

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**ESCUELA DE PREGRADO**

**Memoria de Título**

**Título**

**ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA DE CULTIVOS CON POTENCIAL  
BIOENERGÉTICO EN LA PROVINCIA DE LIMARÍ, REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE.**

**María Jesús Ovalle Barros**

**Santiago de Chile**

**2012**

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**ESCUELA DE PREGRADO**

**Memoria de Título**

**Título**

**ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA DE CULTIVOS CON POTENCIAL  
BIOENERGÉTICO EN LA PROVINCIA DE LIMARÍ, REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE.**

**WATER FOOTPRINT ESTIMATION OF CROPS WITH BIOENERGETIC POTENTIAL  
IN THE LIMARÍ PROVINCE, COQUIMBO REGION, CHILE**

**María Jesús Ovalle Barros**

**Santiago de Chile**

**2012**

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**ESCUELA DE PREGRADO**

**Título**

**ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA DE CULTIVOS CON POTENCIAL  
BIOENERGÉTICO EN LA PROVINCIA DE LIMARÍ, REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE.**

Memoria para optar al título profesional de  
Ingeniera en Recursos Naturales Renovables

**María Jesús Ovalle Barros**

<b>Profesor Guía</b>	<b>Calificaciones</b>
Sr. Rodrigo Fuster G. Ingeniero Agrónomo, M.Sc.	6,8
<b>Profesores Evaluadores</b>	
Sr. Manuel Paneque C. Bioquímico y Biólogo Molecular, Dr.	6,0
Sr. Marcos Mora G. Economista Agrario, Dr.	6,5

**Santiago de Chile**

**2012**

## INDICE

RESUMEN.....	6
ABSTRACT.....	7
INTRODUCCIÓN .....	8
OBJETIVOS .....	11
Objetivo General .....	11
Objetivos Específicos.....	11
MATERIALES Y MÉTODOS .....	12
Área de estudio.....	12
Cultivos .....	12
Palto ( <i>Persea americana</i> Mill.) var. Hass .....	13
Olivo ( <i>Olea europaea</i> ).....	13
Ricino ( <i>Ricinus communis</i> ) .....	14
Jojoba ( <i>Simmondsia chinensis</i> ).....	15
Materiales.....	16
Manual de la WFN .....	16
Bases de datos .....	16
Software Cropwat 8.0 .....	16
Estimación Huella del agua verde ( $WF_{\text{verde}}$ ) .....	17
Precipitación efectiva ( $P_{\text{pef}}$ ).....	17
Estimación Huella del agua azul ( $WF_{\text{azul}}$ ).....	18
Requerimientos de riego del cultivo ( $CWU_{\text{riego}}$ ) .....	19
Requerimientos hídricos del cultivo ( $CWU$ ) .....	19
Evapotranspiración potencial o de referencia ( $ET_0$ ): .....	20
a) Localización .....	20
b) Temperatura .....	20
c) Humedad Relativa.....	20
d) Velocidad del viento .....	21
e) Insolación Directa .....	21
Características de los cultivos .....	21
a) Fecha de siembra.....	21
b) Etapas de crecimiento .....	22
c) Coeficiente de cultivo ( $K_c$ ).....	22
d) Factor de respuesta de la productividad ( $K_y$ ) .....	23
e) Profundidad radicular.....	23
f) Altura máxima del cultivo .....	24
g) Fracción de agotamiento hídrico ( $p$ ).....	24
h) Rendimiento de los cultivos ( $y$ ).....	24
Características del suelo.....	25
Estimación Huella del Agua Gris.....	25
Aplicación estimada de los principales productos químicos (AR) .....	26
Fracción de Lixiviación .....	26

Concentración de Contaminantes.....	27
Natural.....	27
Legal.....	27
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	28
Evapotranspiración potencial o de Referencia (ET <sub>o</sub> ) .....	28
Precipitación Efectiva .....	29
Requerimientos hídricos de los cultivos (CWU) .....	29
Palto .....	29
Palto no productivo .....	30
Olivo.....	31
Olivo no productivo .....	32
Ricino .....	32
Jojoba .....	33
Requerimientos de riego de los cultivos (CWU <sub>riego</sub> ).....	34
Huella del agua verde (WF <sub>verde</sub> ) .....	35
Huella del agua azul (WF <sub>azul</sub> ).....	36
Huella del agua gris (WF <sub>gris</sub> ).....	37
Huella del Agua Total .....	38
CONCLUSIONES .....	41
BIBLIOGRAFÍA .....	43
APENDICES.....	46
APENDICE I.....	46
Etapas de Crecimiento .....	46
APENDICE II .....	47
Variables del suelo .....	47
APENDICE III .....	48
Equivalencia de ppm a Kg ha <sup>-1</sup> .....	48
Transformación de elementos atómicos a unidad de Nutrientes.....	48
APENDICE IV .....	49
Huella Hídrica Verde .....	49
Huella Hídrica Azul .....	49
APENDICE V .....	50
Huella Hídrica Gris .....	50
Datos .....	50
Procedimiento .....	50
Resultados .....	51

### Siglas y Símbolos

ADT	Agua Disponible Total
AR	aplicación estimada de productos químicos [Kg ha-1]
AV	Agua Virtual
CC	Capacidad de Campo
Cmax	Concentración máxima aceptable de contaminantes [Kg m-3]
Cnat	Concentración natural del contaminante [Kg m-3]
CWU	Requerimiento hídrico del cultivo
CWU <sub>riego</sub>	Requerimiento de riego del cultivo
DGA	Dirección General de Agua
ETc	Evapotranspiración de cultivo
ET <sub>o</sub>	Evapotranspiración potencial o de referencia
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura
Ha	Hectárea
K <sub>c</sub>	Coefficiente de cultivo
K <sub>y</sub>	Factor de respuesta de la productividad
msnm	Metros sobre el nivel del mar
°C	Grados Celsius
p	Fracción de agotamiento hídrico
P <sub>m</sub>	Precipitación media mensual
PMP	Punto de Marchitez Permanente
Pp <sub>ef</sub>	Precipitación Efectiva
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
WF	Huella Hídrica o Huella del Agua
WF <sub>azul</sub>	Huella Hídrica azul
WF <sub>gris</sub>	Huella Hídrica gris
WFN	Water Footprint Network
Wftotal	Huella Hídrica Total
WF <sub>verde</sub>	Huella Hídrica verde
y	Rendimiento
$\alpha$	Fracción de lixiviación

### Lista de Cuadros

- Cuadro 1 Precipitación media mensual promedio [mm] entre 1950 y 2003. Estación Ovalle DGA
- Cuadro 2 Datos de Longitud, latitud y altitud.
- Cuadro 3 Temperatura máxima y mínima promedio mensual [C°] en Ovalle
- Cuadro 4 Humedad relativa promedio mensual [%] en Ovalle
- Cuadro 5 Velocidad promedio mensual del viento [ $m s^{-1}$ ] en Ovalle
- Cuadro 6 Fracción de insolación directa (n/N) en Ovalle
- Cuadro 7 Fecha de siembra en Ovalle.
- Cuadro 8 Etapas de crecimiento en días por cultivo en Ovalle.
- Cuadro 9 Coeficientes de cultivo (Kc) según etapa y cultivo.
- Cuadro 10 Factor de respuesta de la productividad según etapa de desarrollo para cada cultivo.
- Cuadro 11 Profundidad inicial y máxima radicular para cada cultivo.
- Cuadro 12 Altura máxima de los cultivos
- Cuadro 13 Fracción de agotamiento crítico de cada cultivo.
- Cuadro 14 Rendimiento de los cultivos [ $ton m^{-2}$ ]
- Cuadro 15 AR en palto, olivo, ricino y jojoba por Fertirriego
- Cuadro 16 Concentración natural de contaminantes
- Cuadro 17 Concentración máxima legal de contaminantes
- Cuadro 18 Evapotranspiración potencial en Ovalle
- Cuadro 19 Precipitación efectiva según datos de la estación Ovalle DGA entre 1950 y 2003
- Cuadro 20 Requerimientos hídricos del palto en etapa productiva (desde los 3 años)
- Cuadro 21 Requerimientos hídricos del palto no productivo (hasta los 3 años)
- Cuadro 22 Requerimientos hídricos del olivo en etapa productiva (desde los 5 años)
- Cuadro 23 Requerimientos hídricos del olivo no productivo (hasta los 5 años)
- Cuadro 24 Requerimientos hídricos del ricino.
- Cuadro 25 Requerimientos hídricos de jojoba
- Cuadro 26 Requerimientos de riego de los cultivos
- Cuadro 27 Datos necesarios para estimar le  $WF_{verde}$  y la  $WF_{azul}$
- Cuadro 28 Estimación  $WF_{verde}$  para palto, olivo, ricino y jojoba.
- Cuadro 29 Estimación  $WF_{azul}$  para palto, olivo, ricino y jojoba.
- Cuadro 30 Estimación  $WF_{gris}$  para palto, olivo, ricino y jojoba
- Cuadro 31 Estimación  $WF_{total}$  para palto, olivo, ricino y jojoba.

### Lista de Figuras

- Figura 1 Localización Área de Estudio.  
Figura 2 Fotografías de Palto (*Persea americana Mill.*)  
Figura 3 Fotografías de Olivo (*Olea europaea*)  
Figura 4 Fotografías de Ricino (*Ricinus communis*)  
Figura 5 Fotografías de Jojoba (*Simmondsia chinensis*)  
Figura 6 Comparación resultados de la Huella Hídrica total de palto y olivo según resultados obtenidos en este caso de estudio y los publicados por la WFN en su reporte

### Lista de Ecuaciones

- Ecuación 1 Huella del agua verde o huella hídrica verde ( $WF_{\text{verde}} [\text{m}^3\text{ton}^{-1}]$ )  
Ecuación 2 Precipitación efectiva para precipitación media mensual menor o igual a 70 [mm]  
Ecuación 3 Precipitación efectiva para precipitación media mensual mayor a 70 [mm]  
Ecuación 4 Huella del agua azul o huella hídrica azul ( $WF_{\text{azul}} [\text{m}^3/\text{ton}]$ )  
Ecuación 5 Requerimientos de riego del cultivo ( $CWU_{\text{riego}}$ )  
Ecuación 6 Huella del agua gris o huella hídrica gris ( $WF_{\text{gris}} [\text{m}^3/\text{ton}]$ )



## RESUMEN

Durante la década de los noventa surge el concepto Agua Virtual, el cual busca cuantificar la utilización del recurso hídrico, contribuyendo a mejorar su gestión y así evitar el incremento de la llamada “Crisis del Agua”. Dicho concepto evolucionó hasta transformarse - a comienzos de este siglo- en la Huella Hídrica (WF) o Huella del Agua, correspondiente al volumen total de agua que se utiliza en la producción de bienes y servicios consumidos en un área determinada ya sea por un individuo, comunidad o país. Esta investigación estima la WF de cuatro cultivos con potencial bioenergético: palto, olivo, ricino y jojoba en la región de Coquimbo, Chile. La metodología utilizada es la propuesta por la Water Footprint Network (WFN), la cual permite calcular la cantidad de agua proveniente de precipitación y de riego que se utiliza en la producción de una tonelada de fruto cosechado –Huella hídrica verde y azul respectivamente- y la Huella Hídrica Gris que es la cantidad de agua requerida para diluir los contaminantes aplicados al sistema natural durante la producción de dicho rendimiento, de modo de cumplir con los estándares de calidad. La suma de estos tres valores equivale a la Huella Hídrica Total. Los resultados revelaron que en cuanto a la WF verde y azul, olivo tuvo la menor y ricino la mayor mientras que para la WF gris el valor de olivo fue el menor siendo el de jojoba el mayor; en cuanto a la WF total olivo tiene el menor valor ( $577 \text{ [m}^3 \text{ ton}^{-1} \text{ año}^{-1}\text{]}$ ) y ricino el mayor ( $12.629 \text{ [m}^3 \text{ ton}^{-1} \text{ año}^{-1}\text{]}$ ). Cabe destacar la proporción directa que se evidenció entre el rendimiento del cultivo y el tamaño de su Huella Hídrica, siendo que a mayor rendimiento menor WF. Los resultados de esta investigación muestran que a nivel nacional aún falta información para utilizar esta metodología como una herramienta de gestión concluyente, siendo más bien indicativa.

**PALABRAS CLAVES:** Agua Virtual, Huella del Agua, Cultivo Bioenergético.

## ABSTRACT

This research estimated Water Footprint of olive (*Olea europaea*), avocado (*Persea americana Mill.*), goat nut (*Simmondsia chinensis*) and castor oil (*Ricinus communis*) -all crops with bioenergetic potential- in the Limarí Province, Coquimbo Region, Chile. Was used the methodology proposed by the Water Footprint Network (WFN), which calculates the amount of water from precipitation and irrigation used in the production of a ton of harvested fruit, green and blue Water Footprint respectively, and the gray Water Footprint which is the amount of water required to dilute contaminants applied to the natural system during production in order to fulfill the water quality standards. The sum of the three values is the Total Water Footprint. The results revealed that olive have the smaller green and blue WF and castor oil the larger. For gray WF olive obtain the lower value and goat nut de higher. In the Total WF olive tree has the lower value (577 [m<sup>3</sup> t<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>]) and castor oil the larger (12,629 [m<sup>3</sup> t<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>]). It becomes evident the direct proportion between crop yield and the Water Footprint obtained. The results obtained shows that at national level, still lack information to use this methodology as a conclusively tool for water management, being rather indicative.

**KEY WORDS:** Water Footprint, Bioenergetic Crop.

## INTRODUCCIÓN

La presente investigación se enmarcó en el proyecto INNOVA-CORFO-09CN14-5726 “Puesta en valor de terrenos fiscales y suelos marginales mediante el desarrollo de cultivos bioenergéticos” desarrollado en la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile. La finalidad de éste fue identificar los 25 cultivos con mayor potencial agroenergético en el país, estimándose la eficiencia energética, huella de carbono y huella del agua de cerca de 100 especies con la potencialidad de crecer en suelos marginales, para luego determinar las áreas de factibilidad para su desarrollo además de su viabilidad económica, ambiental y social. Este caso de estudio explora la metodología propuesta por la Water Footprint Network (WFN) y estima la huella hídrica de cuatro cultivos comprendidos en el proyecto: palto, olivo, ricino y jojoba.

La FAO en su publicación Agua y Cultivo (2002) asegura que - a nivel mundial - el sector agrícola utiliza más del 65% del agua extraída, siendo así el rubro que más utiliza el recurso. Dado que la obtención de alimentos para la población - cada vez más grande - es indispensable, la demanda por el agua dulce se ha vuelto mayor, lo que sumado a su limitada disponibilidad, ha generado un déficit de la misma que está obligando a desarrollar múltiples tecnologías que permitan aumentar la eficiencia de su uso y fomentar un uso sustentable a nivel global.

Según Samuelson y Nordhaus (2006, citado por Madrid 2007) la escasez ocurre cuando la cantidad o disponibilidad de los bienes es menor a lo deseado. Madrid (2007) plantea que cuantitativamente se considera que un país sufre una crisis de agua cuando sus recursos son menores a los 1.000 m<sup>3</sup> por persona anualmente. Dado que esta situación se presenta en lugares tales como Haití, Marruecos, Libia, Arabia Saudita, India, Malasia y Polonia entre otros (ONU, 2012) es que se habla de una crisis global del agua.

En relación a lo anterior, autores como Llamas (2005) y Aldaya *et al.* (2010) coinciden en que la “Crisis del Agua”, más que tratarse de un tema de insuficiente disponibilidad física del recurso para todas las necesidades actuales, corresponde a un problema de gestión. Por su parte, Rodríguez *et al.*, (2008) basado en la Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture (2007) hace hincapié en la necesidad de invertir tanto a nivel institucional, educacional y de capital humano para alcanzar una mejor gestión del recurso hídrico y así reducir la insuficiencia actual de agua disponible.

A partir de esta necesidad, durante la década de los noventa Allan (1997, citado por Hoekstra *et al.*, 2009) introduce el concepto de Agua Virtual (AV) como una manera de cuantificar la utilización del recurso para poder manejarlo correctamente. El concepto se define como la cantidad de agua necesaria para la producción de un bien o servicio (Llamas 2005, Dietzenbacher y Velázquez 2006, Madrid 2007, Chapagain y Orr 2008, Novo *et al.*, 2008, Rodríguez *et al.*, 2008 y Aldaya *et al.*, 2010).

Posteriormente, Hoekstra y Hung (2002, citado por Llamas 2005, Novo *et al.*, 2005, Madrid 2007, Chapagain y Orr 2008 y Rodríguez *et al.*, 2008) introdujeron el término Huella Hídrica o Huella del Agua (WF), concepto que hace referencia al volumen total de agua que se utiliza para producir los bienes y servicios consumidos en un área determinada ya sea por un individuo, comunidad o país. Corresponde a agua que - de una u otra forma - deja de estar disponible en el sistema, lo que a su vez puede explicarse como la suma de todas las AV que requiere una zona para suplir sus necesidades.

Una de las principales innovaciones de este concepto es que se hace una distinción entre las fuentes de agua que se utilizan durante la producción. Varios autores avalan lo que proponen Chapagain y Hoesktra (2004 citado por Llamas 2005, Novo *et al.*, 2005, Rodríguez *et al.*, 2007 y Aldaya *et al.*, 2010,) sobre la clasificación del agua en tres colores de agua: verde, azul y gris, cada una con su respectiva WF. Tomando las definiciones de Gerbens-Leenes *et al.* (2009) la WF verde corresponde al agua de lluvia, fuente principal de agua en terrenos de secano y de la vegetación natural, que evapotranspira durante el crecimiento. La WF azul es el agua de riego que es evapotranspirada durante el crecimiento de los cultivos proveniente de cursos de agua superficiales y subterráneos. Por último, la WF gris es la cantidad de agua que se necesita para diluir los contaminantes, tanto fertilizantes como pesticidas y otros, que llegan a un sistema natural, de modo de cumplir los estándares de calidad establecidos. Cada una de estas aguas presenta una WF parcial, cuya suma determina la WF total.

Estos conceptos han seguido evolucionando. Actualmente se puede calcular la WF de parte o toda la cadena productiva de un producto o servicio, la cual puede ser infinita al poder incorporarse variables indefinidamente. Por esto resulta fundamental establecer qué parte de dicha cadena contemplará el estudio. Aunque no existen directrices establecidas sobre cómo abordar esta decisión, se considera como regla general incluir la WF de todos los procesos dentro del sistema productivo que contribuyan significativamente a la WF total (Hoekstra *et al.*, 2009). En este estudio se considera “significativo” el agua empleada desde la siembra hasta la cosecha de las especies analizadas, ya que es la parte del proceso en la que más agua se utiliza, resultando, comparativamente despreciable el gasto atribuible a mano de obra o transporte, entre otros.

Existe una tendencia que busca fomentar que aquellos países con mayor disponibilidad de recurso hídrico produzcan grandes volúmenes de aquellos bienes que requieran más agua para su producción, exportándolos como materia prima a bajo precio a países donde este recurso es considerado escaso y de manera opuesta, que los países más áridos produzcan bienes con baja demanda hídrica pero de mayor valor agregado de modo de compensar la escasez causada por la distribución espacio-temporal del recurso (Aldaya *et al.*, 2010).

Dentro del contexto nacional, ya existen algunos avances para la aplicación de la metodología del WFN impulsados por la Fundación Chile, siendo la primera organización chilena adherida al WFN en calidad de sponsoring partner (socio auspiciador) al prestar apoyo técnico a través de una unidad capacitada por el WFN para medir la WF en los sectores más importantes del país (Fundación Chile, 2011). A pesar del aporte que hace

Fundación Chile a la gestión de los recursos hídricos al aplicar esta metodología, aun no abarca todas las áreas, entre las cuales aún no se incluyen está el desarrollo de biocombustibles.

Tomando estos antecedentes, la idea central de esta investigación corresponde estimar la WF verde, azul y gris que se utiliza en la producción, desde la siembra hasta la cosecha, de cultivos con potencial bioenergético, según la metodología de la WFN, de manera de generar información no existente, o muy incipiente, en nuestro país.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Estimar la Huella Hídrica de olivo (*Olea europaea*), palto (*Persea americana Mill.*), jojoba (*Simmondsia chinensis*) y ricino (*Ricinus communis*) en la Región de Coquimbo, Chile, según la metodología de la Water Footprint Network.

### **Objetivos Específicos**

Proponer una adaptación de la metodología planteada por la Water Footprint Network para ser aplicable a Chile.

Conocer los valores resultantes de la huella hídrica de olivo (*Olea europaea*), palto (*Persea americana Mill.*), jojoba (*Simmondsia chinensis*) y ricino (*Ricinus communis*) a través de la aplicación de la metodología de la Water Footprint Network adaptada para Chile.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio.

La investigación realizada se llevó a cabo en la comuna de Ovalle, provincia de Limarí perteneciente a la región de Coquimbo, Chile (Ver Figura 1). Se escogió esta zona por tratarse de uno de los lugares que utilizó el proyecto INNOVA-CORFO para su investigación y porque es una zona del país que cuenta con estudios hídricos de uso, disponibilidad y contaminación del recurso. Además, al ser parte de una región semiárida de gran actividad económica - agrícola, minería e industrial - consta de vasta información hidrológica (CAZALAC, 2006). Cabe destacar que el área de estudio se delimita por la necesidad de contar con datos de una zona específica, pero que la investigación no cuenta con una expresión espacial de los resultados.

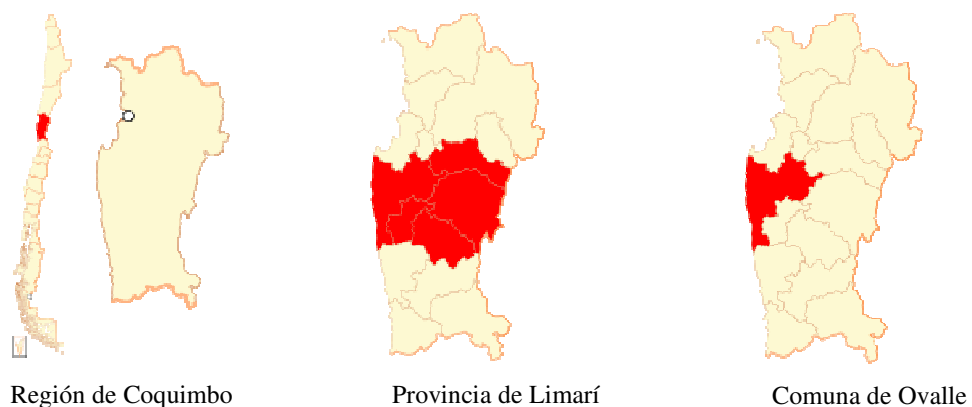


Figura 1. Localización Área de Estudio.

### Cultivos

Palto y olivo son cultivos que tradicionalmente se utilizan con fines alimenticios, por lo cual cuentan con vasta información tanto de su ciclo de vida, de cultivo y diferentes técnicas para su correcto manejo. Por otro lado, jojoba y ricino corresponden a especies que sólo en los últimos años han comenzado a ser estudiadas con fines productivos en nuestro país, por lo que algunos datos sobre sus prácticas de cultivo no están disponibles. A continuación se muestra una pequeña reseña junto a fotografías de cada cultivo basado principalmente en el libro “Cultivos energéticos: una apuesta de futuro” de Román *et al.* (2009).

### **Palto (*Persea americana* Mill.) var. Hass**

Especie perenne, nativa de Centro América y México, donde soporta hasta 35°C en clima tropical, es una especie reconocida por su uso como alimento humano, tanto de manera directa como en aceite, el cual posee buenas cualidades nutritivas.

La variedad Hass, correspondiente a un híbrido de raza guatemalteca y raza mexícolá (Lemus *et al.*, 2005) ha sido introducida en climas subtropicales desarrollándose de manera óptima entre los 22 y 26 °C y entre los 700 y 3.000 mm de precipitación anual, llegando a habitar hasta los 2.500 msnm. Puede resistir menores temperaturas, pero no tiene tolerancia a los climas invernales, ya que necesita veranos cálidos y secos. Se desarrolla en suelos de textura franca, bien drenados y aireados, con altos niveles de materia orgánica, niveles de acidez neutrales (entre 5,5 y 7) y de moderada o nula pendiente.

En Chile su cultivo se concentra entre la Región de Valparaíso y Metropolitana (80% de la producción nacional), mientras que entre la Región de Coquimbo y la Región de O'Higgins se produce en conjunto el 17%. Esta especie se desarrolla bien en zonas sin heladas (la temperatura crítica para la variedad Hass es de -1°C), con vientos moderados y sin exceso de radiación, requiriendo en la temporada entre 8.000 y 10.000 [mm m<sup>-3</sup> ha<sup>-1</sup>] cuando se encuentra en plena producción (Lemus *et al.*, 2005)

El fruto del palto (variedad Hass) corresponde a una baya redondeada de color negro a violáceo que contiene una sola semilla en su interior. El potencial energético de esta especie se encuentra en los frutos, donde el contenido de aceite fluctúa entre 12,7 y 34,8% estando constituido por distintos ácidos grasos (palmítico, palmitoleico, esteárico, oleico, linoleico, linolénico y gadoleico). La Figura 2 muestra fotografías del palto.

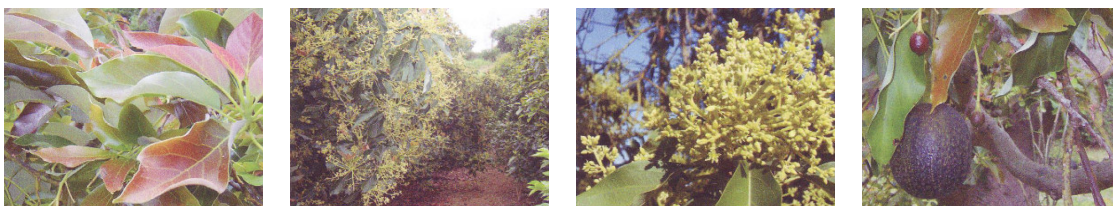


Figura 2. Fotografías Palto (*Persea americana* Mill.)

### **Olivo (*Olea europaea*)**

Especie perenne originaria de las tierras europeas colindantes al mar mediterráneo. Ha sido introducida en los cinco continentes. Su uso más reconocido es como alimento humano, consumiéndose directamente el fruto (aceituna) o transformándolo en aceite (aceite de oliva).

Adaptada a climas templados (mediterráneos) crece desde los 700 hasta los 3.000 msnm, soportando un rango de temperaturas entre 8 y 28 °C y una pluviometría entre 250 y 550



mm anuales en condiciones naturales, aumentando cuando se cultiva con fines productivos siendo necesario al menos suministrarle 800 mm (INDAP, 2009). Prefiere texturas medias de suelo, pero puede darse en aquellos de baja fertilidad que estén bien drenados. Se desarrolla en un pH entre 5,5 y 8,5, presentando una resistencia moderada a la salinidad.

El fruto del olivo corresponde a una drupa de entre 1 y 4 cm de largo con forma globosa o elipsoidal que contiene una sola semilla en su interior. El contenido de aceite de estas semillas es lo que le otorga potencial energético a la especie, varía entre 20 y 30% y está constituido por distintos ácidos grasos (palmítico, palmitoleico, margárico, heptadecenoico, esteárico, oleico, linoleico, araquídico, erúxico y lignocérico). La Figura 3 corresponde a distintas fotografías del olivo.



Figura 3. Fotografías Olivo (*Olea europaea*)

### **Ricino (*Ricinus communis*)**

El ricino, o higuera, es una especie nativa de Etiopía, originalmente desarrollado en clima tropical donde alcanza hasta los 13 metros, ha sido naturalizada a zonas templadas, incluido Chile, donde no supera los 3 metros (Falasca y Ulberich, 2008).

Se han desarrollado una serie de usos para esta especie, desde la producción de aceite de uso industrial o medicinal hasta uso como cerco vivo, cabe destacar que posee una proteína tóxica (Ricin) que le da un sabor desagradable, razón por la que no se potencia su uso alimenticio. También se utiliza como fertilizante, por su alto contenido de nitrógeno, e incluso como alimento animal, previo proceso de remoción del Ricin.

Tiene una alta tolerancia ambiental, desarrollándose entre los 7 y 30°C, con precipitaciones entre 200 y 4.200 mm, encontrándose hasta los 2.500 msnm. Sin embargo, las condiciones óptimas para su desarrollo oscilan entre los 10 y 23°C, los 500 y 1.000 mm y preferentemente entre los 300 y 1.500 msnm. Esta especie crece en zonas mediterráneas con veranos cálidos e inviernos de benignas heladas, de preferencia en suelos francos o franco arenosos profundos, que posean buen drenaje. Soporta pH entre 4,3 y 8,2 estando su óptimo entre los 6,5 y 7.

El fruto corresponde a una capsula dehiscente (siendo indehiscente en cultivos modernos, es decir, que la semilla no sale del fruto o lo hace de manera tardía) de forma ovoide que contiene 3 semillas en su interior. Esta especie tiene su potencial energético en el contenido de aceite de estas semillas, el cual varía entre 35 y 55% estando compuesto por diversos

ácidos grasos (palmítico, esteárico, oleico, ricinoleico, linoleico y linolénico). La Figura 4 muestra fotografías del ricino.



Figura 4. Fotografías Ricino (*Ricinus communis*)

### **Jojoba (*Simmondsia chinensis*)**

Especie originaria del desierto de Sonora en México, introducida en los cinco continentes, se desarrolla en climas desérticos caracterizados por una gran amplitud térmica. Reconocida por su uso medicinal e industrial, también es utilizada como alimento humano y forraje.

La jojoba crece preferentemente en condiciones áridas, con veranos secos y calurosos e inviernos con moderadas heladas. Puede encontrarse desde el nivel del mar hasta los 1.450 m de altitud, donde la temperatura oscile de 10 a 35°C y la precipitación entre 150 y 550 mm, considerándose óptimo entre 300 y 450 mm, siendo una especie que no tolera altas precipitaciones. Prefiere los suelos de textura arenosa y franca arenosa, pero soporta bien los francos, siempre que sean profundos y bien drenados. Su óptimo crecimiento es en suelos neutros, (pH 6 a 7) pero puede vivir sin problemas en pH entre 5 y 8, con hasta 25% de pendiente y ligeramente pedregosos, tolerando altos niveles de salinidad.

El fruto corresponde a una cápsula dehiscente de características muy variables al igual que sus semillas, las cuales son color café oscuro. El contenido de aceite de sus semillas corresponde a la fuente de su potencial energético, el cual varía entre 43,8 y 60% y está compuesto por diversos ácidos grasos (Palmítico, esteárico, oleico, gadoleico, erúcico y tetracosenoico). La Figura 5 corresponde a distintas fotografías de jojoba.



Figura 5. Fotografías Jojoba (*Simmondsia chinensis*)

## Materiales

### Manual de la WFN

Como guía para estimar la huella hídrica de los cultivos se utilizó el manual publicado por la Water Footprint Network (WFN) en Noviembre del año 2009, en el cual se explican las metodologías propuestas por Hoekstra *et al.* (2009) para el cálculo de la huella hídrica de cada color (verde, azul y gris) en los casos de un cultivo, producto, negocio, empresa y grupo de consumidores para distintas escalas espaciales (provincia, país, cuenca).

### Bases de datos

Los datos agroclimáticos utilizados en la metodología provienen de la base de datos personal del profesor Luis Morales Salinas, la cual corresponde a una recopilación de fuentes oficiales (Comunicación personal, 2011)<sup>1</sup>. Para la localización y humedad relativa se utilizó información de la estación Ovalle de la Dirección General de Agua (DGA) mientras que para la temperatura máxima y mínima media mensual, la velocidad media del viento y la fracción de insolación se utilizó información de la estación Aeródromo Tuqui de Ovalle.

Para el caso de las características de los cultivos, como la fecha de siembra para la zona, la duración de las etapas de crecimiento, el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), el factor de respuesta de la productividad ( $K_y$ ), la profundidad radicular, la altura máxima del cultivo y la fracción de agotamiento hídrico ( $p$ ), los datos de Allen *et al.* (1998) fueron modificados para la zona de Ovalle por el profesor Juan Manuel Uribe, en calidad de experto en Agroclimatología (Comunicación personal, 2011)<sup>2</sup>.

### Software Cropwat 8.0

Para calcular el uso consuntivo de agua del cultivo o requerimientos hídricos (CWU) es necesario hacer la sumatoria diaria de la evapotranspiración de los cultivos durante el período completo de crecimiento, se utilizó para esto el programa computacional CROPWAT 8.0, el cual la FAO tiene a disposición de los usuarios gratuitamente (FAO, 2010a). Se utilizaron como manuales para la correcta utilización del programa los documentos “Evapotranspiración de Cultivos: Guías para la determinación de los

---

<sup>1</sup> Sr. Luis Morales Salinas, Doctor en Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción. Académico Facultad de Ciencias Agronómicas Universidad de Chile.

<sup>2</sup> Sr. Juan Manuel Uribe, Ingeniero Agrónomo. Académico Facultad de Ciencias Agronómicas Universidad de Chile.

requerimientos de agua de los cultivos” (Allen *et al.*, 1998) y el “Manual CROPWAT 8.0” (FAO, 2010b).

### Estimación Huella del agua verde ( $WF_{\text{verde}}$ )

La huella del agua verde o huella hídrica verde ( $WF_{\text{verde}}$  [ $\text{m}^3\text{ton}^{-1}$ ]) (Ecuación 1) corresponde al cociente entre el agua utilizada por el cultivo proveniente de precipitación ( $pp$ , [m]) y el rendimiento del cultivo ( $y$ , [ $\text{ton m}^{-2}$ ]) (Hoekstra *et al.*, 2009).

La cantidad de agua que es aprovechada por el cultivo proveniente de precipitación es equivalente a la precipitación efectiva, por lo cual la huella hídrica verde puede entenderse como la razón entre la precipitación efectiva de un lugar determinado con el rendimiento del cultivo, considerándose este como la cantidad de producto final cosechado, dividido por el área en que fue producido.

$$WF_{\text{verde}} = \frac{Pp_{\text{ef}}}{y}$$

Ecuación 1

Donde,

$WF_{\text{verde}}$  Huella Hídrica Verde [ $\text{m}^3\text{ton}^{-1}$ ]  
 $Pp_{\text{ef}}$  Precipitación Efectiva en metros [m]  
 $y$  Rendimiento [ $\text{ton m}^{-2}$ ]

En cuanto al rendimiento de cada cultivo, se consideró el promedio anual obtenido durante toda la vida del cultivo, es decir la media entre años productivos y no productivos, o la media entre los distintos niveles de producción asociados a la madurez de los individuos (Hoekstra *et al.*, 2009).

### Precipitación efectiva ( $Pp_{\text{ef}}$ )

La precipitación efectiva ( $Pp_{\text{ef}}$  [m]) se define como la cantidad de agua precipitada que no se pierde a través de escorrentía superficial ni por percolación profunda, por lo que queda disponible para el aprovechamiento de la planta (FAO, 2010b).

Para su cálculo se utilizó la fórmula del AGLW (Servicio de Recursos, Fomento y Aprovechamiento de Aguas de la FAO) la cual fue elaborada por un grupo de expertos del Servicio de Aguas de la FAO para climas semiáridos y subhúmedos en la cual se considera la estimación de la precipitación efectiva como un efecto combinado de la precipitación confiable (80% probabilidad de excedencia) con las pérdidas por escorrentía superficial y percolación profunda (FAO, 2010b). La Ecuación 2 se utilizó cuando la precipitación media mensual era menor o igual a 70 milímetros, en caso de que la precipitación media mensual supere los 70 [mm] se utiliza la Ecuación 3.

$$Pp_{ef} = \frac{0,6 * P_m - 10}{1000}$$

Ecuación 2

$$Pp_{ef} = \frac{0,8 * P_m - 24}{1000}$$

Ecuación 3

Donde,

$Pp_{ef}$  Precipitación Efectiva en metros [m]  
 $P_m$  Precipitación media mensual en milímetros [mm]

El Cuadro 1 muestra los valores de precipitación media mensual promedio de la estación Ovalle de la Dirección General de Aguas (DGA) para el periodo comprendido entre 1950 y 2003, siendo a estos valores a los que se les calculó la precipitación efectiva según ya fue descrito.

Cuadro 1: Datos estación Ovalle de la Dirección General de Aguas (DGA) de Precipitación media mensual promedio entre 1950 y 2003, en milímetros.

MES	PRECIPITACIÓN PROMEDIO MENSUAL [mm].
Enero	0,1
Febrero	0,1
Marzo	1,2
Abril	4,4
Mayo	16,4
Junio	27,9
Julio	32,3
Agosto	18,9
Septiembre	7,4
Octubre	2,6
Noviembre	1
Diciembre	0,3

Fuente: CAZALAC, 2006

### Estimación Huella del agua azul ( $WF_{azul}$ )

La huella del agua azul o huella hídrica azul ( $WF_{azul}$ , [ $m^3/ton$ ]), Ecuación 4, corresponde al cociente entre el agua aprovechada por el cultivo proveniente de riego y el rendimiento del cultivo (Hoekstra *et al.*, 2009).

La cantidad de agua que utiliza el cultivo proveniente de riego corresponde a la diferencia entre los requerimientos hídricos del cultivo y la precipitación efectiva. Siendo el valor de

requerimientos de riego el que se divide por el rendimiento, entendiéndose este como la cantidad de producto final cosechado, dividido por el área en que fue producido.

$$WF_{azul} = \frac{CWU_{riego}}{y}$$

Ecuación 4

Donde,

$WF_{azul}$  Huella Hídrica Azul [ $m^3 ton^{-1}$ ]  
 $CWU_{riego}$  Requerimientos de riego de los cultivos [m]  
 $y$  Rendimiento [ $ton m^{-2}$ ]

Para el rendimiento se consideró la media entre años productivos y no productivos o entre los distintos niveles de producción asociados a la madurez de los individuos (Hoekstra *et al.*, 2009).

### Requerimientos de riego del cultivo ( $CWU_{riego}$ )

Para determinar la cantidad de agua que necesita cada cultivo anualmente proveniente de riego ( $CWU_{riego}$ ), se deben restar los requerimientos hídricos de los cultivos con el valor de la precipitación efectiva, tal como se muestra en la Ecuación 5.

$$CWU_{riego} = CWU - Pp_{ef}$$

Ecuación 5

Donde,

$CWU_{riego}$  Requerimientos de riego de los cultivos [m]  
 $CWU$  Requerimientos hídricos de los cultivos [m]  
 $Pp_{ef}$  Precipitación Efectiva en milímetros [m]

### Requerimientos hídricos del cultivo ( $CWU$ )

Los requerimientos hídricos del cultivo ( $CWU$ ), se definen como el inverso a la evapotranspiración de cultivo, es decir, la cantidad de agua que debe suministrarse a la planta para compensar las pérdidas provocadas por la evapotranspiración, con el fin de lograr un adecuado crecimiento y desarrollo (Allen *et al.*, 1998). Dicho de otra manera, es el agua requerida para compensar la cantidad de la misma que se pierde por evapotranspiración. En términos numéricos es equivalente a la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ).

Para determinar los requerimientos hídricos de cada cultivo se utilizó el programa CROPWAT 8.0 de la FAO, en el cual a través de la estimación de la evapotranspiración potencial en conjunto de ciertas características del cultivo y del suelo se obtienen los requerimientos hídricos de cada cultivo (FAO, 2010a).

### Evapotranspiración potencial o de referencia (ET<sub>o</sub>)

La FAO define la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) como la suma de las pérdidas de agua por transpiración de la planta con aquellas producidas por la evaporación del suelo de una superficie cultivada estándar. Dicha superficie se conoce como superficie de referencia la cual corresponde a “Un cultivo hipotético de referencia con una altura asumida de 0.12 [m], una resistencia superficial fija de 70 [s m<sup>-1</sup>] y un albedo de 0.23”. El cultivo de referencia podría compararse con un cultivo extenso y de altura uniforme de pasto verde, bien regado, que crece activamente dando sombra a la totalidad del suelo (Allen *et al.*, 1998).

De entre las fórmulas disponibles en el programa CROPWAT 8.0 para determinar la ET<sub>o</sub>, se escogió la de FAO Penman-Monteith, ya que fue catalogada en 1990 por un grupo de expertos de la FAO como aquella que entrega los resultados más certeros y similares a los resultantes en cálculos empíricos (Allen *et al.*, 1998).

Para utilizar esta fórmula fue necesario ingresar datos sobre localización, humedad relativa [%], temperatura [C°], velocidad del viento [m/s] e insolación directa (FAO, 2010b), utilizándose la información de la estación Ovalle de la DGA para los dos primeras variables y del Aeródromo Tuqui de Ovalle para las siguientes tres.

- a) **Localización:** Fue necesario conocer la altura (msnm) junto con la ubicación geográfica en latitud y longitud, del lugar donde se emplazarían los cultivos. Con estos datos el programa ayuda a ajustar parámetros referentes al valor medio local de la presión atmosférica local y a la radiación extraterrestre (Allen *et al.*, 1998). El Cuadro 2 muestra los datos de localización utilizados para los cálculos.

Cuadro 2: Datos de Longitud, latitud y altitud de la estación Ovalle DGA.

Longitud Oeste	71,16°
Latitud Sur	30,55°
Altitud	234 msnm

- b) **Temperatura:** La fórmula FAO Penman-Montheit requiere los valores de temperatura máxima y mínima promedio mensual en grados centígrados [C°], los cuales se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3: Temperatura máxima y mínima promedio mensual [C°] en estación Aeródromo Tuqui de Ovalle

MES	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T° max	28,2	28,1	26,3	23,1	20,3	18	17,3	19	20,9	22,9	25,1	26,9
T° min	11,9	11,8	10,7	9,1	7,6	6,4	5,4	6	6,8	7,7	9,3	10,9

- c) **Humedad Relativa:** La fórmula FAO Penman-Montheit requiere los valores de humedad relativa promedio mensual expresada como porcentaje [%] los que se muestran en el Cuadro 4.

Cuadro 4: Humedad relativa promedio mensual [%] en estación Ovalle DGA.

MES	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Humedad	63	65	67	72	75	74	77	74	72	66	65	63

d) **Velocidad del viento:** La fórmula FAO Penman-Montheit requiere la velocidad promedio mensual del viento en metros por segundo medida a 2 [m] de altura, datos que se muestran en el Cuadro 5.

Cuadro 5: Velocidad promedio mensual del viento [m s-1] en estación Aeródromo Tuqui de Ovalle

MES	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Velocidad del viento	2,8	2,8	2,6	2,2	1,7	1,8	1,9	2,0	2,3	2,6	2,9	3,1

e) **Insolación Directa:** Representa la duración de la recepción de radiación solar sin la interferencia de las nubes. Además de depender de la presencia o ausencia de éstas, lo hace de la posición del sol, la cual está en función de la latitud y el día del año (FAO, 2010b). La insolación directa se representó como fracción de insolación ( $n/N$ ), lo que corresponde a la razón entre las horas reales de sol sin interferencia de nubes ( $n$ ) con las horas potenciales de sol en el mismo lugar ( $N$ ), los datos utilizados se muestran en el Cuadro 6.

Cuadro 6: Fracción de insolación directa ( $n/N$ ) en estación Aeródromo Tuqui de Ovalle

MES	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Fracción insolación directa	0,8	0,7	0,8	0,6	0,4	0,2	0,4	0,3	0,4	0,7	0,7	0,8

### Características de los cultivos

Con el fin de conocer los requerimientos hídricos de los cultivos en estudio para estimar su huella de agua azul fue necesario conocer ciertas características de cada especie involucrada en la investigación.

De cada cultivo fue necesario conocer la fecha de siembra para la zona, etapas de crecimiento (duración en días), coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), factor de respuesta de la productividad ( $K_y$ ), profundidad radicular [m], altura máxima del cultivo [m] y fracción de agotamiento hídrico ( $p$ ) (FAO, 2010b). Los datos utilizados corresponden a la modificación de los propuestos por Allen *et al.* (1998) por el profesor Juan Manuel Uribe para la zona de Ovalle.

a) **Fecha de siembra:** Este dato en conjunto con la duración de las etapas de crecimiento, permite al programa calcular la fecha de cosecha. (FAO, 2010b). En el caso de cultivos perennes el dato de la fecha de siembra se reemplaza por el momento en que vuelve a comenzar el ciclo del árbol (Allen *et al.*, 1998). En el Cuadro 7 se muestra la fecha de siembra utilizada para cada cultivo utilizado.



Cuadro 7: Fecha de siembra en la zona de Ovalle.

CULTIVO	PALTO	OLIVO	RICINO	JOJOBA
Fecha siembra	Marzo	Marzo	Marzo	Noviembre

b) **Etapas de crecimiento:** Las etapas de crecimiento corresponden a la duración en días de las cuatro etapas del ciclo de un cultivo, ver Cuadro 8, estas etapas son: inicial, desarrollo, mediados de temporada y etapa final o de cosecha (FAO, 2010b). En el apéndice I se describen las principales características de cada etapa según lo que plantea Allen *et al.* (1998) en la publicación N° 56 de la FAO titulada “Evapotranspiración del cultivo”.

Cuadro 8: Duración en días de cada etapa de crecimiento para cada cultivo.

ETAPA DE CRECIMIENTO	PALTO	OLIVO	RICINO	JOJOBA
Inicial	65	55	20	18
Desarrollo	182	168	60	54
Medio	40	30	75	83
Final	78	112	210	210

c) **Coefficiente de cultivo (Kc):** El valor del coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) resume las características que diferencian a un cultivo particular del cultivo de referencia (FAO, 2010b).<sup>3</sup>

Durante el crecimiento del cultivo esta relación varía en función de los cambios fenológicos de las especies y el grado de cobertura del suelo. Su valor se ha determinado experimentalmente para diversos cultivos, donde se ha visto influenciado principalmente por el tipo de cultivo y en segundo lugar por el clima y la evaporación del suelo (Allen *et al.*, 1998).

Para estimar los requerimientos hídricos del cultivo fue necesario conocer los valores del coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) inicial, de media temporada y de la etapa final de crecimiento con los cuales el programa CROPWAT 8.0 interpola los valores correspondientes a la etapa de desarrollo y finales de temporada. En el caso de especies perennes se hizo una distinción entre los primeros años, cuando no son productivos y una vez que comienza la producción de frutos. El Cuadro 9 muestra los datos utilizados de coeficiente de cultivo para cada etapa de desarrollo según cada cultivo utilizado.

<sup>3</sup> Allen *et al.* (1998) lo define como el cociente entre la evapotranspiración máxima o de cultivo ( $ET_c$ ) con la evapotranspiración potencial o de referencia ( $ET_o$ ).

Cuadro 9: Coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) según etapa de desarrollo y cultivo.

$K_c$	PALTO	PALTO NP <sup>U</sup>	OLIVO	OLIVO NP <sup>U</sup>	RICINO	JOJOBA
Inicio	0,6	0,45	0,65	0,6	0,35	0,4
Medio	0,85	0,65	0,7	0,6	1,15	0,55
Final	0,75	0,7	0,7	0,65	0,55	0,6

<sup>U</sup>NP: No Productivo.

d) **Factor de respuesta de la productividad ( $K_y$ ):** Este factor describe como la productividad del cultivo va disminuyendo según disminuye la  $ET_c$  como resultado a la falta de agua. Esta reducción relativa de la productividad es más pequeña durante las etapas de desarrollo y maduración, aumentando en las etapas de floración y formación del fruto (Allen *et al.*, 1998). Los datos para los cultivos en estudio se presentan en el Cuadro 10.

Cuadro 10: Factor de respuesta de la productividad según etapa de desarrollo para cada cultivo.

$K_y$	PALTO	OLIVO	RICINO	JOJOBA
Inicial	0,85	0,65	0,55	0,6
Desarrollo	0,9	0,7	0,6	0,65
Medio	1	0,75	0,65	0,7
Final	1,05	0,9	0,75	0,85
Término	1,2	0,95	0,85	0,8

e) **Profundidad radicular:** LA FAO define este parámetro en el manual CROPWAT 8.0 como la profundidad de raíces que determina la capacidad de los cultivos para aprovechar las reservas de agua presentes en el suelo. En el Cuadro 11 se muestran los valores de profundidad radicular para cada cultivo (FAO, 2010b). Para su aplicación en el programa es necesario conocer:

- i. Profundidad radicular en la etapa inicial: representa la profundidad efectiva del suelo a partir de la cual las plántulas son capaces de extraer agua, normalmente corresponde a raíces entre 0,25 y 0,6 metros.
- ii. Profundidad radicular máxima: Corresponde a la profundidad máxima que presentan las raíces de las especies cuando son cultivadas, es decir, cuando está siendo manejado su desarrollo, esto impide que las raíces crezcan hasta encontrar agua.

Cuadro 11: Profundidad inicial y máxima radicular para cada cultivo.

CULTIVO	PALTO	OLIVO	RICINO	JOJOBA
Profundidad Radicular Etapa Inicial [m]	0,45	0,60	0,40	0,55
Profundidad Radicular Máxima [m]	1	1,7	2	1,1

f) **Altura máxima del cultivo:** Este parámetro permite al programa CROPWAT 8.0 ajustar los valores del coeficiente de cultivo en condiciones no estándar, especialmente cuando los valores para humedad relativa son notoriamente distintos a 45% o cuando la velocidad del viento difiere de los 2 [ms<sup>-1</sup>] (FAO, 2010b). El Cuadro 12 muestra los valores utilizados.

Cuadro 12: Altura máxima de los cultivos.

CULTIVO	PALTO	OLIVO	RICINO	JOJOBA
Altura Máxima [m]	3	5	3	2

g) **Fracción de agotamiento hídrico (p):** La fracción de agotamiento hídrico (p) corresponde a la fracción promedio del agua total disponible en el suelo (ADT) que puede ser agotada de la zona radicular antes de que el cultivo presente estrés hídrico, los valores de esta variable correspondientes a cada cultivo en estudio se muestran en el Cuadro 13.

Cuadro 13: Fracción de agotamiento hídrico de cada cultivo.

CULTIVO	PALTO	OLIVO	RICINO	JOJOBA
Fracción de agotamiento hídrico	0,7	0,65	0,5	0,65

h) **Rendimiento de los cultivos (y):** El rendimiento del cultivo, fue considerado como la cantidad de frutos cosechados (peso húmedo) dividido la superficie en metros cuadrados en que fue producido.

El rendimiento puede ser por tonelada cosechada de otra estructura u órgano de la planta, pero se consideró de los frutos porque esta investigación tiene fines bioenergéticos a partir del aceite presente en ellos.

El término de rendimiento promedio corresponde al promedio ponderado del rendimiento entre años productivos y no productivos o entre los distintos niveles de rendimiento según la edad del cultivo, siendo este el valor que se utilizó para todos los procedimientos que incluyeran al rendimiento como una variable. El Cuadro 14 se muestra los valores.

Cuadro 14: Rendimiento de los cultivos [ton ha<sup>-1</sup>]

	PALTO	PALTO NP	OLIVO	OLIVO NP	RICINO	JOJOBA JOVEN	JOJOBA MADURA
Edad (años)	3-40	1-3	5-100	1-5	1-3	1-3	4-25
Rendimiento	22,5	0	37,5	0	1	0,6	2,5
Rendimiento promedio	PALTO		OLIVO		RICINO	JOJOBA	
	20,8125		35,625		1	2,272	

Fuente: Román *et al.*, 2009

### Características del suelo

Dado que la finalidad de esta investigación es estimar la huella hídrica máxima se asumió que el suelo no presenta limitantes hídricas para el crecimiento del cultivo, es decir, se estimó para un suelo sin restricciones de humedad, por lo que se utilizó la opción “CWR option” del programa CROPWAT 8.0, por lo que no fue necesario incorporar datos de suelo (Hoekstra *et al.*, 2009).

En caso de necesitarse un resultado más específico o para un menor periodo de tiempo, se puede utilizar la segunda opción que proporciona el programa llamada “Irrigation schedule option” la cual mediante la incorporación de las variables del suelo descritas en el Apéndice II modela el balance de agua en el suelo para el periodo de crecimiento como un dato más para la estimación de los requerimientos hídricos de los cultivos (Hoekstra *et al.*, 2009).

### Estimación Huella del Agua Gris

La huella del agua gris o huella hídrica gris ( $WF_{gris}$  [ $m^3/ton$ ]) (Ecuación 6) se entiende como el volumen de agua necesario para diluir los contaminantes que llegan a los cuerpos de agua receptores para cumplir los niveles de calidad establecidos, estimándose sólo para los principales productos químicos utilizados en cada cultivo (Hoekstra *et al.*, 2009).

$$WF_{gris} = \left( \frac{\left( \frac{\alpha * AR}{C_{max} - C_{nat}} \right)}{y} \right)$$

Ecuación 6

Donde,

$WF_{gris}$	Huella Hídrica Gris [ $m^3 ton^{-1}$ ]
$\alpha$	Fracción de lixiviación
$AR$	Aplicación estimada de productos químicos [ $Kg ha^{-1}$ ]
$C_{max}$	Concentración máxima aceptable de contaminantes [ $Kg m^{-3}$ ]
$C_{nat}$	Concentración natural del contaminante [ $Kg m^{-3}$ ]
$y$	Rendimiento [ $ton ha^{-1}$ ]

Se consideran como contaminantes los fertilizantes, pesticidas e insecticidas aplicados en mayor cantidad a los cultivos, los cuales en gran parte de los casos dependen directamente de las prácticas de manejo que se utilicen (Hoekstra *et al.*, 2009).

Dado que hay que considerar sólo la fracción de los contaminantes que llega hasta los cuerpos de agua dulce, y no la totalidad utilizada, se multiplica la aplicación estimada de cada producto químico por la fracción de lixiviación, la cual indica la fracción de agua que

infiltra y pasa a través de la zona radicular, llevando cierta parte de los fertilizantes, pesticidas e insecticidas desde el cultivo hasta los cuerpos de agua dulce.

### Aplicación estimada de los principales productos químicos (AR)

Se estimó la huella hídrica gris para los principales fertilizantes aplicados a los cultivos. Respecto a los pesticidas e insecticidas no se calculó su WF gris por no contar con suficiente información sobre las cantidades promedio aplicadas a los cultivos.

Dado que la producción de cultivos agroenergéticos en este proyecto debe ser en suelos marginales, se asumió que los fertilizantes son aportados a los cultivos a través de fertirriego. Esta tecnología ha logrado un mejor control y aprovechamiento de agua y nutrientes permitiendo cultivar en suelos antes considerados inadecuados. Consiste en entregar de forma precisa los insumos –agua y fertilizantes– de manera continua acorde al metabolismo de cada etapa fenológica del cultivo, buscando potenciar su productividad (SOQUIMICH, 2001). El Cuadro 15 muestra los valores de aplicación estimada de los principales productos químicos (AR) utilizados en los cultivos de este estudio a través de fertirriego y cuando corresponda, su equivalencia a elemento atómico.

Cuadro 15: Aplicación estimada de productos químicos (AR) en palto, olivo, ricino y jojoba través del método de riego Fertirriego.

FERTILIZANTE Kg ha <sup>-1</sup>	PALTO <sup>1/</sup>	OLIVO <sup>1/</sup>	RICINO <sup>1/</sup>	JOJOBA <sup>2/</sup>
N <sup>3/</sup>	433	333	135	300
K <sub>2</sub> O	333	383	15	173
K	278	319	13	144
S <sup>3/</sup>	50	55	s/i	s/i

Fuente: modificado de SOQUIMICH, 2001

<sup>1/</sup>Los datos expuestos corresponden a una proporción de lo que propone SOQUIMICH, esto ya que los valores entregados correspondían a los necesarios para obtener rendimientos diferentes a los utilizados a lo largo de esta investigación.

<sup>2/</sup>Los datos originales corresponden a 100, 48 y 48 ppm de N, K<sub>2</sub>O y K respectivamente (Botti, 2001), para conocer detalles sobre la conversión de ppm a Kg ha<sup>-1</sup> y de molécula a elemento químico ver Apéndice III.

<sup>3/</sup>Aplicados en forma de nitrato y sulfato respectivamente.

### Fracción de Lixiviación

Corresponde a la parte de las sustancias químicas aplicadas a los cultivos que infiltran y percolan hasta llegar a los cuerpos de agua dulce.

Por la falta de datos específicos a cada cultivo sobre el porcentaje del químico aplicado que lixivia hasta alcanzar agua dulce se asumirá el valor utilizado por Hoekstra and Chapagain (2008) de 10% para todos los fertilizantes. Esto teniendo en cuenta que cada fertilizante posee una movilidad diferente dentro del suelo, la cual se ve influenciada por condiciones ambientales y de manejo.

## Concentración de Contaminantes

### Natural

Corresponde a los niveles de contaminantes presentes de manera natural en los cuerpos de agua dulce. Los datos utilizados corresponden a parte de los resultados obtenidos por el “Centro del agua para zonas áridas y semiáridas de América latina y el Caribe” (CAZALAC, 2006) en su informe sobre la “Aplicación de metodologías para determinar la eficiencia de uso del agua, estudio de caso en la región de Coquimbo”. El Cuadro 16 muestra las concentraciones naturales consideradas para esta investigación.

Cuadro 16: Concentración natural de contaminantes en la Provincia de Limarí, Región de Coquimbo, Chile.

FERTILIZANTE	Concentración Natural [mg L <sup>-1</sup> ]	Concentración Natural [Kg m <sup>-3</sup> ]
Sulfatos	150	0,15
Potasio	5	0,005
Nitratos	2,5	0,0025

Fuente: CAZALAC, 2006

### Legal

Corresponde a los niveles máximos de concentración de contaminantes que la ley establece pueden estar presentes en los cuerpos de agua dulce. Para los sulfatos y nitratos se utilizó la Norma Chilena de calidad para el agua potable NCh 409/1.Of2005 (INN, 2005), en el caso del potasio al no encontrarse referencias nacionales se utilizó lo normado por el decreto No.25991-S de Costa Rica: Reglamento de Calidad de Agua Potable (Ministerio de Salud de Costa Rica, 1997). En el Cuadro 17 se muestran los valores utilizados.

Cuadro 17: Concentración máxima legal de contaminantes.

FERTILIZANTE	[mg L <sup>-1</sup> ]	[Kg m <sup>-3</sup> ]
Sulfatos	250	0,25
Potasio	10	0,01
Nitratos	10	0,01

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La metodología propuesta por la Water Footprint Network (WFN), para este caso de estudio, fue replicable sin necesidad de ser modificada, pero si teniendo en cuenta algunas consideraciones.

Cabe destacar que todos los datos utilizados se encuentran en una escala temporal equivalente a un año, por lo que todos los resultados expuestos a continuación, es decir las cantidades de cada color de Huella Hídrica (WF) y los resultados intermedios para su estimación, son anuales.

### Evapotranspiración potencial o de Referencia (ET<sub>o</sub>)

Los resultados obtenidos, detallados en el Cuadro 18, muestran para cada mes, en base a las condiciones climáticas y atmosféricas presentes en la zona de Ovalle, la evapotranspiración potencial.

Cuadro 18: Evapotranspiración potencial en la zona de Ovalle

MES	T° MIN [°C]	T° MAX [°C]	H%	VIENTO [ms <sup>-1</sup> ]	n/N	RAD [MJm <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> ]	ETO [mm día <sup>-1</sup> ]	ETO [mm mes <sup>-1</sup> ]
Enero	11,9	28,2	63	2,8	0,8	27,9	5,92	183,52
Febrero	11,8	28,1	65	2,8	0,7	23,8	5,28	147,84
Marzo	10,7	26,3	67	2,6	0,8	22	4,51	139,81
Abril	9,1	23,1	72	2,2	0,6	14,7	2,91	87,30
Mayo	7,6	20,3	75	1,7	0,4	9,5	1,84	57,04
Junio	6,4	18	74	1,8	0,2	6,4	1,5	45,00
Julio	5,4	17,3	77	1,9	0,4	8,8	1,52	47,12
Agosto	6	19	74	2	0,3	9,8	1,94	60,14
Septiembre	6,8	20,9	72	2,3	0,4	13,9	2,75	82,50
Octubre	7,7	22,9	66	2,6	0,7	22,5	4,18	129,58
Noviembre	9,3	25,1	65	2,9	0,7	25,2	5,03	150,90
Diciembre	10,9	26,9	63	3,1	0,8	28,5	5,88	182,28
<b>PROMEDIO</b>	<b>8,6</b>	<b>23</b>	<b>69</b>	<b>2,4</b>	<b>0,57</b>	<b>17,8</b>	<b>3,61</b>	<b>109,42</b>

La FAO determina como valores promedio de evapotranspiración para regiones templadas con temperatura promedio diaria moderada (cerca a los 20°C) un rango entre 2 y 7 mm día<sup>-1</sup> (Allen *et al.*, 1998). Tomando esto como referencia, los resultados obtenidos se enmarcan dentro del rango establecido, durante todos los meses del año.

### Precipitación Efectiva

El Cuadro 19 muestra los resultados de precipitación efectiva para la zona de Ovalle. Los valores obtenidos indican que las precipitaciones no son la principal fuente de agua para los cultivos.

Cuadro 19: Precipitación efectiva media según datos de la estación Ovalle DGA entre 1950 y 2003

MES	PP [mm]	PP ef [mm]	PP ef [m]
Marzo	0,1	0	0
Abril	0,1	0	0
Mayo	1,2	0	0
Junio	4,4	0	0
Julio	16,4	0	0
Agosto	27,9	6,7	0,0067
Septiembre	32,3	9,4	0,0094
Octubre	18,9	1,3	0,0013
Noviembre	7,4	0	0
Diciembre	2,6	0	0
Enero	1	0	0
Febrero	0,3	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>112,6</b>	<b>17,3</b>	<b>0,0173</b>

Los resultados previamente expuestos muestran que sólo durante 3 meses del año existe precipitación efectiva y siempre en niveles bajos, sobre todo en relación a las necesidades medias de los cultivos de este estudio, las cuales se describen a continuación.

### Requerimientos hídricos de los cultivos (CWU)

Se obtuvieron los requerimientos hídricos para cada cultivo, diferenciando según corresponde las necesidades entre los primeros años en que los cultivos no son productivos o son jóvenes y cuando son adultos o plenamente productivos.

Para todos los cultivos utilizados existen referencias de los requerimientos hídricos que poseen, sin embargo fue estimada para cada uno utilizando la misma metodología de manera de contar con resultados comparables.

### Palto

Los resultados obtenidos de requerimientos hídricos para el palto adulto, ver Cuadro 20, señalan que deben suministrarse anualmente 1.058 milímetros de agua, sin considerar su procedencia (precipitación o riego), para compensar el agua que pierde por evapotranspiración y así crecer de manera óptima.



Román *et al.*, (2009) señala que esta especie necesita entre 700 y 3.000 milímetros dependiendo de las condiciones ambientales en que se encuentra. Los 1.058 mm anuales obtenidos se consideran un resultado concordante al estar dentro del rango propuesto por dicho autor.

Cuadro 20: Requerimientos hídricos de palto en etapa productiva (desde los 3 años)

MES	ETAPA	K <sub>C</sub>	ETc [mm día <sup>-1</sup> ]	ETc/CWU [mm mes <sup>-1</sup> ]
Marzo	Inicial	0,60	2,65	81,8
Abril	Inicial	0,60	1,78	53,5
Mayo	Desarrollo	0,62	1,19	36,9
Junio	Desarrollo	0,68	1,04	31,1
Julio	Desarrollo	0,73	1,14	35,3
Agosto	Desarrollo	0,78	1,56	48,5
Septiembre	Desarrollo	0,84	2,36	70,9
Octubre	Desarrollo	0,89	3,67	114,1
Noviembre	Media	0,92	4,63	138,9
Diciembre	Med-final	0,91	5,29	164,1
Enero	Final	0,88	5,13	158,7
Febrero	Final	0,84	4,40	123,8
<b>TOTAL ANUAL</b>				<b>1057,6</b>

### Palto no productivo

Los resultados obtenidos de requerimientos hídricos para el palto no productivo, ver Cuadro 21, señalan que deben suministrarse anualmente 859 milímetros de agua - sin considerar si proviene de precipitación o riego - para compensar el agua que pierde por evapotranspiración y así crecer de manera óptima.

Este valor también se encuentra dentro del rango entregado por Román *et al.*, (2009), en esta etapa el cultivo tiene un menor requerimiento hídrico producto de que al ser joven (no productivo) tiene menos superficie de tejidos por lo que es menor la superficie que evapotranspira.

Cuadro 21: Requerimientos hídricos de palto no productivo (hasta los 3 años)

MES	ETAPA	K <sub>C</sub>	ETc [mm día <sup>-1</sup> ]	ETc/CWU [mm mes <sup>-1</sup> ]
Marzo	Inicial	0,45	1,99	61,4
Abril	Inicial	0,45	1,34	40,1
Mayo	Desarrollo	0,47	0,9	27,8
Junio	Desarrollo	0,51	0,79	23,8
Julio	Desarrollo	0,56	0,87	27,2
Agosto	Desarrollo	0,6	1,2	37,4

(Continua)

Cuadro 21 (Continuación)

MES	ETAPA	KC	ETc [mm día <sup>-1</sup> ]	ETc/CWU [mm mes <sup>-1</sup> ]
Septiembre	Desarrollo	0,65	1,83	55
Octubre	Desarrollo	0,7	2,87	89,2
Noviembre	Media	0,72	3,63	108,8
Diciembre	Med-final	0,75	4,35	135
Enero	Final	0,77	4,5	139,4
Febrero	Final	0,77	4,05	113,8
<b>TOTAL ANUAL</b>				<b>858,9</b>

### Olivo

Los resultados obtenidos de requerimientos hídricos para el olivo adulto, ver Cuadro 22, señalan que requiere, de precipitación o riego, anualmente 974 milímetros para compensar el agua que pierde por evapotranspiración y así crecer de manera óptima.

Cerca del 95% de los olivos se cultivan en secano, pero es necesario tener en consideración que bajo los 800 mm de precipitación el riego se hace necesario (INDAP, 2009) y tal como muestran los CWU obtenidos (974 mm) las precipitaciones del área de estudio, no bastan para satisfacer la demanda hídrica del cultivo.

Cuadro 22: Requerimientos hídricos de olivo en etapa productiva (desde los 5 años)

MES	ETAPA	K <sub>c</sub>	ETc [mm día <sup>-1</sup> ]	ETc/CWU [mm mes <sup>-1</sup> ]
Marzo	Inicial	0,65	2,87	88,70
Abril	Ini-des	0,65	1,93	57,90
Mayo	Desarrollo	0,66	1,28	39,60
Junio	Desarrollo	0,69	1,06	31,80
Julio	Desarrollo	0,71	1,11	34,30
Agosto	Desarrollo	0,73	1,45	45,10
Septiembre	Desarrollo	0,75	2,11	63,40
Octubre	Media	0,77	3,15	98,00
Noviembre	Final	0,78	3,91	117,30
Diciembre	Final	0,78	4,52	140,30
Enero	Final	0,78	4,57	141,60
Febrero	Final	0,78	4,12	115,70
<b>TOTAL ANUAL</b>				<b>973,70</b>

### Olivo no productivo

Los resultados obtenidos de requerimientos hídricos para el olivo no productivo, ver Cuadro 23, señalan que deben suministrarse anualmente 892 milímetros de agua, sin considerar su procedencia (precipitación o riego), para compensar el agua que pierde por evapotranspiración y así crecer de manera óptima.

Este valor es menor que el del olivo adulto ya que, al igual que en el caso del palto no productivo, al no estar completamente desarrollado tiene menor superficie de tejidos a través del cual evapotranspirar.

Cuadro 23: Requerimientos hídricos de olivo no productivo (hasta los 5 años)

MES	ETAPA	K <sub>c</sub>	ETC [mm día <sup>-1</sup> ]	ETC/CWU [mm mes <sup>-1</sup> ]
Marzo	Inicial	0,60	2,65	81,80
Abril	Ini-des	0,60	1,79	53,60
Mayo	Desarrollo	0,61	1,17	36,20
Junio	Desarrollo	0,62	0,96	28,70
Julio	Desarrollo	0,63	0,99	30,70
Agosto	Desarrollo	0,65	1,28	39,80
Septiembre	Desarrollo	0,66	1,85	55,50
Octubre	Media	0,67	2,74	85,20
Noviembre	Final	0,71	3,60	107,90
Diciembre	Final	0,73	4,23	131,30
Enero	Final	0,73	4,28	132,60
Febrero	Final	0,73	3,85	108,20
<b>TOTAL ANUAL</b>				<b>891,5</b>

### Ricino

Se obtuvo que el ricino requiere 1.057 milímetros de agua anualmente –de precipitación o riego- para compensar el agua que pierde por evapotranspiración y así crecer de manera óptima (ver Cuadro 24).

Considerando el rango de precipitación señalado por Román *et al.*, (2009) de entre 200 y 4.200 milímetros – condicionado por las condiciones ambientales - se consideran los 1.057 mm anuales obtenidos un resultado coherente al estar dentro del rango.

Cuadro 24: Requerimientos hídricos de ricino.

MES	ETAPA	K <sub>C</sub>	ETC [mm día <sup>-1</sup> ]	ETC/CWU [mm mes <sup>-1</sup> ]
Marzo	Ini-des	0,38	1,65	51,30
Abril	Desarrollo	0,70	2,04	61,10
Mayo	Des-med	1,06	2,03	63,00
Junio	Media	1,14	1,76	52,70
Julio	Media	1,14	1,78	55,40
Agosto	Final	1,11	2,19	68,10
Septiembre	Final	1,03	2,89	86,60
Octubre	Final	0,95	3,90	121,10
Noviembre	Final	0,87	4,37	131,20
Diciembre	Final	0,79	4,60	142,40
Enero	Final	0,71	4,18	129,40
Febrero	Final	0,64	3,36	94,60
<b>TOTAL ANUAL</b>				<b>1056,90</b>

### Jojoba

Los resultados obtenidos de requerimientos hídricos para jojoba, ver Cuadro 25, señalan que se requieren anualmente cerca de 748 milímetros de agua para crecer de manera óptima.

En contraste a lo que menciona la literatura, donde se menciona que se desarrolla entre los 150 y 550 mm (Román *et al.*, 2009), se obtuvo que esta especie requiere 748 mm de agua anualmente. Esto puede deberse a que a pesar de su gran tolerancia a la sequía para su óptimo desarrollo requiere mayores niveles de agua. Considerando que la finalidad en este caso es cultivar la especie es necesario brindarle las condiciones para lograr su máxima productividad.

Cuadro 25: Requerimientos hídricos de jojoba

MES	ETAPA	K <sub>C</sub>	ETC [mm día <sup>-1</sup> ]	ETC/CWU [mm mes <sup>-1</sup> ]
Marzo	Media	0,6	2,66	82,3
Abril	Final	0,61	1,81	54,3
Mayo	Final	0,61	1,18	36,3
Junio	Final	0,61	0,94	28,3
Julio	Final	0,61	0,95	29,7
Agosto	Final	0,61	1,21	37,8

(Continúa)

Cuadro 25 (Continuación)

MES	ETAPA	$K_C$	ETC	ETC/CWU
			[mm día <sup>-1</sup> ]	[mm mes <sup>-1</sup> ]
Septiembre	Final	0,61	1,72	51,6
Octubre	Final	0,61	2,52	78,2
Noviembre	Ini-des	0,41	2,06	61,9
Diciembre	Desarrollo	0,5	2,92	90,9
Enero	Des-med	0,59	3,48	108
Febrero	Media	0,6	3,17	89,1
<b>TOTAL ANUAL</b>				<b>748,4</b>

### Requerimientos de riego de los cultivos ( $CWU_{riego}$ )

Una vez obtenidos los requerimientos hídricos de cada cultivo y la precipitación efectiva del lugar estudiado se determinaron los requerimientos de riego ( $CWU_{riego}$ ), los que corresponden a la diferencia entre los requerimientos hídricos y la precipitación efectiva. En el cuadro 26 se muestran los  $CWU_{riego}$  obtenidos para cada especie y etapa productiva cuando corresponda.

Cuadro 26: Requerimientos de riego de los cultivos.

MES	$PP_{ef}$ [mm mes <sup>-1</sup> ]	$CWU_{riego}$ [mm mes <sup>-1</sup> ]					
		PALTO	PALTO NP <sup>1</sup>	OLIVO	OLIVO NP <sup>1</sup>	RICINO	JOJOBA
Marzo	0	81,8	61,4	88,7	81,8	51,3	82,3
Abril	0	53,5	40,1	57,9	53,6	61,1	54,3
Mayo	0,1	36,8	27,7	39,5	36,1	62,9	36,2
Junio	6,6	24,5	17,2	25,2	22,1	46,1	21,7
Julio	9,2	26,1	18	25,1	21,5	46,2	20,5
Agosto	1,3	47,2	36,1	43,8	38,5	66,8	36,5
Septiembre	0,1	70,8	54,9	63,3	55,4	86,5	51,5
Octubre	0	114,1	89,2	98	85,2	121,1	78,2
Noviembre	0	138,9	108,8	117,3	107,9	131,2	61,9
Diciembre	0	164,1	135	140,3	131,3	142,4	90,9
Enero	0	158,7	139,4	141,6	132,6	129,4	108
Febrero	0	123,8	113,8	115,7	108,2	94,6	89,1
<b>TOTAL ANUAL</b>	<b>17,3</b>	<b>1040,3</b>	<b>841,6</b>	<b>956,4</b>	<b>874,2</b>	<b>1039,6</b>	<b>731,1</b>

<sup>1</sup>NP: No productivo

Al analizar los resultados obtenidos de requerimientos de riego de los cultivos se aprecia que el aporte de la precipitación puede considerarse prácticamente nulo. De manera porcentual la precipitación efectiva representa: 1,64% para palto, para 2,01% palto no

productivo, 1,78% para olivo, 1,94% para olivo no productivo, 1,64% para ricino y 2,31% para jojoba. Esto significa que para estos cultivos, más del 97% del agua necesaria para satisfacer sus requerimientos hídricos debe ser suministrada a través de riego.

En el Cuadro 27 se muestra un resumen de los datos obtenidos, por cultivo, necesarios para estimar la Huella Hídrica verde y azul.

Cuadro 27: Datos necesarios para estimar le  $WF_{\text{verde}}$  y la  $WF_{\text{azul}}$

	PALTO	PALTO NP <sup>1</sup>	OLIVO	OLIVO NP <sup>1</sup>	RICINO	JOJOBA
y [ton m <sup>-2</sup> ]	0,0021	-	0,0036	-	0,0001	0,0002272
Pp <sub>ef</sub> [m año <sup>-1</sup> ]	0,0173	0,0173	0,0173	0,0173	0,0173	0,0173
CWU <sub>riego</sub> [mm año <sup>-1</sup> ]	1,0403	0,8416	0,9564	0,8742	1,0396	0,7311

<sup>1</sup>NP: No productivo

### Huella del agua verde ( $WF_{\text{verde}}$ )

En la obtención de datos para la Huella Hídrica verde no hubo inconvenientes dada la existencia de registros pluviométricos en la zona.

Utilizando los datos presentados en el Cuadro 27 se procedió a estimar la huella del agua verde ( $WF_{\text{verde}}$ ), para lo cual se dividieron los valores de precipitación efectiva por los rendimientos de cada cultivo. El Cuadro 28 muestra los valores de  $WF_{\text{verde}}$  estimados para cada cultivo. Para el detalle sobre el cálculo ver Apéndice IV.

Cuadro 28: Estimación  $WF_{\text{verde}}$  para palto, olivo, ricino y jojoba.

	PALTO	OLIVO	RICINO	JOJOBA
Rendimiento [ton m <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup> ]	0,0021	0,0036	0,0001	0,0002
Precipitación efectiva [m]	0,0173	0,0173	0,0173	0,0173
WF verde anual [m <sup>3</sup> ton <sup>-1</sup> ]	8,312	4,856	173,000	76,144

Estos valores representan la cantidad de metros cúbicos de agua proveniente de precipitaciones que se utilizan para la producción de una tonelada de frutos cosechados.

Al comparar los resultados obtenidos entre los cultivos se aprecia que el ricino es el que utiliza el mayor volumen de agua proveniente de precipitaciones, siendo el olivo el que tiene la menor Huella Hídrica verde. Este valor es el resultado de una proporción inversa; entre mayor sea el rendimiento de un cultivo, menor será el volumen de su Huella Hídrica verde.

Dado que la lluvia no puede manejarse, para reducir la huella hídrica verde de un cultivo hay que aumentar el rendimiento del mismo, esto se logra modificando prácticas de manejo, las que varían según cultivo.

Desde una visión global, aumentar el rendimiento del cultivo significa que menos de la misma especie deberá ser producido en otros lugares para mantener la misma producción total. Así, reducir la Huella del Agua verde en un lugar, al aumentar el rendimiento del cultivo, puede significar la reducción de la Huella del Agua azul en la producción agrícola mundial (Hoekstra *et al.*, 2009).

### Huella del agua azul ( $WF_{\text{azul}}$ )

En la obtención de datos para la Huella Hídrica azul cabe destacar que muchos datos dependen de las prácticas de manejo utilizadas por lo que pueden variar significativamente de un lugar a otro, dificultando encontrar valores promedios o estándares para ser utilizados en la investigación.

Utilizando los datos presentados en el Cuadro 27 se procedió a estimar la Huella del Agua azul ( $WF_{\text{azul}}$ ), para lo cual se dividieron los valores de requerimientos de riego de cada cultivo por su rendimiento. El Cuadro 29 muestra los valores de  $WF_{\text{azul}}$  estimados para cada cultivo. Para detalle sobre el cálculo ver Apéndice IV.

Cuadro 29: Estimación  $WF_{\text{azul}}$  para palto, olivo, ricino y jojoba.

	PALTO	PALTO NP <sup>1</sup>	OLIVO	OLIVO NP <sup>1</sup>	RICINO	JOJOBA
y [ton m <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup> ]	0,0021	0	0,0036	0	0,0001	0,0002
CWU <sub>riego</sub> [m año <sup>-1</sup> ]	1,0403	0,8416	0,9564	0,8742	1,0396	0,7311
WF azul anual [m <sup>3</sup> ton <sup>-1</sup> ]	492,683		267,309		10396,000	3217,870

<sup>1</sup>NP: No productivo

Estos valores representan la cantidad de metros cúbicos de agua proveniente de riego que se utilizan para la producción de una tonelada de frutos cosechados.

Esta estimación de la  $WF_{\text{azul}}$  sólo consideró el agua de riego evapotranspirada por el cultivo, excluyendo lo que pudo evaporarse desde los embalses de almacenamiento de agua de riego y desde los canales que transportan el recurso. La cantidad de agua “perdida” en ambos casos puede resultar significativa por lo que idealmente debe ser considerada al calcular la Huella Hídrica de un cultivo.

Al comparar los resultados obtenidos entre los cultivos se aprecia que el ricino es el que requiere el mayor volumen de agua proveniente de riego, mientras que el olivo corresponde al que posee la menor huella hídrica azul. Al igual que en la Huella verde, existe una relación proporcional entre el rendimiento y el volumen de la Huella obtenida, sin embargo en este caso además de tratar de aumentar el rendimiento del cultivo, se pueden implementar técnicas que apunten a optimizar la utilización del agua.

De manera general – considerando cualquier cultivo y no los cuatro específicos que aborda esta investigación -si se pretende disminuir la huella hídrica azul se pueden sugerir varias

acciones, entre las cuales esta adoptar un sistema de riego de alta eficiencia, elegir cultivos que se desarrollen de manera óptima en las condiciones climáticas del lugar para necesitar menos riego, maximizar el rendimiento e implementar medidas que busquen disminuir las pérdidas de agua desde los estanques y canales, por mencionar algunas.

### Huella del agua gris ( $WF_{gris}$ )

Producto de la poca información accesible sobre las concentraciones naturales de contaminantes en Chile y la escasa legislación sobre las concentraciones máximas permisibles de las mismas, no se encuentra disponible suficiente datos al respecto—teniendo incluso que recurrir a normativa de otros países— permitiendo estimar la huella hídrica gris de un reducido grupo de agroquímicos.

Lo anterior, sumado a que la aplicación de productos químicos a un cultivo depende de diversas variables — características edafológicas y prácticas de manejo principalmente — dificultan aún más contar con los datos necesarios para estos cálculos. Es por estas razones que finalmente sólo se pudo calcular la  $WF_{gris}$  para 3 fertilizantes de uso frecuente. El Cuadro 30 muestra los valores estimados de los metros cúbicos de agua necesarios para diluir los contaminantes utilizados en la producción de una tonelada de frutos cosechados para los cuatro cultivos en estudio. Para más detalle sobre el cálculo ver Apéndice V.

Cuadro 30: Estimación  $WF_{gris}$  para palto, olivo, ricino y jojoba

$Wf_{gris}$	PALTO	OLIVO	RICINO	JOJOBA
N	277,4	124,6	1800,0	1760,6
K	267,1	179,1	260,0	1267,6
S	2,4	1,5	s/i	s/i
Total	546,9	305,3	2060,0	3028,2

Los valores obtenidos corresponden sólo a algunos fertilizantes, es decir, a estos valores habría que sumarle lo resultante de la aplicación de pesticidas, herbicidas, fungicidas y otros agroquímicos que se utilicen en el cultivo de cualquiera de estas especies, generando esto una subestimación de la Huella Hídrica gris ya que de manera general entre más fertilizantes u otros agroquímicos se apliquen mayor será la cantidad de agua necesaria para diluirlos hasta cumplir con los estándares.

Sin olvidar las falencias de los valores obtenidos, ya que representan solo una fracción del requerimiento total de agua de la  $WF_{gris}$ , se aprecia que es Olivo el que genera la menor Huella Hídrica gris producto del alto rendimiento de la especie en comparación con las otras. Por otro lado, ricino – a pesar de necesitar la menor cantidad de fertilizantes - es quien posee la mayor huella hídrica gris, producto del bajo rendimiento que posee esta especie.

Dentro de la agricultura es posible reducir bastante la  $WF_{gris}$  aplicando menos químicos y utilizando mejores tecnologías que consideren el momento propicio para la aplicación de



cada uno, de manera que una menor fracción de los contaminantes llegue a los cuerpos de agua por percolación o lixiviación.

### Huella del Agua Total

La Huella Hídrica total corresponde a la suma de las Huellas Hídricas de los tres colores de agua. Los valores obtenidos muestran la cantidad de agua que se utiliza desde la siembra hasta la cosecha para la producción de una tonelada de fruto. El hecho de separar la fuente de agua permite generar estrategias distintas para abordar cada color de agua. En el Cuadro 31 se muestran los resultados para cada cultivo.

Cuadro 31: Estimación  $WF_{total}$  para palto, olivo, ricino y jojoba.

WF [ $m^3 \text{ ton}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ]	PALTO	OLIVO	RICINO	JOJOBA
Verde	8	5	173	76
Azul	493	267	10.396	3.218
Gris	547	305	2.060	3.028
<b>Total</b>	1.048	577	12.629	6.322

Al observar los resultados de Huella Hídrica verde es ricino quien presenta el mayor valor, siendo de más del doble del valor que le sigue, obtenido por jojoba. Ambos valores son notablemente mayores que los obtenidos por palto y olivo. Esta disparidad en los resultados es producto del bajo rendimiento que poseen ricino y jojoba en comparación a las otras dos especies analizadas. El menor valor de WF verde corresponde al olivo, seguido de cerca por el palto.

Los resultados obtenidos en la estimación de Huella Hídrica azul muestran que el menor valor corresponde al de olivo seguido por palto - con una diferencia de más del 80%- siendo ambos valores notablemente menores que los obtenidos por jojoba y ricino, llegando este último a más de  $10.000 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1} \text{ año}^{-1}$ .

En cuanto a la Huella Hídrica gris es jojoba quien posee el mayor valor seguido de ricino, en ambos casos producto de sus bajos rendimientos. El menor valor para este color de agua lo obtuvo el olivo.

Para el caso de olivo y palto se aprecia que la WF gris es la forma en que más se usa agua durante su producción y que los valores obtenidos para ricino y jojoba si bien no son el color en que obtienen el mayor valor, son altos en relación a los otros cultivos en estudio.

Obtener los mayores valores en la WF gris se vuelve alarmante al recordar que no todos los químicos realmente utilizados fueron incorporados en su cálculo, por lo que en la realidad dicho valor debe ser aún mayor. Lo positivo de que sea ésta la fracción mayor, es que su disminución es relativamente más fácil que la de los otros colores. No se puede hacer que un cultivo necesite menos agua, pero si se pueden modificar las técnicas de manejo para

que sea necesario aplicar menos químicos en su producción, el fomento e incentivo de prácticas orgánicas permitiría reducir notoriamente la  $WF_{gris}$

Por lo previamente expuesto, se considera que los resultados referentes a la Huella Hídrica verde y azul son más representativos de la realidad que los obtenidos para Huella Hídrica gris, razón que genera un margen de precisión en los valores obtenidos para la Huella Hídrica total. Sin embargo, a pesar de las dificultades mencionadas, la metodología propuesta por la WFN puede seguir siendo aplicada en el país sin necesitar ninguna modificación.

Respecto a la Huella Total es el olivo el que posee el menor valor y ricino el mayor. Esto como resultado del alto y bajo rendimiento que poseen respectivamente. Así se evidencia una relación directa entre el rendimiento del cultivo y el tamaño de la huella de agua generada, siendo que a mayor rendimiento menor huella hídrica.

Es importante tener en cuenta que algunos cultivos, como palto y olivo, durante los primeros años prácticamente no producen frutos por lo que no hay rendimiento, lo que implica que en esos años sus  $WF$  serán mayores e irán disminuyendo a medida que el rendimiento aumente.

A nivel global existe información sobre Huella del Agua, incluido para cultivos en Chile, publicados en el Reporte de Cultivos de la WFN (Mekonnen y Hoekstra, 2010). En la Figura 6 se muestran comparativamente los valores entregados para el caso de palto y olivo en la zona de Coquimbo en el mencionado reporte y los resultados obtenidos en esta investigación.

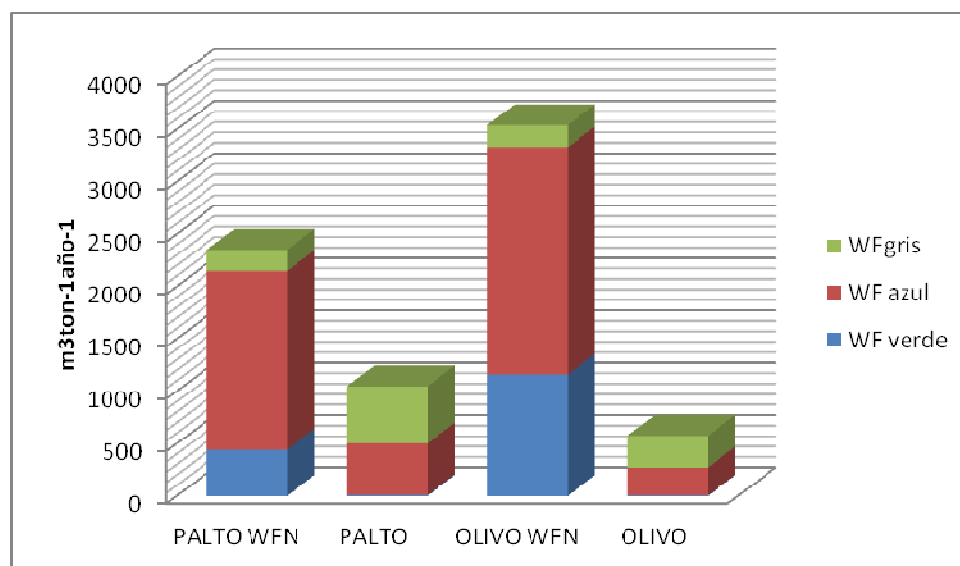


Figura 6: Comparación resultados de la Huella Hídrica total de palto y olivo según resultados obtenidos en este caso de estudio y los publicados por la WFN en su reporte.

Destaca que en los resultados de la WFN para ambos cultivos difieren de los obtenidos en esta investigación. Esto puede ser producto de utilizar datos de distintas fuentes, muchas veces estimaciones globales y no información local, diferencias en los rendimientos, requerimientos hídricos o duración de los cultivos. Otra causa para dicha diferencia es que este trabajo asumió que no habían restricciones de humedad en el suelo por lo que no se incorporaron dichas variables para la estimación de los requerimientos hídricos, a diferencia de lo hecho por la WFN quienes si realizaron el balance de agua en el suelo para calcular los requerimientos de agua de los cultivos.

La Huella Hídrica azul agrícola puede reducirse aumentando la productividad del agua (Hoekstra *et al.*, 2009). Generalmente los agricultores se centran en aumentar la productividad de la tierra, lo cual tiene lógica en suelos pobres con abundante agua, pero en el caso inverso, en que el recurso limitante es el agua y no el suelo, se vuelve más importante maximizar la productividad del agua.

En agricultura, incrementar la productividad del agua significa que con la misma cantidad del recurso se riega una mayor superficie de suelo, lo cual sumado a prácticas de manejo que busquen incrementar el rendimiento, permiten aumentar la producción mundial de un cultivo al mismo tiempo que se disminuye la Huella Hídrica azul.

Desde un punto de vista global, incrementar la productividad del agua en lugares con alta disponibilidad del recurso ayuda a reducir la necesidad de hacer un uso intensivo del agua en lugares con escasez de la misma. Según Hoekstra *et al.*, (2009) el disminuir de esta manera la presión sobre el recurso hídrico donde es más escaso demuestra la utilidad de reducir la Huella Hídrica por tonelada de producto siempre que sea posible, incluso en lugares sin problemas de disponibilidad del recurso.

## CONCLUSIONES

La metodología propuesta por la Water FootPrint Network (WFN) es sencilla de llevar a cabo, ya que requiere datos que para gran parte de los cultivos están disponibles, por lo que no es necesario plantear adaptaciones para la realidad nacional. En caso de estar estimándose para cultivos que no tengan disponibles los datos necesarios se considera posible estimarlos a través de modelación.

En cuanto a las Huellas Hídricas verde y azul la metodología planteada es accesible dentro de la realidad nacional, por lo que puede utilizarse sin modificaciones. Para la Huella Hídrica gris es recomendable aumentar la información necesaria para su estimación. El hecho poder calcularla para tan pocos agroquímicos de todos los realmente usados, impide poder utilizarla a futuro como una herramienta de decisión.

La disponibilidad de los datos de cada cultivo necesarios para la estimación de la WF azul resultó directamente proporcional con el desarrollo que tiene cada especie en el país. Las fuentes para encontrar información para palto y olivo fueron más y más accesibles que para ricino y jojoba, estos últimos recientemente integrados a las especies desarrolladas en el país con fines económicos, ya sean alimenticios, industriales o cosméticos.

De todos los datos utilizados, destaca el rol fundamental que cumple el rendimiento del cultivo en la cantidad de agua necesaria para producir una tonelada, por lo que este factor no puede dejar de tenerse en consideración a la hora de seleccionar el cultivo a utilizar. Debe incluirse como una más de las variables que se ponderarán a la hora de decidir que cultivos es conveniente emplear para generar biocombustibles en suelos marginales, sobre todo en condiciones de aridez donde el agua es sin duda el elemento restrictivo.

En cuanto a los resultados obtenidos es esta investigación, sería recomendable el incentivo del desarrollo del olivo en suelos marginales para fines bioenergéticos debido a poseer la Huella Hídrica total menor ( $577 \text{ [m}^3 \text{ ton}^{-1} \text{ año}^{-1}]$ ) producto de la combinación de alto rendimiento con bajos requerimientos hídricos; siendo sus CWU superiores sólo a los de jojoba, que obtuvo una WF total de  $6.322 \text{ [m}^3 \text{ ton}^{-1} \text{ año}^{-1}]$  por su bajo rendimiento. El palto, a pesar de tener un buen rendimiento tiene altos requerimientos hídricos por lo que su WF Total fue de  $1.048 \text{ [m}^3 \text{ ton}^{-1} \text{ año}^{-1}]$ . El ricino se deja como una débil opción ya que, a pesar de ser el segundo cultivo con mayor nivel de aceite entre los estudiados, tiene un rendimiento muy bajo y requerimientos hídricos altos –solo superado por el palto - lo que contribuye a que su Huella Hídrica total sea la más alta ( $12.629 \text{ [m}^3 \text{ ton}^{-1} \text{ año}^{-1}]$ ); mientras no se mejore su rendimiento y disminuya la aplicación de agroquímicos no se considera muy provechoso su desarrollo en suelos marginales.

A pesar de ser una investigación teórica, entregó resultados que pueden ayudar en la toma de decisiones. Sin embargo, se recomienda llevar a cabo una toma de datos en terreno como

también incorporar el balance de agua en el suelo para obtener resultados más exactos de manera de obtener información concluyente.

La Huella del agua, ya sea de un producto, proceso, país o consumidor, además de cuantificar el uso del recurso se puede transformar en una herramienta de gestión que permita fundamentar la creación de normas que ayuden a lidiar con la “crisis del agua” que como se ha planteado anteriormente, más que la escasez del recurso hídrico corresponde a una mala gestión del mismo.

Para lograr utilizar la WF como herramienta de gestión, se debe evaluar su sustentabilidad - ambiental, social y económica- a escala local, nivel de cuenca y de manera global. En el caso de Chile mientras no se cuente con información confiable para todas las variables utilizadas en su estimación, los resultados obtenidos no podrán usarse más que como un indicador o valor estimativo, es decir, no se cuenta con los datos necesarios para utilizar la WF como una herramienta concluyente en la toma de decisiones ni para una mejor gestión de recursos hídricos.

Esta investigación INNOVA-CORFO-09CN14-5726 buscó desarrollar tecnologías que permitan lograr cierta independencia de combustibles fósiles, los cuales, además de ser cada vez más escasos – lo que incrementa su precio – incorporan carbono que ya se encontraba fuera del ciclo a la atmósfera, lo que se traduce en última instancia en acelerar el cambio climático. Se apoya y reconoce el valor de seguir fomentando proyectos que ayuden a dilucidar la mejor manera de dejar de depender del petróleo, tanto para el beneficio actual como el de las futuras generaciones.

## BIBLIOGRAFÍA

Aldaya, M., A. Garrido, R. Llamas and C. Varela-Ortega. 2010. Chapter 6: Water footprint and virtual water trade in Spain. 11p.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. 1998 Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Food and Agriculture Organization, Rome, Italy. 298p.

Botti, C., 2001. La Jojoba. Departamento de producción agrícola, Facultad de Ciencias Agronómicas. 65p.

Centro del agua para zonas áridas y semiáridas de América latina y el Caribe (CAZALAC), 2006. Aplicación de metodologías para determinar la eficiencia de uso del agua estudio de caso en la región de Coquimbo. Gobierno Regional, Región de Coquimbo 893p.

Chapagain, A.K. and S. Orr. 2008. An improved water footprint methodology linking global consumption to local water resources: A case of Spanish tomatoes. *Journal of Environmental Management*. 90: 1219-1228.

Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. 2007. *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. London: Earthscan, and Colombo: International Water Management Institute. 645p.

Dietzenbacher, E. and E. Velázquez. 2006. Virtual water and water trade in Andalusia. A study by means of an input-output model. Department of Economics. Universidad Pablo Olavide, Sevilla, España. 26p.

Falasca, S. y Ulberich, A. 2008 [en línea]. Potencial de Argentina para la producción de tártago (*Ricinus communis* var. *communis*). Universidad Nacional del Centro. Disponible en [http://www.biodiesel.com.ar/download/Ricino\\_BiodiselArgentinaWeb.pdf](http://www.biodiesel.com.ar/download/Ricino_BiodiselArgentinaWeb.pdf). Citado: 28 de Septiembre de 2012

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2010a. [en línea] Natural Resources and Environmental Department. CROPWAT model. Disponible en [http://www.fao.org/nr/water/infores\\_databases\\_cropwat.html](http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html) Citado: 12 de Agosto de 2010.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2010b. Manual CROPWAT. Rome, Italy. 64p

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2002. [en línea] Agua y Cultivos: Logrando el uso óptimo del agua en la agricultura. Roma. 22p.

- Fundación Chile, 2011. [en línea] Medición de la Huella del Agua. Disponible en: <http://www.fundacionchile.com/queofrecemos/servicios/sustentabilidad/medici%C3%B3n-de-huella-de-agua/> Citado: 29 de Septiembre de 2011.
- Gerbens-Leenes, W., A. Hoekstra and T. Van der Meer. 2009. The water footprint of bioenergy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 106(25):10219-10223.
- Hoekstra, A., A. Chapagain, M. Aldaya and M. Mekonnen. 2009. *Water Footprint Manual: State of Art 2009*. Water Footprint Network. Enschede, Netherlands. 127p.
- Hoekstra, A.Y. and Chapagain, A.K., 2008. *Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources*. Oxford, UK. 220p.
- Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP), 2009. [en línea] Cultivo del Olivo. Disponible en <http://beta1.indap.cl/Docs/Documentos/Fructicultura/Olivo/EL%20CULTIVO%20DEL%20OLIVO.pdf> Citado: 23 de Diciembre de 2010
- Instituto Nacional de Normalización, 2005. Norma Chilena de calidad para el agua potable NCh 409/1.Of2005. Chile. 17 p.
- Lemus, G., R. Ferreyra, P. Gil, P. Maldonado, C. Toledo, C. Barrera y J. Calderon. 2005. El cultivo del Palto. La Cruz, Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA N° 129. 76 pp.
- Llamas, R. 2005. Los colores del agua, el agua virtual y los conflictos hídricos. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 99(2): 369-389.
- Madrid, C. 2007. *Hidratar el Metabolismo Socioeconómico: Los Flujos de Agua Virtual y el Metabolismo Hídrico*. Doctor(a) en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma de Barcelona, Instituto de Ciencia y Tecnología Ambiental. Barcelona, España. 168p.
- Mekonnen, M., y A. Hoekstra, 2010. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products, Volume 2: Appendices. *Value of Water Research Report Series No. 47*, UNESCO-IHE, Netherlands. 1196p.
- Ministerio de Salud, Costa Rica, 1997. *DECRETOS No.25991-S: Reglamento de Calidad de Agua Potable*. Costa Rica. 13p.
- Novo, P., A. Garrido, M. Llamas and C. Varela-Ortega. 2008. Are virtual water «flows» in Spanish grain trade consistent with relative water scarcity?. *Papeles de Agua Virtual*. 1: 1-37.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2012. [en línea] *Decenio Internacional para la Acción El Agua Fuente de Vida 2005-2015*. Disponible en <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/scarcity.shtml> Citado: 18 Julio de 2012.

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y Cultura (UNESCO). 1979. Balance Hídrico Mundial y Recursos Hidráulico de la Tierra, Estudios e Informes de Hidrología 25° ed. Centro de Estudios Hidrográficos de España.

Rodríguez, R., A. Garrido, M. Llamas y C. Varela-Ortega. 2008. La huella hidrológica de la agricultura española. Papeles de Agua Virtual. 2: 1-38.

Román, C., K. Vásquez, R. Valenzuela, G. Martínez, G. Lillo, L. Morales, R. Fuster, A. de la Fuente, J.M. Uribe, L.O. Faúndez y M. Paneque. 2009. Cultivos energéticos: una apuesta de futuro. M. Paneque (ed.). Santiago, Chile. 224 p.

Sociedad Química y Minera de Chile (SOQUIMICH), 2001. Agenda del Salitre. 1512p.



## APENDICES

### APENDICE I

#### Etapas de Crecimiento

Principales características de cada etapa de crecimiento del cultivo según lo que plantea Allen *et al.*, (1998) en la publicación N° 56 de la FAO titulada “Evapotranspiración del cultivo”:

- Etapa Inicial: comprende desde la fecha de siembra, hasta el momento que la vegetación verde cubre cerca del 10% de la superficie del suelo. La duración depende principalmente del tipo de cultivo, la variedad y el clima. Durante este período la evapotranspiración ocurre principalmente como evaporación del suelo ya que la superficie foliar suele ser pequeña por lo que hay poca área en que se produce transpiración. En caso de especies perennes, esta etapa empieza cuando vuelve a comenzar el ciclo.
- Etapa de Desarrollo del Cultivo: corresponde al tiempo, medido en días, que transcurre desde que la vegetación cubre el 10% del suelo hasta que ésta completamente tapado. En muchas especies el fin de esta etapa coincide con el inicio de la floración.
- Etapa de Medios de Temporada: Abarca el periodo de días desde la cobertura completa del suelo hasta el inicio de la madurez. Este momento corresponde a aquel en que la evapotranspiración de cultivo (ET<sub>c</sub>) disminuye en relación a la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>). En el cultivo esto se manifiesta como el comienzo del amarillamiento, senescencia o pérdida de las hojas como también como la aparición de un color marrón en los frutos.
- Etapa de finales de Temporada: También llamada etapa tardía de crecimiento, corresponde al período entre el inicio de la madurez y la cosecha o el punto en que alcanza una completa senescencia. Ciertos cultivos perennes pueden desarrollarse todo el año, por lo cual podría considerarse que el término de la etapa final coincide con el comienzo de la etapa inicial.

## APENDICE II

### Variables del suelo

Descripción de las variables del suelo necesarias para utilizar la opción “Irrigation schedule option” en la estimación de los requerimientos hídricos de los cultivos (Hoekstra *et al.*, 2009) con el programa CROPWAT 8.0

**Humedad de suelo inicialmente disponible:** Contenido de humedad del suelo al inicio de la temporada de cultivo. Se calcula como el producto del Agua Disponible Total (ADT) por el Agotamiento inicial de humedad del suelo (FAO, 2010b).

**Humedad de suelo total disponible (ADT):** También conocida como “Agua Disponible Total”. Representa la cantidad total de agua disponible para el cultivo. Se define como la diferencia en el contenido de humedad del suelo entre la Capacidad de campo (CC) y el Punto de Marchitez Permanente (PMP). Depende de la textura, estructura y contenido de materia orgánica del suelo (FAO, 2010b).

**Agotamiento inicial de humedad del suelo (% ADT):** Indica la sequedad del suelo al inicio de la época de cultivo. En la mayoría de los casos sólo se puede hacer una estimación de la condición inicial de humedad del suelo en función del cultivo anterior, los períodos de descanso precedentes o de la estación seca (FAO, 2010b).

**Tasa máxima de infiltración de la precipitación:** Representa la lámina de agua que puede infiltrar en el suelo en un período de 24 horas, se calcula en función del tipo de suelo, la pendiente y la intensidad de la precipitación o del riego (FAO, 2010b).

**Profundidad radicular máxima:** Normalmente depende de las características genéticas de los cultivos, aunque a veces el suelo y ciertos horizontes alterados pueden restringir la profundidad radicular máxima (FAO, 2010b).

### APENDICE III

#### Equivalencia de ppm a Kg ha-1

Sea

$$1 \text{ ppm} = \frac{1 \text{ mg}}{1.000.000 \text{ mg}} \quad 1 \text{ ha} = 10.000 \text{ m}^2$$

Profundidad de muestreo: 20 cm = 0,2m

Densidad aparente (Da): 1,5 Mg m<sup>-3</sup>

#### Metodología

1. Transformar profundidad de muestreo a volumen:

$$0,2\text{m} * 10.000\text{m}^2 = 2.000 \text{ m}^3$$

2. Volumen de suelo por Densidad aparente:

$$2.000\text{m}^3 * 1,5 \text{ Mg m}^{-3} = 3.000 \text{ Mg} = 3,0 * 10^6 \text{ Kg}$$

Este resultado corresponde al volumen de suelo de 1 hectárea con 20 cm de profundidad a una densidad aparente de 1,5 Mg m<sup>-3</sup>.

3. Transformar con una proporción simple

a) para 100 ppm de N

$$0,0001 \text{ kg} = 1 \text{ Kg suelo}$$

$$X = 3,0 * 10^6 \text{ kg suelo} \quad \text{Sea } X = 0,0001 * 3,0 * 10^6 = 300 \text{ kg ha}^{-1}$$

b) para 48 ppm de P y K

$$0,000048 \text{ kg} = 1 \text{ Kg suelo}$$

$$Y = 3,0 * 10^6 \text{ kg suelo} \quad \text{Sea } Y = 0,000048 * 3,0 * 10^6 = 144 \text{ kg ha}^{-1}$$

#### Transformación de elementos atómicos a unidad de Nutrientes.

Se tiene	Se divide por	Se obtiene
N	1	N
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,29	P
K <sub>2</sub> O	1,20	K
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	3	S

Fuente: Modificado de SOQUIMICH, 2001

## APENDICE IV

### Huella Hídrica Verde

$$WF_{verde} = \frac{P_{ef}}{y}$$

Donde,  
 $WF_{verde}$  Huella Hídrica Verde [ $m^3 ton^{-1}$ ]  
 $P_{ef}$  Precipitación Efectiva en metros [m]  
 $y$  Rendimiento [ $ton m^{-2}$ ]

CULTIVO	$P_{P_{ef}}$ [m año <sup>-1</sup> ]	$y$ [ton m <sup>-2</sup> ]	$WF_{verde}$ [m <sup>3</sup> ton <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ]
Palto	0,0173	0,002081250	8,3123123
Olivo	0,0173	0,003562500	4,86
Ricino	0,0173	0,000100000	173,00
Jojoba	0,0173	0,000227200	76,14

### Huella Hídrica Azul

$$WF_{azul} = \frac{CWU_{riego}}{y}$$

Donde,  
 $WF_{azul}$  Huella Hídrica Azul [ $m^3 ton^{-1}$ ]  
 $CWU_{riego}$  Requerimientos de riego cultivos [m año<sup>-1</sup>]  
 $y$  Rendimiento [ $ton m^{-2}$ ]

CULTIVO	$CWU_{riego}$ [m año <sup>-1</sup> ]	años	$CWU_{riego}$ [m vida cultivo <sup>-1</sup> ]	$y$ [ton m <sup>-2</sup> ]	$WF_{azul}$ [m <sup>3</sup> ton <sup>-1</sup> vida cultivo <sup>-1</sup> ]	$WF_{azul}$ [m <sup>3</sup> ton <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ]
Palto	1,0403	37	41,0159	0,0020812	19707,33934	492,683483
Palto NP	0,8416	3				
Olivo	0,9564	95	95,229	0,0035625	26730,94737	267,309474
Olivo NP	0,8742	5				
Ricino	1,0396	3	3,1188	0,0001	31188	10396
Jojoba inm	0,7311	3	18,2775	0,0002272	80446,74296	3217,86972
Jojoba mad	0,7311	22				

## APENDICE V

### Huella Hídrica Gris

$$WF_{gris} = \left( \frac{\left( \frac{\alpha * AR}{C_{max} - C_{nat}} \right)}{y} \right)$$

Donde,

$WF_{gris}$	Huella Hídrica Gris [ $m^3 ton^{-1}$ ]
$\alpha$	Fracción de lixiviación
AR	aplicación estimada agroquímicos [Kg ha-1]
$C_{max}$	Concentración máxima aceptable de contaminantes/ [Kg m-3]
$C_{nat}$	Concentración natural del contaminante [Kg m-3]
y	Rendimiento [ton ha-1]

### Datos

#### Aplicación Estimada de Agroquímicos

AR [Kg ha <sup>-1</sup> ]	PALTO	OLIVO	RICINO	JOJOBA
Nitratos (N)	433	333	135	300
Potasio (K)	278	319	13	144
Azufre (S)	50	55	s/i	s/i

#### Concentración contaminantes

Fertilizante	Cmax [Kg m <sup>-3</sup> ]	Cnat [Kg m <sup>-3</sup> ]
Nitratos (N)	0,01	0,0025
Potasio (K)	0,01	0,005
Azufre (S)	0,25	0,15

#### Rendimiento promedio

Cultivo	Y promedio [ton ha-1]
Palto	20,8125
Olivo	35,625
Ricino	1
Jojoba	2,272

(Continua)

APENDICE V (Continuación)

**Procedimiento**

Aplicación Estimada de Agroquímicos por Fracción de Lixiviación

AR* $\alpha$ [Kg ha <sup>-1</sup> ]	PALTO	OLIVO	RICINO	JOJOBA
Nitratos (N)	43,3	33,3	13,5	30
Potasio (K)	27,8	31,9	1,3	14,4
Azufre (S)	5	5,5	s/i	s/i
Diferencia Concentración máxima con natural				
Fertilizante	[Kg m <sup>-3</sup> ]			
Nitratos (N)	0,0075			
Potasio (K)	0,005			
Azufre (S)	0,1			

**Resultados**

WFgris [m <sup>3</sup> ton <sup>-1</sup> ]	PALTO	OLIVO	RICINO	JOJOBA
Nitratos (N)	277,4	124,6	1800,0	1760,6
Potasio (K)	267,1	179,1	260,0	1267,6
Azufre (S)	2,4	1,5	s/i	s/i
<b>Total</b>	<b>546,9</b>	<b>305,3</b>	<b>2060,0</b>	<b>3028,2</b>