Microaspersión

Corresponde a una versión del riego por aspersión pero diseñada con dos objetivos diferentes: (a) para riego localizado y (b) para riego de alta frecuencia. Riego localizado significa que no se intenta mojar toda la superficie si no solo la fracción más directamente involucrada con las plantas. Riego de alta frecuencia significa que debe ser aplicado en plazos breves que pueden ir desde algunos días hasta algunas horas. A diferencia del riego por aspersión que es apropiado para cultivos extensivos, la microaspersión es apropiada para el riego de cultivos escardados preferentemente de frutales, hortalizas y flores, es decir cultivos intensivos. El agua se conduce a presión desde la fuente hasta cada una de las plantas mediante tuberías. Estas normalmente se clasifican en matrices, submatrices, portallaterales y laterales. En estas últimas se insertan los emisores que en este caso son microaspersores. Existen numerosos tipos, diseños y tamaños de microaspersores con caudales desde unos 20 – 25 L/h hasta unos 300 L/h, dependiendo de la boquilla y presión que se utilice. Los

diámetros de mojamiento van desde algunos pocos centímetros (50 – 80 cm) hasta unos 2 metros o más (Figura 41).

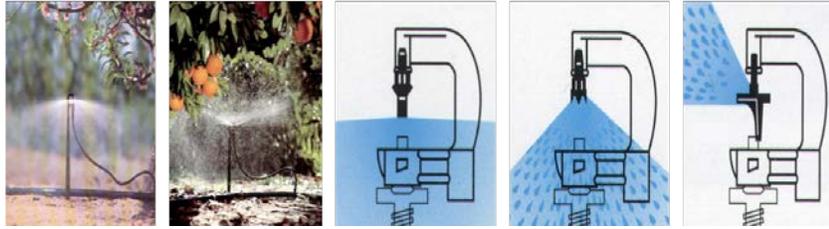


Figura 41. Microaspersores para Diversos Usos

Riego por Goteo

La principal diferencia respecto de microaspersión es que la descarga del agua en este caso se realiza a través de un dispositivo hidráulico —gotero— cuya finalidad es que la entrega sea gota a gota. Existen números tipos de goteros adaptados a diferentes usos y condiciones. Goteros sencillos en línea, de inserción tipo botón, de salidas múltiples, tanto como goteros de los mismos tipos pero autocompensados, lo que permite asegurar, dentro de un rango de presiones, la descarga de caudales homogéneos. También existen goteros incorporados en la línea de riego y otros del tipo anti-drenantes. Algunos ejemplos en la Figura 42. Los caudales de descarga de estos dispositivos varían entre 1 y 10 L/h aproximadamente y su disposición y distanciamiento en el terreno dependen de las características de crecimiento del cultivo.

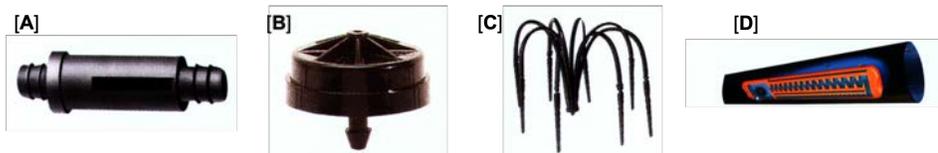


Figura 42. Goteros. En Línea [A], Botón [B], Salidas Múltiples [C], Incorporados [D]

En la Figura 43 se presenta un esquema básico de la disposición y partes principales de un equipo de riego localizado de alta frecuencia, válido tanto para riego por microaspersión o goteo, ajustando adecuadamente su dimensionamiento.

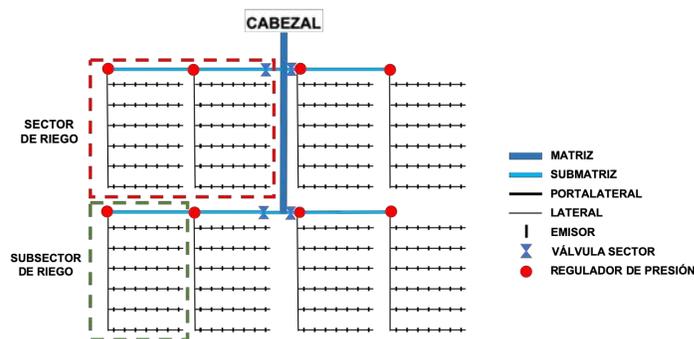


Figura 43. Esquema de Plano para Riego por Microaspersión o Goteo



Eficiencia de Riego

En ingeniería el concepto de eficiencia corresponde a la cantidad de elemento (energía, agua u otro) aprovechado, para conseguir un determinado resultado, respecto de la cantidad de este que es necesario aplicar. Así definida el valor de la eficiencia es normalmente menor de 1 o de 100%, si se prefiere expresar en porcentaje. Es decir, siempre la cantidad de elemento aprovechado será menor que la cantidad de elemento aplicado. En el caso del riego se distinguen al menos tres clases de eficiencia, o tres componentes de la eficiencia general: eficiencia de distribución (Ed), eficiencia de conducción (Ec) y eficiencia de aplicación (Ea).

$$\text{Eficiencia (\%)} = \frac{\text{Cantidad aprovechada}}{\text{Cantidad aplicada}} \times 100$$

Eficiencia de Distribución (Ed)

Se refiere a la cantidad de agua que efectivamente es distribuida a cada canal de riego, primario, secundario, terciario u otro, de acuerdo con sus derechos. Esta eficiencia suele depender de varios factores entre los cuáles se destacan la calidad de la infraestructura de distribución (compuertas, marcos partidores, sifones y otros) y su mantenimiento, la vigilancia del funcionamiento de la infraestructura, la disponibilidad de agua. Esta eficiencia varía entre valores de 50 y 90%, según la incidencia de los factores mencionados.

$$E_d (\%) = \frac{\text{Cantidad de agua recibida en canal}}{\text{Cantidad según derechos}} \times 100$$

Eficiencia de Conducción (Ec)

Corresponde a la cantidad de agua que fluyendo por un canal de cualquier orden alcanza su destino final respecto de la cantidad que ingresa al mismo. Las pérdidas que pueden ocurrir en el trayecto del agua en el canal se pueden deber a factores como material de construcción del canal (tierra, revestido de hormigón, concreto, geomembrana), mantenimiento, diseño hidráulico, longitud y otros menores. Estos valores pueden variar entre 40 y 90%.

$$E_c (\%) = \frac{\text{Cantidad de agua en destino}}{\text{Cantidad en inicio de canal}} \times 100$$

Eficiencia de Aplicación (Ea)

Este valor señala la proporción entre la cantidad de agua que queda en el suelo disponible para las plantas respecto de la cantidad de agua aplicada. Las pérdidas que pueden ocurrir se deben principalmente a eventual percolación profunda (agua que pasa más profundo que la zona de las raíces) y/o el escurrimiento superficial, agua aplicada en exceso que es drenada fuera del campo regado. Esta eficiencia se asocia muy estrechamente al método de riego utilizado y varía entre valores de 30 y 90%.



$$E_a (\%) = \frac{\text{Cantidad de agua disponible para las plantas}}{\text{Cantidad aplicada}} \times 100$$

De acuerdo a lo que estipula la Comisión Nacional de Riego, las eficiencias asignadas a cada método de riego son las que se presentan en la Tabla siguiente.

Método de Riego	Eficiencia de Aplicación, %	
	Normal	Con Cabezal
Tendido	30	35
Surcos	45	50
Surcos en contorno	50	60
Aspersión	75	
Microjet y Microaspersión	85	
Goteo	90	

Tasa de riego

Corresponde a la cantidad de agua que es necesario aplicar con el fin de satisfacer el requerimiento de las plantas. Como se ha visto en la sección anterior, los métodos de riego no son cien por cien eficientes. Todos siempre tienen algún grado de pérdidas que es necesario considerar para lograr el objetivo de regar adecuadamente. Por lo tanto, la tasa de riego incluye el requerimiento propiamente tal más las pérdidas que ocurran según el método de riego empleado. La tasa de riego se calcula dividiendo el requerimiento de las plantas por la eficiencia del método de riego.

$$\text{Tasa de Riego} = \frac{ET_c}{\eta}$$

Donde:

ET_c Evapotranspiración del cultivo correspondiente al período entre el riego anterior y el próximo, expresada en mm

η Eficiencia del método de riego expresada en tanto por uno

Ejemplo comparativo de tasas de riego de una temporada completa, con diversos métodos de riego:

ET _c de la temporada m ³ /ha	Tasa de Riego según Método de Riego		
	Surcos	Aspersión	Goteo
8.000	17.000	10.000	8.800

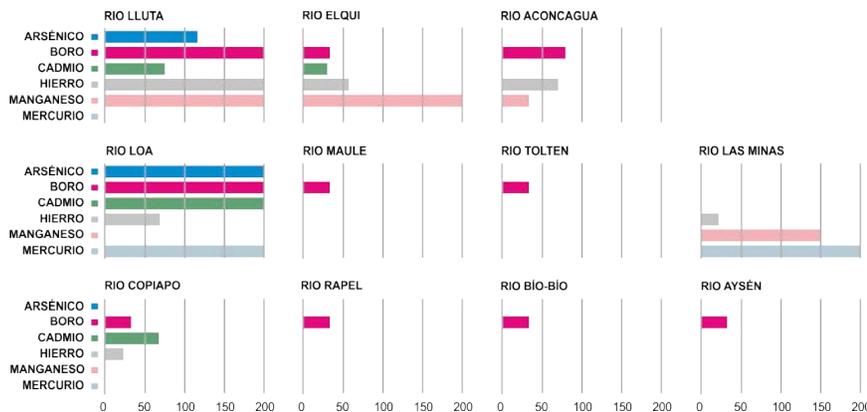


CALIDAD DEL AGUA

La calidad del agua para riego depende de al menos tres aspectos: físico, químico y biológico. El factor físico se refiere básicamente al contenido de material sólido (partículas de diversos tamaños) y/o orgánico. El factor químico se relaciona con el contenido de sales, compuestos químicos naturales y/o agregados (residuos de agroquímicos y otros). El factor biológico incluye los contenidos de microorganismos y residuos orgánicos. En general las aguas que presentan niveles de contaminación de cualquiera de estos factores requieren un tratamiento antes de ser utilizadas debido a que pueden provocar daños a las plantas, al suelo y también a los equipos de riego.

Los métodos de riego más afectados por contaminantes de tipo **físico** son los por microaspersión y goteo. Estos tienden a obturarse muy fácilmente lo que genera serios problemas de desuniformidad del riego. Para el tratamiento existen sistemas de filtrado que debidamente diseñados son eficientes y en general de bajo costo. Los contaminantes **biológicos** afectan principalmente a las plantas cuya parte aprovechable (comestible) entra en contacto directo con el agua, independientemente del método de riego. También se produce un daño importante cuando estas aguas son utilizadas para el lavado de productos comestibles y/o para aseo del personal. Se logra un adecuado mejoramiento con tratamientos químicos, aplicaciones de luz ultravioleta o de ozono. Los contaminantes de tipo **químico** son más difíciles de tratar. Estos pueden afectar severamente a las plantas, al suelo y también a los equipos de riego tales como microaspersión y goteo. Tanto desde el punto de vista de las plantas como del suelo, pero también de los equipos es necesario considerar posibilidades de mejoramientos a base de la aplicación de algunos productos químicos neutralizantes.

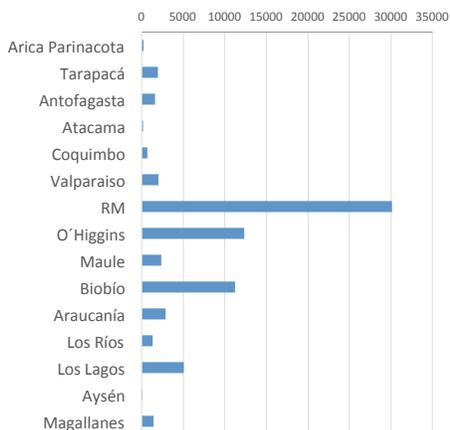
Respecto de calidad química, la Figura 44 muestra los niveles, sobre la norma chilena, en que diversos compuestos se encuentran presentes en algunos ríos. Se aprecia que el boro consistentemente aparece con porcentajes sobre la norma que van desde 200% en los ríos del norte, algo menos de 100% en el río Aconcagua, para reducirse a menos de 50% en los de más al sur. También se observa que los ríos del norte, Lluta en Arica y Parinacota y Loa en Antofagasta, presentan niveles muy altos de varios otros elementos químicos.



Fuente: Morales, 2020

Figura 44. Calidad del Agua en Algunos Ríos 2019 (porcentaje sobre la norma CH 1333)

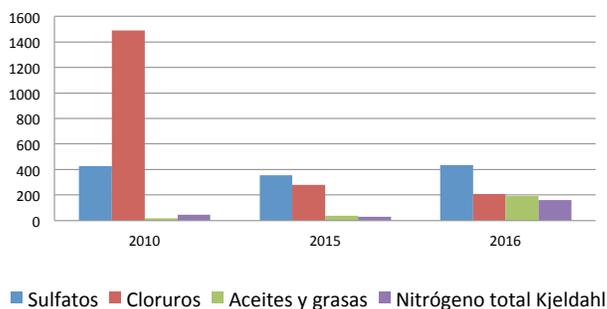
Por otra parte, la Figura 45 muestra la descarga de riles (residuos industriales líquidos) tanto al sistema de alcantarillado como a cuerpos de aguas superficiales en cada una de las regiones. Claramente destaca la Región Metropolitana, seguida por O'Higgins y Bío-Bío.



Fuente: Morales, 2020

Figura 45. Descarga de Riles a Alcantarillado y Aguas Superficiales, m³ x10³ / año

Adicionalmente, el Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC) muestra la evolución de las descargas a las aguas subterráneas de algunos compuestos en el período 2010 - 2016. Se observa el significativo descenso de los cloruros, el incremento de los aceites y grasas más el nitrógeno total y la mantención de los sulfatos (Figura 46).



Fuente: Chile, 2022

Figura 46. Descargas en Aguas Subterráneas (ton)



Estándares para agua de regadío (Norma Chilena 1333)

INDICADOR	UNIDAD	EXPRESIÓN	REQUISITO
pH	Unidad	pH	5,5 – 9,0
Aluminio	mg/L	Al	5,00
Arsénico	mg/L	As	0,10
Bario	mg/L	Ba	4,00
Berilio	mg/L	Be	0,10
Boro	mg/L	B	0,75
Cadmio	mg/L	Cd	0,01
Carbaril	mg/L		70,00
Cianuro	mg/L	CN	0,20
Cloruros	mg/L	Cl-	200,00
Cobalto	mg/L	Co	0,05
Cobre	mg/L	Cu	0,20
Cromo	mg/L	Cr	0,10
Hierro	mg/L	Fe	5,00
Fluoruros	mg/L		1,00
Litio	mg/L	Li	2,50
Litio (cítricos)	mg/L	Li	0,075
Manganeso	mg/L	Mn	0,20
Mercurio	mg/L	Hg	0,001
Molibdeno	mg/L	Mo	0,01
Níquel	mg/L	Ni	0,20
Plata	mg/L	Ag	0,20
Plomo	mg/L	Pb	5,00
Selenio	mg/L	Se	0,02
Sodio	%	Na	35,00
Sulfatos	mg/L	SO4	250,00
Vanadio	mg/L	Vn	0,10
Zinc	mg/L	Zn	2,00
Coliformes fecales	NMP/100 mL		1000

EROSIÓN Y SALINIZACIÓN DEL SUELO BAJO RIEGO

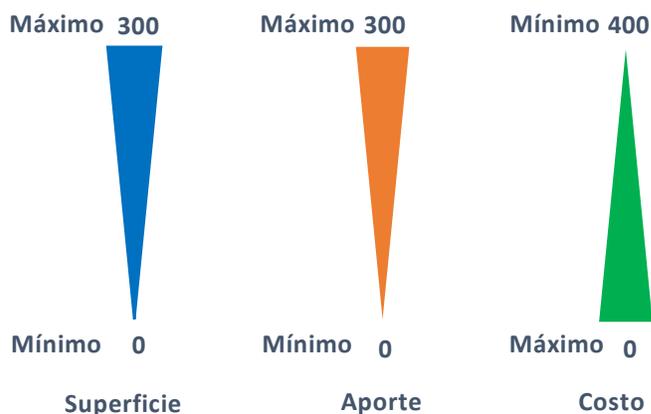
El hecho de regar agrega sales al suelo y puede generar significativos procesos erosivos. El agua de riego contiene cantidades variables de sales que al no ser necesarias para las plantas quedan en el suelo. En los climas áridos y semiáridos este proceso es muy acentuado por el normalmente mayor contenido de sales en las aguas, la escasa o nula precipitación natural que podría lavar el suelo y la generalmente restringida disponibilidad de agua para riego. Este efecto puede ser minimizado con adecuadas prácticas de riego que consideren desplazar las sales hacia capas más profundas del suelo. Por otra parte, el riego que no está bien diseñado habitualmente produce escurrimiento superficial. De la velocidad con que ocurra este escurrimiento depende la magnitud del arrastre de partículas del suelo, lo que constituye un proceso erosivo. También los procesos erosivos se pueden producir por el uso inadecuado del suelo aun cuando no requieran riego. La intensidad de las lluvias, el método de riego, la pendiente, las características físicas y el tipo de laboreo del suelo y el grado de cobertura vegetal son aspectos que deben considerarse para evitar la erosión. Tanto la salinización como la erosión son procesos generalmente lentos que ocurren asociados a malas prácticas de uso del suelo que pueden ser significativamente mitigadas con tecnología apropiada.



LEY DE FOMENTO AL RIEGO Y DRENAJE (LEY 18.450 Y RENOVACIONES)

Conocida como “ley de riego”, se trata de un importante instrumento para promover el uso eficiente de las aguas y por tanto, la ampliación de la superficie de riego del país. Promulgada en 1985 como ley No. 18.450 que Aprueba Normas para el Fomento de la Inversión Privada en Obras de Riego y Drenaje y sus Modificaciones por un período de catorce años, ha tenido sucesivas renovaciones y en la actualidad se encuentra plenamente vigente.

En lo básico la ley asigna subsidios para apoyar la inversión privada en la ampliación de la superficie de riego. Es operada por la Comisión Nacional de Riego (CNR) del Ministerio de Agricultura mediante concursos de proyectos. La CNR recibe en el Presupuesto Nacional un ítem para este objetivo que distribuye en varios concursos cada año. El sistema para resolver los concursos de proyectos factibles es asignar un puntaje basado en tres criterios fundamentales: (a) superficie de nuevo riego, (b) aporte del sector privado y (c) costo total del proyecto. Al proyecto que incorpora la mayor superficie de nuevo riego se le asignan 300 puntos, al que menos se le asigna 0 puntos. Igualmente al proyecto que más aporte privado contempla se le asignan 300 puntos y al que menos 0. Respecto del costo el proyecto de menor costo por hectárea se le asignan 400 puntos y al que tiene el mayor se le asigna 0 (Figura 47). Luego dichos puntajes se suman y los proyectos se ordenan de mayor puntaje a menor.



Fuente: Chile-B

Figura 47. Sistema de asignación de puntajes a los proyectos según criterio de evaluación

MEJORAMIENTO DEL RIEGO DE BAJO COSTO (PEQUEÑA AGRICULTURA)

Miranda (2020) indica que una forma de lograr duplicar la eficiencia de riego en el sector de la pequeña agricultura, es decir pasar de 30% a 60%, sería mediante acciones como la construcción de pequeños tranques de tierra de regulación nocturna, utilizando traíllas; nivelación de terrenos para uniformar las pendientes en el sentido del riego usando maquinaria apropiada y estudio topográfico (Figura 48); sistema de conducción y distribución de aguas (Figura 49); determinación de la frecuencia y tiempo de riego²² y un programa de capacitación sobre la cultura del agua, eventualmente implementado por INDAP.



Figura 48. [A] Traílla; [B] Niveladora; [C] Plano Topográfico

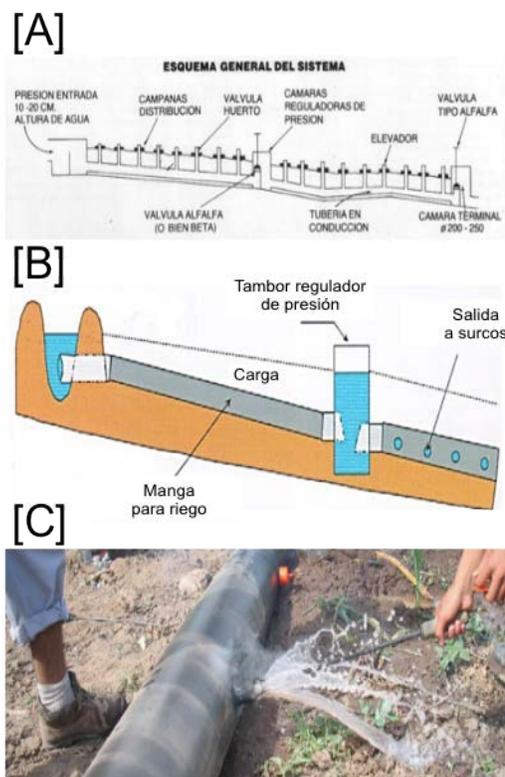


Figura 49. Riego Californiano. Esquema de Sistema Fijo (A), Sistema Móvil (B) y Sistema Móvil (C)

²² Frecuencia de riego:

Información requerida: Capacidad estanque del suelo (HA), demanda atmosférica (bandeja evapormétrica Clase A (Eb), coeficiente de cultivo (Kc)=0,75. Luego la frecuencia será $No. días = \frac{0,5 \times HA}{Eb \times Kc}$

Tiempo de riego: uso de cilindro infiltrómetro, método práctico

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA EN RIEGO Y AGROCLIMATOLOGÍA (CITRA)

De la Universidad de Talca, desarrolla un proyecto de Transferencia y Capacitación para Mejorar la Eficiencia en el Uso del Agua, Dirigido a Pequeños y Medianos Agricultores (Ortega, 2020)²³. Se ha desarrollado un sistema integral para la gestión hídrica en cultivos como maíz semillero, tomate industrial y de invernadero, arándanos, frambuesa, manzano, olivos, uva de mesa, uva vinífera y kiwi. En la Figura 50 se presentan algunos de los principales resultados de este trabajo, en su grado de avance actual.

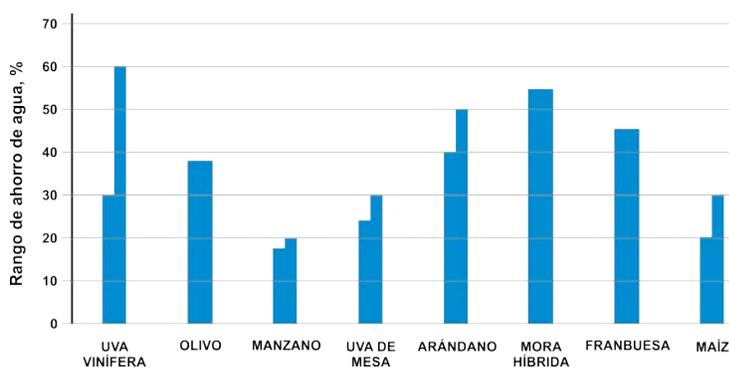


Figura 50. Impacto del SIGESH

Las principales líneas de acción se refieren a la realización de proyectos con alto impacto social, financiados por fondos públicos y privados, en función de los lineamientos institucionales para el mejoramiento de la gestión hídrica; la ejecución de asesorías específicas para empresas en el manejo del riego en cultivos y su impacto en la productividad del agua y el rendimiento y, sustentar la operación de una red de estaciones meteorológicas para la gestión del riego. El programa de Transferencia Tecnológica en Riego está dirigido a agricultores, profesionales, instituciones y empresas. Sus actividades más importantes son una red de información agroclimática, cursos, actividades en terreno, difusión y módulos demostrativos. Por su parte, el programa de Capacitación en Técnicas de Riego está dirigido a alumnos, profesores y comunidad. Sus actividades son capacitación a estudiantes de tercero y cuarto medio (teórica y práctica en terreno) y parcelas demostrativas.

La Red de Información Agroclimática instaló, en colaboración con agricultores, cinco estaciones meteorológicas automáticas, que proporciona cobertura a la mayor parte de la comuna (aproximadamente 40.000 ha) (Figura 51). La distribución de la información se realiza a través del servidor de CITRA y se entrega a libre disposición a en www.citrautalca.cl/PGH.

²³ Ortega S. 2020. El Agua en Chile: disponibilidad, acceso y tecnologías para la producción sostenible en la pequeña agricultura. Academia de Ciencias Agronómicas

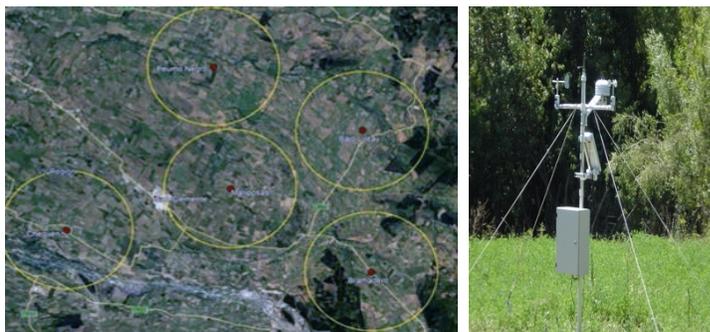


Figura 51. Área de Cobertura y Estación Meteorológica

Las Actividades de Validación con Agricultores consisten en montar módulos demostrativos que corresponden a intervenciones en explotaciones productivas en las que se ocupó un segmento del predio para aplicar técnicas de programación y control del riego. Su objetivo es establecer una estrategia de riego orientada a aumentar la eficiencia y obtención de mejores rendimientos y calidad de los productos, utilizando mangas. En 2015 – 2017 se aplicó en ají, poroto y tomate. En 2018 – 2019 en pradera de trébol, tomate industrial con riego por cintas vs. mangas y poroto con riego por cintas vs. tradicional (Figura 52).



Figura 52. Diferentes Sistemas de Riego de Bajo Costo



GOBERNANZA DEL AGUA EN CHILE

Es importante establecer que desde antiguo y hasta inicios del siglo XIX²⁴ todas las acciones para el uso del agua, es decir la construcción de canales y algunos pequeños embalses, fueron iniciativas privadas. La primera intervención estatal ocurrió en 1816 con algunas normas para la venta de regadores y la definición de elementos básicos de infraestructura de riego como regadores, marcos partidores y botatomas, promulgadas por el Director Supremo don Bernardo O'Higgins. A continuación se fueron dictando leyes y normas que fijaron el caudal de un regador, autorizaciones para abrir nuevos canales en varios sectores de la zona central, se crea la sección Hidráulica y Navegación Fluvial del Ministerio de Industrias y Obras Públicas. En 1835 se promulga la primera ley de obras públicas en la que se otorga prioridad al riego. En 1872 se establecen ordenanzas para la distribución del agua en diversas cuencas, y en 1875 se da inicio al estudio del Código Rural²⁵, del cual se realizaron varias versiones, ninguna de las cuales llegó a ser ley. Ya en 1928 se promulga la ley general de regadío en que se establecen normas para estudios, construcción, explotación y financiamiento de infraestructura de riego. Por otra parte, en 1927 se inicia la discusión para la formulación de un código de aguas, cuyas versiones principales²⁶ también fracasaron hasta que en 1948, luego de extensas discusiones parlamentarias se aprobó el primer Código de Aguas (ley 8.944) cuya aplicación debió ser suspendida debido a fuertes polémicas. Solo en 1951 se aprueba el primer código, que fue reemplazado en 1967 con la ley de Reforma Agraria que introdujo significativas modificaciones. Por último en 1981 se estableció el tercer código que en los años siguientes ha experimentado diversas modificaciones (Vergara, 1991).

Según Estévez (2020)²⁷, la gobernanza del agua “se refiere a los sistemas políticos, sociales, económicos, legales y administrativos vigentes que influyen en el acceso y uso del agua, la protección contra la contaminación y la gestión. Incide en la equidad y eficiencia en la asignación y distribución de los recursos y servicios hídricos y posibilita un equilibrio entre usos del agua para distintas actividades socioeconómicas resguardando las funciones y servicios que proporciona en la preservación del ecosistema. Incluye la formulación participativa y la implementación de políticas de agua, con estándares claros y prácticos basados en la ciencia, la ética y la sostenibilidad del recurso”²⁸. La gobernanza incluye la definición e implementación de estrategias y políticas, definición y actualización de un marco regulatorio y de una institucionalidad apropiada, el monitoreo de cantidad y calidad y la consecuente fiscalización y el establecimiento de mecanismos de participación, colaboración y coordinación.

En la Figura 53 se presentan los resultados de un estudio que proyecta las brechas y riesgos hídricos que se esperan para 2030 en varias cuencas de Chile. Se aprecia que claramente la mayor frecuencia de causas se relacionan con los problemas de gestión y gobernanza y que por el contrario, la menor frecuencia corresponde a la eventual disminución de la oferta de agua.

²⁴ Referencias:

Sandoval JJ. 2003. El Riego en Chile. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas. Santiago, Chile

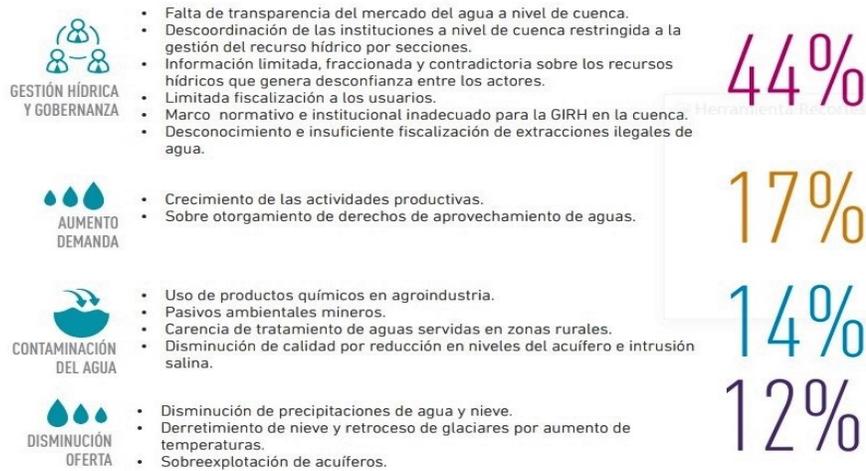
Vergara BA. 1991. La Codificación del Derechos de Aguas en Chile (1875 – 1951). Revista de Estudios Histórico-Jurídicos [Sección Historia del Derecho] XVI Valparaíso, Chile

²⁵ 1875, Lastarria; 1884, Ravest; 1886, Vásquez

²⁶ Moreno (proyecto de Código de Aguas). Varias revisiones y mejoramientos (1928, 1930, 1936)

²⁷ Estévez C. 2020. Gobernanza y Gestión del Agua. Brechas Institucionales y Legales. Academia Chilena de Ciencias Agronómicas.

²⁸ Situación de los Recursos Hídricos en el Mundo. Agua para un Mundo Sostenible. UNESCO 2015. Reconoce que es en la gobernabilidad de los recursos hídricos, donde radica la verdadera crisis del agua y no tanto en la escasez o abundancia del recurso.



Fuente: Chile, 2019

Figura 53. Brecha y riesgo hídrico de las cuencas: Copiapó, Aconcagua, Maipo, Maule, Lebu y Baker

Desde otro punto de vista, los mayores desafíos para la gobernanza del agua son: el crecimiento demográfico, el crecimiento económico y el cambio climático²⁹. Lo que se relaciona con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU 6, y en menor grado 11 y 15 (Figura 54). En concreto la gobernanza del agua se relaciona directamente tanto con la gestión sostenible como con la gestión integrada de los recursos hídricos (Figura 55).



Fuente: ONU, 2018

Figura 54. ONU. Objetivos de Desarrollo Sostenible

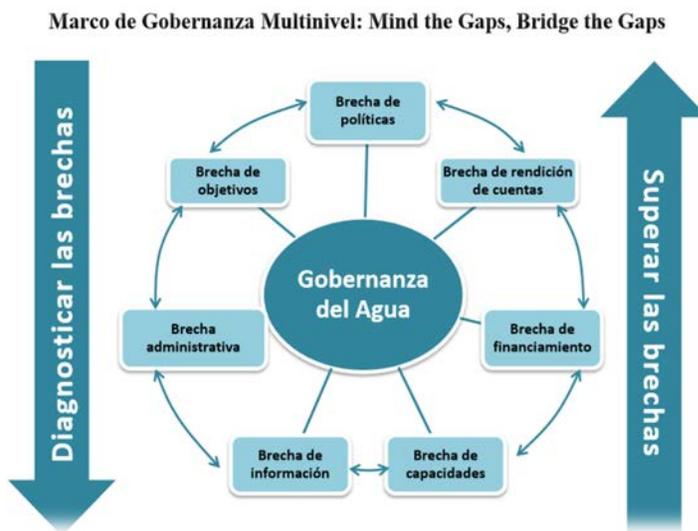
²⁹ Objetivos de Desarrollo Sostenible, Agenda 2030 (Detalle). www.pnudargent-dossierods.pdf



Fuente: Estévez 2020

Figura 55. Relación entre tres conceptos cuyas fronteras son relativamente permeables

Más específicamente la Figura 56 muestra en detalle la brechas que debe considerar la gobernanza del agua, sus vías de diagnóstico y de superación respectivamente (Figura 56).



Fuente: OECD, 2011

Figura 56. Brechas que debe Considerar la Gobernanza del Agua

En relación a la brecha política, Estévez (2020) indica que esta se deriva de estructuras de gobernanza del agua débiles y fragmentadas, que pueden llevar a políticas sectoriales mal integradas horizontal y verticalmente. Indica que según la OECD (2012) en el 92% de los países la brecha de políticas y fragmentación de funciones y responsabilidades es el principal obstáculo para una política del agua efectiva. Chile se encuentra entre los tres países de la región con mayor

fragmentación, pero se indica que su mejoramiento se trabaja con las herramientas legales e institucionales disponibles y propuestas (Figura 57).

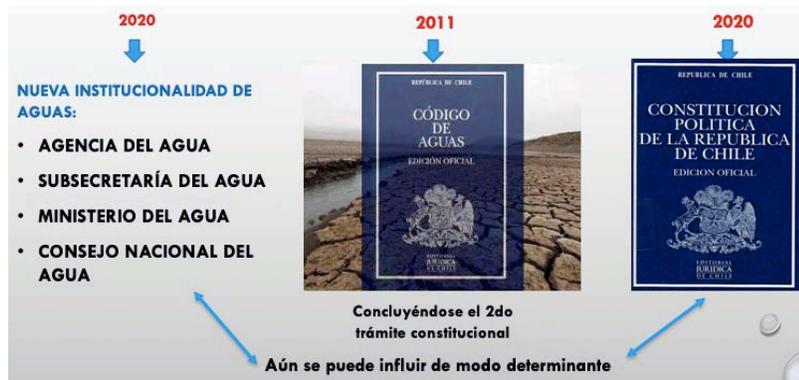


Figura 57. Herramientas con se está Abordando la Brecha Política en Chile

La reforma al Código de Aguas se encuentra en trámite legislativo en el Congreso Nacional y sus principales ejes se presentan en la Figura 58.



Fuente: Estévez, 2020

Figura 58. Reforma al Código de Aguas (ejes principales)



El proyecto establece el uso prioritario para el consumo humano. Así se consagra el **derecho humano** de acceso al agua potable y saneamiento, su **prevalencia** tanto en el otorgamiento como en la limitación al ejercicio de los derechos de aprovechamiento de agua (DAA); la extracción de **subsistencia** para satisfacer las necesidades de bebida, aseo personal, bebida de animales y cultivo de productos hortofrutícolas indispensables. Las aguas son un bien nacional de uso público, su dominio y uso pertenece a todos los habitantes de la nación, así la Administración puede reservar anticipadamente aguas para garantizar ambos derechos. Se concede un **permiso transitorio** (2 años) de extracción hasta 12 L/s mientras tramitan la solicitud de (DAA). No obstante, **no necesitan tramitar DAA** si se encuentran en terreno del APR, de sus socios o en bienes fiscales con la servidumbre respectiva y se eximen del **pago de patente**. **Excepcionalmente**, el Presidente, previo informe de la DGA, con la sola finalidad de garantizar los usos de la función de subsistencia, y fundado en el interés público, podrá constituir DAA aun cuando no exista disponibilidad.

En lo que respecta a la **protección de áreas de importancia patrimonial y ambiental**, se prohíbe la constitución de nuevos DAA en glaciares, áreas declaradas bajo protección oficial de la biodiversidad, acuíferos que alimenten vegas, pajonales y bofedales andinos en toda la macrozona norte, acuíferos que alimentan humedales declarados por el Min. del Medio Ambiente como ecosistemas amenazados, degradados o sitios prioritarios, cuando en los fundamentos de esa declaración contenga los recursos hídricos subterráneos que los soportan. Se exige del pago de patentes a aquellos DAA destinados a fines no extractivos. Se autoriza la declaración de DAA en su propia fuente (in situ) sin requerirse su extracción, para fines de conservación ambiental, o para el desarrollo de un proyecto de turismo sustentable, recreacional o deportivo. Se actualiza el Principio de Sustentabilidad del Acuífero.

En relación al **fortalecimiento de atribuciones de la DGA** (normas de equidad y sustentabilidad). Para aguas subterráneas. Si la explotación degrada al acuífero y afecta su sustentabilidad, la DGA deberá limitar el ejercicio de los DAA a prorrata de ellos. Se sanciona el incumplimiento de instalar y mantener un sistema de medición de caudales y volúmenes extraídos, de control de niveles freáticos y un sistema de transmisión de la información que se obtenga. Los derechos provisionales (Áreas de Restricción) no podrán convertirse en definitivos. La DGA siempre podrá limitarlos, total o parcialmente, dejarlos sin efecto y suspender su ejercicio, de constatar una afectación temporal a la sustentabilidad del acuífero o perjuicios a los DAA ya constituidos. Se regula la recarga de acuíferos. Para aguas superficiales. De no haber una Junta de Vigilancia, si la explotación de las aguas superficiales por algunos usuarios ocasionare perjuicios a otros titulares de derechos, la DGA podrá establecer la reducción temporal del ejercicio de los DAA. Si hay más de una JdV. con jurisdicción en la cuenca (ríos seccionados), la DGA podrá ordenar una redistribución de aguas entre las distintas secciones, cuando una de estas se sienta perjudicada por las extracciones que otra realice y así lo solicite fundadamente.

Adicionalmente, el Código de Aguas presume que la escasez hídrica es un fenómeno extraordinario y por tanto se modifican las circunstancias en que se puede declarar zonas de escasez, desde “épocas de extraordinaria sequía” a una “situación de severa sequía”. Se modifica el plazo actual que no supera los 6 meses no prorrogables extendiendo su vigencia a un año prorrogable. Por otra parte, declarada la escasez, la Junta de Vigilancia debe ponerse de acuerdo en cómo redistribuir las aguas. Este acuerdo debe asegurar que los resultados de esa redistribución, prioricen los usos para el consumo humano, subsistencia y saneamiento. Si la JdeV no cumple con lo anterior o no llega a acuerdo, la DGA podrá ordenar el cumplimiento de esas medidas o disponer la suspensión de las



atribuciones de la JdeV, para realizar directamente la redistribución de las aguas disponibles en la fuente. Mientras esté vigente la declaratoria de escasez, la DGA podrá autorizar extracciones de aguas superficiales o subterráneas destinadas con preferencia a los usos de la función de subsistencia y la ejecución de las obras en los cauces en cualquier punto sin necesidad de constituir DAA y sin la limitación del caudal ecológico mínimo.

El proyecto también **fomenta la gestión eficiente de las aguas**. Existen distintas brechas para la gestión eficiente, como la de institucionalidad, inversiones, innovación, conocimiento, capacidades, administración y, por cierto, marco regulatorio. La gestión sostenible del agua requiere conocer el ciclo hidrológico, la oferta y demanda de aguas, quiénes son los titulares de DAA, dónde, cómo y cuánto extraen aguas. El Código establece (Art. 150) que todos los DAA deben estar inscritos en el Conservador de Bienes Raíces (CBR) y en el Catastro Público de Aguas (CPA). Según estimaciones del Departamento de Administración de Recursos Hídricos (DARH) de DGA, 2020, solo habrían 108.000 DAA registrados en el Catastro Público de Aguas, de 91.000 DAA concedidos, el 56% no estarían en el CPA, de unas 33.000 regularizaciones por vía judicial, solo 8.180 están en el CPA. En síntesis, al menos 76.880 DAA no se encuentran registrados. La reforma legal lo resuelve del siguiente modo. En DAA por concederse la DGA pedirá una consignación al particular, dictará la resolución y resuelta las oposiciones, inscribirá de oficio en CBR y CPA. El mismo procedimiento aplicará para las regularizaciones de DAA. Para los DAA existentes que no se encuentren inscritos/registrados se otorgan dos plazos sucesivos de 15 y 9 meses, so pena de *caducidad*. Estarán *exentos de la causal de caducidad los DAA* de los servicios sanitarios rurales; las comunidades agrícolas definidas en el artículo 1 del DFL N° 5, de 1967, del Ministerio de Agricultura; los propietarios de áreas protegidas que no utilicen los DAA con el objeto de mantener la función de preservación ecosistémica en dichas áreas; los indígenas o comunidades indígenas (aquellos regulados en el Art. 5 del Código de Aguas y en los artículos 2 y 9 de la ley N°19.253). Que ya se encuentren registrados en el Catastro Público de Aguas.

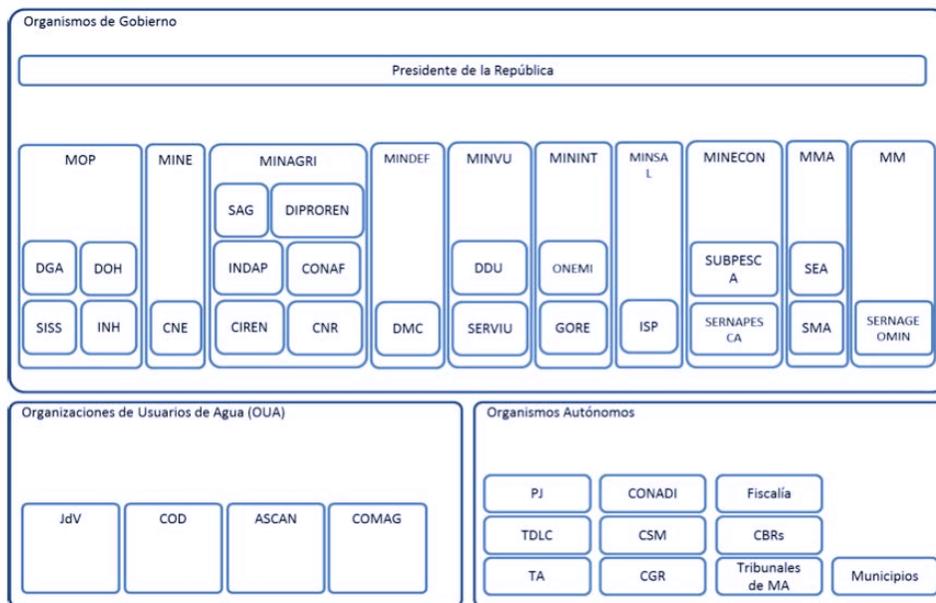
Respecto de no aprovechamiento de las aguas que se conceden en el DAA rigen las normas de patentes y de extinción de derechos que no cuenten con las obras para su aprovechamiento. Se eliminan los cobros diferenciados de patente según la región en que se encuentre el DAA. Se suprime exención de la patente a aquellos DAA con caudales inferiores a 10 o 100 l/s (en regiones XV a RM) o inferiores a 50 o 500 l/s (de la VI al sur), según sean DAA consuntivos o no consuntivos. El valor anual de la patente ($UTM=0.33xQxH$) se duplicará cada 5 años sin tope. Los DAA se extinguirán total o parcialmente si su titular no hace uso efectivo del recurso en los términos dispuestos en el artículo 129 bis 9. Para los DAA consuntivos el plazo de extinción será de 5 años, y para los no consuntivos, 10. No aplicarán las normas de extinción a aquellos DAA con obras de captación de las aguas. El cómputo del plazo se suspende en varias circunstancias previstas.

En cuanto a seguridad jurídica *los DAA constituidos con anterioridad* mantienen su vigencia, mantienen su carácter indefinido en el tiempo, mantienen su naturaleza jurídica como derechos reales. No obstante, los nuevos DAA serán temporales y renovables. Tanto DAA nuevos como antiguos deben registrarse y son enajenables.



INSTITUCIONES CHILENAS EN LA ADMINISTRACIÓN DEL AGUA

A diferencia de lo que ocurre en muchos países, en Chile la administración del agua está excesivamente fragmentada, la institucionalidad pública chilena posee 43 organismos vinculados a la gestión. A partir de la titularidad de derechos de aprovechamiento en un mismo canal, embalse o acuífero, los particulares pueden agruparse en juntas de vigilancia, asociaciones de canalistas; o comunidades de aguas. En la (Figura 59) se incluyen las principales instituciones ordenadas por ministerios, organizaciones de usuarios (OUA) y organismos autónomos. En todo caso el papel más importante le corresponde a la Dirección General de Aguas. Como se indica en el capítulo de la gobernanza esta es una seria limitación para los procesos de toma de decisiones y manejo, lo que se plantea resolver creando un organismo de alto nivel con funciones de coordinación.



Fuente: Donoso G.

DGA: Dirección General de Aguas; DOH: Dirección de Obras Hidráulicas; SISS: Superintendencia de Servicios Sanitarios; INH: Instituto Nacional de Hidráulica; CNE: Comisión Nacional de Energía; SAG: Servicio Agrícola y Ganadero; DIPROREN: División de Protección de Recursos Naturales; INDAP: Instituto de Desarrollo Agropecuario; CONAF: Corporación Nacional Forestal; CIREN: Centro de Información de Recursos Naturales; CNR: Comisión Nacional de Riego; DMC: Dirección Meteorológica de Chile; DDU: División de Desarrollo Urbano; SERVIU: Servicios de Vivienda y Urbanización; ONEMI: Oficina Nacional de Emergencia; GORE: Gobiernos Regionales; ISP: Instituto de Salud Pública; SUBPESCA: Subsecretaría de Pesca y Acuicultura; SERNAPESCA: Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura; SEA: Servicio de Evaluación Ambiental; SMA: Superintendencia del Medio Ambiente; SERNAGEOMIN: Servicio Nacional de Geología y Minería; JdV: Juntas de Vigilancia; COD: Comunidades de Usuarios de Aguas; ASCAN: Asociaciones de Canalistas; COMAG: Comunidades de Aguas; PJ: Poder Judicial; CONADI: Corporación Nacional de Desarrollo Indígena; TDLC: Tribunal de Defensa de la Libre Competencia; TA: Tribunales Arbitrales; CSM: Comité de Seguridad Marítima; CGR: Contraloría General de la República; CBR: Conservadores de Bienes Raíces

Figura 59. Instituciones con Algún Grado de Injerencia en el Agua



REFERENCIAS

- Banco Interamericano de Desarrollo. 2015. Manejo Sostenible del Agua.
- Chile-A. Comisión Nacional de Riego. Guías MAR: Marco operativo para proyectos de recarga artificial de acuíferos.
- Chile-B. Ley 18.450 y modificaciones
- Chile-C. Mesa Nacional del Agua. Primer Informe. MOP. Usos del agua en Chile
- Chile. 1978. Norma Chilena NCh 1333/78. Requisitos de calidad del agua para diferentes usos
- Chile. 1998. Decreto Supremo N° 609/98. Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado.
- Chile. 2002. Decreto Supremo N° 46/. Establece norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas
- Chile. 2014. Decreto Supremo No. 203/2014. Ministerio de Obras Públicas
- Chile. 2019. Escenarios hídricos 2030. Fundación Chile, Fundación Avina, Futuro Latinoamericano.
- Donoso G. Gobernanza de las Aguas en Chile, Desafíos y Medidas Propuestas de Mejora. Pontificia Universidad Católica de Chile
- Estévez C. 2020. Gobernanza y Gestión del Agua. Brechas Institucionales y Legales. Academia Chilena de Ciencias Agronómicas.
- Miranda O. 2020. Tecnologías de Riego de Bajo Costo para la Pequeña Agricultura. Academia Chilena de Ciencias Agronómicas.
- Morales C. 2020. Situación de los Recursos Hídricos en Chile. Academia Chilena de Ciencias Agronómicas.
- OECD. 2011. Water Governance in OECD: A Multi-level Approach, OECD Publishing, Paris
- ONU. 2018. Objetivos de Desarrollo Sostenible, Agenda 2030.
- ONU. 2018. Uso del agua a nivel mundial. FAO. AQUASTAT.
- Ortega S. 2020. El Agua en Chile: disponibilidad, acceso y tecnologías para la producción sostenible en la pequeña agricultura. Academia de Ciencias Agronómicas
- Salgado E. 2020. Riego en Chile. Breve Historia en Quince Minutos. Academia Chilena de Ciencias Agronómicas.
- Sandoval, J. 2003. El Riego en Chile. Dirección de Obras Hidráulicas, Ministerio de Obras Públicas, Chile.
- Sengupta S. y Welyl C. 2019. The New York Times
- Torras L. 2017. El agua: el petróleo del siglo XXI. El Foro Mundial Económico. CHI Research.
- UNESCO. 2015. Situación de los Recursos Hídricos en el Mundo. Agua para un Mundo Sostenible.
- USA. 2017-A. Department of the Interior. US Geological Survey. Distribución del agua en la Tierra.
- USA. 2017-B. Department of the Interior. US Geological Survey. Centro Nacional de Datos de Nieve y Hielo. Agua en la Tierra
- Vergara BA. 1991. La Codificación de los Derechos de Aguas en Chile (1875 – 1951). Revista de Estudios Histórico-Jurídicos [Sección Historia del Derecho] XVI Valparaíso, Chile
- www.pnudargent-dossierods.pdf

