

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

LA HUELLA HÍDRICA EN LA REGIÓN
AGRÍCOLA DE LA COSTA DE
HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO,
COMO HERRAMIENTA DE
SUSTENTABILIDAD
HIDROGEOLÓGICA.

TESIS

Que para obtener el Grado de:
Maestro en Ciencias-Geología.



PRESENTA:

LUIS CARLOS MÉNDEZ BARRIOS

Hermosillo, Sonora, Junio de 2017

Universidad de Sonora

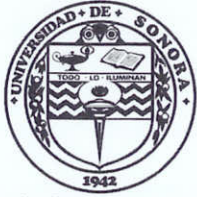
Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

Departamento de Geología
División de Ciencias Exactas y Naturales

F01

Hermosillo, Sonora, a 13 de Junio de 2017

Dr. Jesús Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología
Departamento de Geología

Por este conducto y de la manera más atenta, me permito someter a su consideración, para su aprobación el siguiente tema de tesis, intitulado:

**"LA HUELLA HÍDRICA EN LA REGIÓN AGRÍCOLA DE LA COSTA DE
HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO; COMO HERRAMIENTA DE
SUSTENTABILIDAD HIDROGEOLÓGICA"**

Esto es con el fin de que el alumno: **Luis Carlos Méndez Barrios**, pueda presentar su examen profesional, para la obtención de su título de Grado de la Maestría en Ciencias-Geología.

Sin otro en particular quedamos de Usted.

ATENTAMENTE

Dr. Miguel Rangel Medina

Director de Tesis



C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

F02

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

Hermosillo, Sonora a 13 de junio de 2017

Dr. Miguel Rangel Medina
Director de Tesis
M.C. Margarita de la O Villanueva
CoDirectora de Tesis

Por este conducto les comunico que ha sido aprobado el tema de tesis propuesto por Ustedes, intitulado:

"LA HUELLA HÍDRICA EN LA REGIÓN AGRÍCOLA DE LA COSTA DE HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO; COMO HERRAMIENTA DE SUSTENTABILIDAD HIDROGEOLÓGICA"

Esto, con el fin de que el alumno **LUIS CARLOS MÉNDEZ BARRIOS** pueda presentar su examen profesional, para la obtención del título de Grado. Asimismo les comunico que han sido asignados los siguientes sinodales:

Dr. Julio César Rodríguez	Presidente
Dr. Rogelio Monreal Saavedra	Secretario
M.C. José Arturo López Ibarra	Vocal (Sinodal Externo)
M.C. Margarita de la O Villanueva	Vocal
Dr. Miguel Rangel Medina	Vocal

Sin otro en particular quedo de Usted

Atentamente

Dr. Jesús Roberto Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
**MAESTRIA EN
CIENCIAS
GEOLOGIA
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**

C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

F06

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

NOMBRE DE LA TESIS:

**"LA HUELLA HÍDRICA EN LA REGIÓN AGRÍCOLA DE LA COSTA DE
HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO; COMO HERRAMIENTA DE SUSTENTABILIDAD
HIDROGEOLÓGICA"**

NOMBRE DEL SUSTENTANTE:

LUIS CARLOS MÉNDEZ BARRIOS

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.

J. C. Rovez

Dr. Julio Cesar Rodríguez

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.

[Signature]

Dr. Rogelio Monreal Saavedra

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.

[Signature]

M.C. José Arturo López Ibarra

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.

[Signature]

M.C. Margarita de la O Villanueva

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.

[Signature]

Dr. Miguel Rangel Medina

Atentamente

Dr. Jesús Roberto Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
**MAESTRIA EN
CIENCIAS
GEOLOGIA
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

F07

Hermosillo, Sonora, a 19 de Junio de 2017


Dr. Jesús Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología
Departamento de Geología

Por medio de la presente, nos permitimos informarle que después de revisar y aprobar el trabajo de tesis del alumno **LUIS CARLOS MÉNDEZ BARRIOS**, hemos acordado que la presentación del examen de grado del alumno se lleve a cabo el día jueves 22 de junio del presente a las 17:00 horas.

Sin otro particular, quedamos a la espera de su respuesta.

ATENTAMENTE
Comité de Tesis





M.C. Margarita de la O Villanueva
CoDirectora de Tesis



Dr. Rogelio Monreal Saavedra



Dr. Julio César Rodríguez



M.C. José Arturo López Ibarra



Dr. Miguel Rangel Medina
Director de Tesis

C.c.p. Archivo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

Hermosillo, Sonora a 20 de junio de 2017

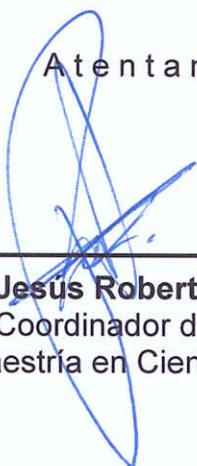
Dr. Miguel Rangel Medina
Director de Tesis
M.C. Margarita de la O Villanueva
CoDirectora de Tesis

Por este conducto y en atención a la solicitud recibida el día de hoy, 20 de junio del presente, les comunico que ha sido aprobada la fecha para la presentación de Examen de Grado del alumno **LUIS CARLOS MÉNDEZ BARRIOS** propuesta por el Comité de Tesis.

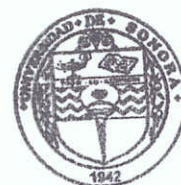
Dicho examen se llevará a cabo el día **jueves 22 de junio del presente a las 17:00 horas** en el *Auditorio del Departamento de Física*.

Sin otro en particular quedo de Usted

Atentamente



Dr. Jesús Roberto Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
**MAESTRIA EN
CIENCIAS
GEOLOGIA
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**

C.c.p. Archivo

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado para realizar mis estudios de Maestría del 01/08/2015 al 31/07/2017 y con número de CVU: 489433, gracias por su confianza y por hacer posible este gran logro tanto en mi vida personal como profesional.

A la Universidad de Sonora en especial al Departamento de Maestría en Ciencias-Geología, al personal directivo y académico, por brindarme su apoyo y la oportunidad de ampliar mis conocimientos.

Al Instituto de Investigaciones del Desierto y el Agua Subterránea S.C. por brindarme su apoyo para adquirir mayor conocimiento sobre la temática de huella hídrica.

A Victoria Escobar Jenny Lorena, fundadora de Solar Projects, por impulsarme y ayudarme a resolver, problemáticas sobre el tema.

A mi director de Tesis Dr. Miguel Rangel Medina, mi primer apoyo en la maestría, gracias por confiar en mí, por su dirección, tiempo y sugerencias, los que hicieron que fuera posible el desarrollo y culminación de este logro académico.

Al Dr. Julio Cesar Rodríguez por su gran apoyo, tutoría, disposición y entrega en la culminación de esta Tesis, gracias por dirigirme, por sus aportaciones y recomendaciones que fueron una importante contribución a este trabajo.

Al Dr. Rogelio Monreal Saavedra, y a la MC. Margarita de la O Villanueva por sus sinceras sugerencias, apoyo y revisión para la realización de esta Tesis.

A Dios, el Primero y el Último, el Alfa y el Omega, el Principio y el Fin, el León de la tribu de Judá, el Gran Yo Soy., sí Señor, gracias a ti Rey de Reyes y Señor de Señores, Emmanuel, Cristo Jesús. Por siempre estar conmigo y aún en este proceso académico hacerme crecer como esposo, padre e hijo.

Sobre todo a mi esposa Lupita de Méndez, por ir de la mano conmigo en todo este recorrido, eres la pieza clave en este logro y soy grandemente bendecido por tenerte a mi lado.

A mis princesitas Carly y Carlet, el solo verlas y abrazarlas es suficiente motivación para salir adelante.

A la Familia en general, en especial a mis Padres Francisco Méndez y Lourdes Barrios y, a mis Hermanos Sara Méndez y Eduardo Méndez que siempre me han apoyado. También a mis suegros Rosendo Figueroa y Arminda Montes de quienes también recibí apoyo.

A todos mis compañeros, en especial al grupo de Metamórficos: Horacio, Génesis, Ramón y Deneb.

Y a todos los que me brindaron su apoyo y participaron directa o indirectamente en la elaboración de esta Tesis.

¡A todos gracias!

DEDICATORIA

*Es mi deseo como sencillo gesto de agradecimiento, dedicarle mi humilde obra de trabajo de grado plasmada en el presente informe primeramente a **Dios**, quien permanentemente me ha apoyado con espíritu alentador para acabar un difícil pero muy grato proceso. También dedico esta Tesis a la familia que el Creador me dio, mis pequeñas hijas **Carly** y **Carlet** quienes me alegran la vida con mucho amor y cariño; y a mi esposa **Lupita** junto a quien finalizo este proceso. Todo es por ustedes y para ustedes., les Amo!*

Gracias!!

RESUMEN

La huella hídrica (HH) es un concepto relativamente reciente, que tiene poco más de una década de haberse empezado a utilizar extensivamente, y está íntimamente asociado con el concepto conocido como “agua virtual”, con el que se busca definir el consumo oculto del agua en diversos productos. Además la huella hídrica establece, por su parte, una relación directa entre los sistemas hídricos y el consumo humano. Así por ejemplo, nuestra HH de consumo se compone de lo que comemos, bebemos y utilizamos. A nivel mundial, la HH de consumo per cápita se estima en $1,385 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$. Esta vinculación puede determinar factores como la escasez o contaminación del agua, pero principalmente se enfoca en la gestión eficaz del recurso hídrico. Para su cálculo se toma en cuenta la clasificación que se hace conceptualmente en el tipo de agua utilizada (verde, azul y gris), obteniendo así la información relevante para conocer con profundidad el uso de agua dulce en un sistema productivo. El propósito del presente estudio fue el de calcular la HH de cuatro cultivos principales que se explotan intensivamente en la Costa de Hermosillo, Sonora México una región que ha cultivado fundamentalmente productos de exportación desde mediados de la década de los años 1940, con una extracción de agua subterránea que rebasa con mucho la capacidad de recarga del sistema acuífero, el cual fue impactado ambientalmente a tal grado que siendo un acuífero costero, permitió la penetración de agua de mar en forma de intrusión marina, deteriorando la calidad y minando el volumen de almacenamiento del agua subterránea del acuífero. A la fecha, se explotan primordialmente dos cultivos anuales “Sandía (*Citrullus lanatus*) y Trigo (*Triticum aestivum*)” y dos perennes “Uva de mesa (*Vitis vinifera*) y Nogal pecanero (*Carya illinoensis*)”, por lo tanto, este estudio tiene por objetivo realizar un análisis de sustentabilidad ambiental sobre el acuífero regional, calculando la huella hídrica de la “exportación de agua” que se ha realizado con la producción de los cuatro productos citados. Los cálculos se llevaron a cabo utilizando la metodología de la Water Footprint Network (WFN), metodología más utilizada a nivel mundial para el cálculo de la HH. Los resultados obtenidos considerando los rendimientos promedio, máximos y mínimos de 2003-2016, fueron: huella hídrica de la producción (HH_{prod}) de la sandía en su ciclo agrícola primavera-verano (PV) = $119 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$ en promedio, 147 máximo y 91 mínimo,

donde el 15% corresponde a agua azul, el 34% a agua verde y el 51% a agua gris. En el caso del ciclo otoño-invierno (OI) el resultado fue de $141 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$, 174 máximo y 108 mínimo; donde el 57% es agua azul y el 43% es agua verde. Considerando el año agrícola el volumen fue de $260 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$ en promedio, con un máximo de 321 y un mínimo de 199; esta se representa en 38% agua azul, 15% agua verde y 47% agua gris. En el caso del cultivo de trigo la HH_{prod} , fue de $927 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$ en promedio con un máximo de 1,106 y un mínimo de 766; donde el 57% lo representa agua azul y el 43% agua gris. Los resultados para vid fueron: $591 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$ en promedio con un máximo de 981 y un mínimo de 426; donde el 64% es agua azul, el 20% verde y el 16% gris. Por último, los resultados para el nogal fueron $7,880 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$ en promedio con un máximo de 16,633 y un mínimo de 5,988. El análisis de sustentabilidad ambiental evidenció “hotspots” permanentes por los últimos 14 años, y se identifica una diferencia marcada entre el riego aplicado y la necesidad de agua. Para uva de mesa variedad perlette se establecen $11,210 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de riego, contra $5,834.6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ evapotranspirados ($HH_{prod,azul}$), lo que implica una diferencia de $5375.4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en exceso. Con respecto a la variedad superior, los resultados son similares: $10,880 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de riego y requiere $5,589.1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ($HH_{prod,azul}$), se aplican $5,290.9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en exceso. Es decir, en el periodo de análisis se aplicó aproximadamente el doble del volumen de agua necesario en ambos casos. En el caso del nogal pecanero se utilizaron $14,590 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en el riego y solo requería $10,723.6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ($HH_{prod,azul}$), lo que implica un exceso de riego equivalente al 36% superior a lo necesario. Comparando los resultados del cálculo de HH con las estimaciones obtenidas por otros autores, los resultados son consistentes, mostrando que la utilización de la metodología de la WFN es útil para definir los volúmenes de riego, pero lo más importante de estos resultados es observar que el acuífero regional no puede sustentar la HH_{prod} total entre ambos cultivos y debe modificarse el control de riegos.

Palabras clave: Huella hídrica, acuífero Costa de Hermosillo, agricultura sustentable.

ABSTRACT

The water footprint (WF) is a relatively recent concept that has a little more than a decade of being used and it is intimately associated with the concept known as "virtual water", which seeks to define the hidden water consumption in various products. The Water footprint establishes a direct relationship between water systems and human consumption. Therefore, for example, our consumption WF is composed of what we eat, drink and use. Worldwide, WF per capita consumption is estimated at 1,385 m³ year⁻¹. This linkage can determine factors such as scarcity or water pollution, but mainly focuses on the efficient management of water resources. In order to calculate it, the classification that is conceptually made in the type of water used (green, blue and gray) is taken into account, obtaining the relevant information to know in depth the use of fresh water in a productive system. The purpose of the present study is to calculate the WF of four main crops that are intensively exploited in the Hermosillo Coast, Sonora Mexico since the Mid-1940s. Nowadays with an extraction of groundwater that far exceeds the capacity of the aquifer system recharge, which was environmentally impacted to such an extent that, being a coastal aquifer, allowed the penetration of sea water in the form of marine intrusion, deteriorating the quality and undermining the groundwater storage volume of the aquifer. To date, two annual crops are produced; "Watermelon (*Citrullus lanatus*), Wheat (*Triticum aestivum*)" and two perennials "Table grape (*Vitis vinifera*), Walnut pecan (*Carya illinoensis*)". This study aims to perform an environmental sustainability analysis on the regional aquifer, calculating the water footprint of the water export that has been made with the production of the four products cited. The calculations were carried out using the methodology of the Water Footprint Network (WFN), the methodology most used worldwide for the calculation of WF. The results obtained consider average, maximum and minimum yields of 2003-2016 were: water footprint of the production (HH_{prod}) of the watermelon in its agricultural spring summer cycle (PV) = 119 m³ Mg⁻¹ in average, 147 maximum and 91 minimum, Where 15% corresponds to blue water, 34% to green water and 51% to gray water. For the autumn winter cycle (OI) the result was 141 m³ Mg⁻¹, 174 maximum and 108 minimum; where 57% is blue water and 43% is green water. Considering the agricultural year, the volume was 260

$\text{m}^3 \text{Mg}^{-1}$ on average with a maximum of 321 and a minimum of 199; This is represented by 38% blue water, 15% green water and 47% gray water. In the case of wheat the HH_{prod} was $927 \text{ m}^3 \text{Mg}^{-1}$ on average with a maximum of 1,106 and a minimum of 766; where 57% represents blue water and 43% gray water. The results for vine were $591 \text{ m}^3 \text{Mg}^{-1}$ on average with a maximum of 981 and a minimum of 426; Where 64% is blue water, 20% green and 16% gray. Finally, the results for walnut were $7,880 \text{ m}^3 \text{Mg}^{-1}$ on average with a maximum of 16,633 and a minimum of 5,988. The analysis of environmental sustainability evidenced permanent hotspot for the last 14 years, and a marked difference between irrigation applied to cultivars and their need for water is identified. For grape variety perlette $11,210 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ irrigation is used, against $5,834.6 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ required ($HH_{prod,blue}$), implying a difference of $5375.4 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ in excess. Regarding the top variety, the results are similar: $10,880 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ irrigation requires $5,589.1 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ ($HH_{prod,blue}$), $5,290.9 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ is applied in excess. That is, during the period of analysis, approximately twice the volume of water required was applied in both cases. In the case of walnut (pecan), it was used in the irrigation $14,590 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$, and the plant required $10,723.6 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ ($HH_{prod,blue}$), which implies an excess of irrigation equivalent to 36% higher than necessary. Comparing the results of the WF in this study calculation with the estimates obtained by other authors, the results are consistent, showing that the use of the WFN methodology is useful to define the irrigation volumes required, but the most important issue of these results is observing that the depleted aquifer can not sustain this rhythm of irrigation of the total HH_{prod} applied between both crops, therefore the irrigation control urgently must be modified.

Keywords: Water footprint, Costa de Hermosillo aquifer, sustainable agriculture.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	v
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general.....	3
1.2. Objetivos específicos.....	3
1.3. Hipótesis.....	4
1.4. Justificación.....	4
II. REVISIÓN DE LITERATURA	6
2.2. Las aguas subterráneas.....	6
2.2.1. Situación global.....	6
2.1.2. Situación nacional.....	7
2.1.3. Situación estatal.....	8
2.1.4. Situación en la región noroeste de la Costa de Hermosillo.....	10
2.2. La Huella Hídrica.....	14
2.2.1. Relación de la huella hídrica y el agua virtual.....	14
2.2.2. Elementos de la huella hídrica.....	15
2.2.3. Aplicación de la huella hídrica.....	15
2.2.4. Estudios previos de huella hídrica.....	16
III. MATERIALES Y MÉTODOS	20
3.1. Fase I. Alcance.....	20
3.1.1. Alcance por unidad de estudio.....	20
3.1.2. Alcance geográfico.....	22
3.1.3. Alcance metodológico.....	25
3.1.3.1. Huella hídrica.....	25

3.1.3.2. Análisis de sustentabilidad de la huella hídrica.....	28
IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	30
4.1. Fase II. Cuantificación de la huella hídrica.	30
4.1.1. Elemento azul.....	36
4.1.2. Elemento verde.....	39
4.1.3. Elemento gris.	41
4.2. Fase III. Análisis de sustentabilidad de la huella hídrica azul.	44
V. CONCLUSIÓN.....	48
5.1. Fase IV. Respuestas frente a resultados.....	48
5.1.1. Recomendaciones.....	49
5.1.2. Investigación futura.....	51
5.1.2.1. Estudios agrícolas con impacto hidrogeológico.	51
VI. REFERENCIAS CITADAS.....	53

Índice de Tablas

<i>Tabla 1.</i> Estudios previos sobre el acuífero de la Costa de Hermosillo.	5
<i>Tabla 2.</i> Distribución del agua en el mundo.....	6
<i>Tabla 3a.</i> Situación de los acuíferos en México.....	7
<i>Tabla 3b.</i> Situación de los acuíferos en México, continuación.....	8
<i>Tabla 4a.</i> Comportamiento del acuífero Costa de Hermosillo (1949-2016).....	11
<i>Tabla 4b.</i> Comportamiento del acuífero Costa de Hermosillo (1949-2016), continuación.	12
<i>Tabla 5.</i> Acciones para minimizar la problemática de administración del acuífero Costa de Hermosillo.	13
<i>Tabla 6.</i> Discusión del concepto de huella hídrica a nivel internacional.	16
<i>Tabla 7a.</i> Publicaciones de estudios de HH alrededor del mundo.	17
<i>Tabla 7b.</i> Publicaciones de estudios de HH alrededor del mundo, continuación.	18
<i>Tabla 8a.</i> Estadísticas de cultivos agrícolas (sandía, trigo, vid y calabaza).....	21
<i>Tabla 8b.</i> Estadísticas de cultivos agrícolas (sandía, trigo, vid y calabaza), continuación.	22
<i>Tabla 9.</i> Número de años con datos por mes, en las estaciones climatológicas Carmen, Palo verde y San Isidro.....	24
<i>Tabla 10.</i> Tendencia de HH en aumento, según el tipo de cultivo.....	30
<i>Tabla 11a.</i> HH_{prod} [sandía, vid, trigo, nogal ($m^3 Mg^{-1}$)] Vs HH estimada según Mekonnen y Hoekstra (2010).....	32
<i>Tabla 11b.</i> HH_{prod} [sandía, vid, trigo, nogal ($m^3 Mg^{-1}$)] Vs HH estimada según Mekonnen y Hoekstra (2010), continuación.	33
<i>Tabla 12.</i> Elemento azul, verde y gris de la HH_{prod} ($m^3 Mg^{-1}$) Vs, HH de los elementos azul, verde y gris, calculados por Mekonnen y Hoekstra (2010).....	34
<i>Tabla 13.</i> D_{ha} [$HH_{prod,azul}$ ($m^3 ha^{-1}$)] vs irrigación medida y el consumo de agua estimado para cada cultivo.	36
<i>Tabla 14.</i> Aportación de agua verde sobre la D_h y, D_{ha} en su expresión de $m^3 ha^{-1}$ Vs irrigación medida.	39
<i>Tabla 15.</i> Proyecciones de $HH_{prod,gris}$, con respecto al UEN.....	42

Índice de Figuras

<i>Figura 1.</i> Acuíferos en México.	7
<i>Figura 2.</i> Acuíferos y provincias hidrogeológicas de Sonora.	9
<i>Figura 3.</i> Fases para la evaluación de la huella hídrica.	20
<i>Figura 4.</i> Planicie Costa de Hermosillo y Distrito de riego 051.	23
<i>Figura 5.</i> Climograma, de la Costa de Hermosillo, Sonora.	24
<i>Figura 6.</i> Modelo conceptual para el cálculo de HH.	25
<i>Figura 7.</i> HH_{prod} ($m^3 Mg^{-1}$), sandía, vid, trigo y nogal.	31
<i>Figura 8a.</i> Lamina expuesta global para los cultivos de sandía y nogal.	37
<i>Figura 8b.</i> Lamina expuesta global para los cultivos de trigo, vid y global, continuación.	38
<i>Figura 9.</i> Agua verde ignorada.	40
<i>Figura 10.</i> $HH_{prod,gris}$, expresión en hm^3 por cultivo.	43
<i>Figura 11.</i> Análisis de sustentabilidad ambiental de la $HH_{prod,azul}$ (a).	45
<i>Figura 12.</i> Análisis de sustentabilidad ambiental de la $HH_{prod,azul}$ (b).	46

I. INTRODUCCIÓN

La crisis del agua es un problema grave principalmente en las regiones áridas, pues por sus características particulares la sociedad que vive en ellas comienza a tener dificultades generalmente con la disposición del recurso hídrico. Según Rosegrant y Rigler (2000), el aumento poblacional incrementa la demanda de agua; ejemplo de ello es que durante el siglo pasado la población mundial se triplicó y por ende la demanda de agua aumentó 6 veces (Cosgrove y Rijsberman, 2000; Rijsberman, 2003 y 2006). Para este tiempo solo se espera que esta demanda siga creciendo, dejando en crisis a más de 800 millones de personas que actualmente carecen de un suministro seguro de agua dulce y 2 millones más del saneamiento básico de la misma (Falconer *et al.*, 2012).

En consecuencia, los estudios científicos realizados con respecto al tema se han incrementado, así lo expone Rodríguez (2007), quien encontró una tendencia en aumento del número de artículos en revistas de prestigio publicados y citados desde 1987 al 2006. Aun con esto, la información actualizada revela que la problemática del agua se visualiza a futuro más crítica; por ejemplo, el informe más reciente del Foro Económico Mundial (WEF por sus siglas en inglés) Global Risks 2014, catalogó la crisis del agua como un riesgo ambiental que ocupa el tercer puesto entre los riesgos mundiales de mayor impacto potencial en la presente década, solo después del cambio climático que ostenta el segundo lugar. Sin embargo, este último riesgo de acuerdo con Sanders *et al.* (2010), puede influir en la disminución de la disponibilidad media de agua y en que la frecuencia de eventos extremos como la sequía aumenten, es decir; existe una vinculación entre ambos riesgos.

Según Doménech *et al.* (2001), a medida que las sociedades desarrolladas evolucionan, se enfrentan a problemas ambientales, sobre todo en función del uso del agua, ejemplo de ello es la gestión de recursos hídricos donde existe una competencia por agua dulce entre usuarios urbanos, industriales, agropecuarios y ecológicos, especialmente en las zonas áridas y

semiáridas donde la disponibilidad de este recurso es limitada y las necesidades se incrementan de manera continua (Bittelli, 2010; Soulis *et al.*, 2015).

De acuerdo con Mekonnen y Hoekstra (2010a) y Zeng *et al.* (2012), a nivel global la agricultura consume aproximadamente el 85% del agua dulce disponible, situación semejante en México donde esta actividad es el principal usuario del recurso al consumir alrededor del 77%, del cual el 66% proviene de fuentes superficiales (CONAGUA, 2006). Sin embargo, este porcentaje varía de acuerdo a la región y, en el caso de la Costa de Hermosillo Sonora ubicada en una región árida, el 90% del agua para la agricultura procede del acuífero regional (CONAGUA, 2013), cuya explotación intensiva según Moreno (2006), inició desde mediados de los años 1940, con la perforación de pozos profundos que carecieron de orden y planeación hídrica, convirtiéndose pocos años después, en un manejo no sustentable de recursos hídricos. Para 1958 la capa freática se encontraba a diez metros por debajo del nivel del mar, ocasionando la intrusión de agua marina (Halvorson *et al.*, 2003). En 1970 los abatimientos alcanzaban los 65 metros por debajo del nivel del mar, y se estima que entre 1945 y 2005 el nivel medio del acuífero descendió un metro por año en promedio (Monreal *et al.*, 1999, Quevedo, 2007). Esta situación convino en que el acuífero denominado Costa de Hermosillo, actualmente se encuentre entre los 104 acuíferos sobreexplotados en el país según Chávez *et al.* (2006), entre los 16 con intrusión marina según CONAGUA (2010a) y el que presenta el mayor déficit de los 61 acuíferos existentes en el estado de Sonora (CONAGUA, 2010b).

Actualmente existe un indicador que fomenta la sustentabilidad de los recursos hídricos, este es la huella hídrica (HH). Según Hoekstra *et al.* (2009), la HH de un bien o servicio se define como el volumen total de agua dulce (verde, azul y gris) que se utiliza para producirlo; de esta manera dicho indicador puede utilizarse como una herramienta para promover el uso del agua eficiente, equitativo y sostenible, y así abrir nuevos caminos para la planificación y la gestión del recurso hídrico (Falkenmark, 2003; Falkenmark y Rockstrom, 2006; Hoekstra y Chapagain, 2007; Liu y Savenije, 2008; Zeng *et al.*, 2012). Es decir, el agua virtual (AV) representa el cálculo de la cantidad total de agua que se requiere para obtener un producto.

Mientras que la huella hídrica (HH) es un indicador de toda el agua que utilizamos en nuestra vida diaria; para producir alimentos, en procesos industriales y generación de energía, así como la que ensuciamos y contaminamos a través de esos mismos procesos (Arreguín-Cortés *et al.*, 2007).

Por lo anterior, este estudio se propuso para conocer el impacto de la producción agrícola en el acuífero de la Costa de Hermosillo bajo los siguientes objetivos e hipótesis:

1.1. Objetivo general

- Describir el impacto de la producción agrícola, en el acuífero de la Costa de Hermosillo.

1.2. Objetivos específicos

- Conocer la HH de la producción (HH_{prod}) de dos cultivos anuales: Sandía (*Citrullus lanatus*) y Trigo (*Triticum aestivum*) y dos perennes: Uva de mesa (*Vitis vinifera*) y Nogal pecanero (*Carya illinoensis*).
- Conocer la HH de la producción verde ($HH_{prod,verde}$) de los cultivos de estudio.
- Conocer la HH de producción azul ($HH_{prod,azul}$) de los cultivos de estudio.
- Conocer la HH de la producción gris ($HH_{prod,gris}$) de los cultivos de estudio.

1.3. Hipótesis

- La sandía, trigo, vid y nogal, como cultivos base de la producción actual, representan una demanda hídrica que impactan la calidad y volumen almacenado de agua subterránea en acuífero de la Costa de Hermosillo, por lo que, al conocer sus HH se proporcionará información que haga eficiente, con mejores prácticas de manejo, el uso del agua subterránea disponible de esa unidad hidrogeológica.

1.4. Justificación

- Se estima que 86% de la HH de la humanidad se vincula al sector agrícola (Hoekstra y Chapagain, 2008). Según Hoekstra (2009), la HH es un indicador de apropiación humana del recurso hídrico para sustentar diversas actividades económicas y, busca principalmente ilustrar los vínculos existentes entre el uso del agua y la gestión de los recursos hídricos.
- Los cultivos de estudio en conjunto con el cultivo del garbanzo, la naranja y la calabaza forman la lista de los principales cultivos en explotación en la Costa de Hermosillo, representando el 80% de la superficie sembrada, 85% del valor total de la producción y 92% del consumo de agua en la región (Salazar *et al.*, 2012).
- La uva de mesa (*Vitis vinifera*) en sus variedades perlette, flame, superior y red globe, es considerada una de las principales frutas en el sector agrícola mexicano, se caracteriza por ser un fruto de exportación que, sumado al alto valor de su producción, representa una fuente importante de divisas, además de ser un generador de empleo a causa del uso extensivo de mano de obra (Vázquez, 2011). De la producción total en el país de 17,716 hectáreas, el (93%) se obtiene del estado de Sonora, específicamente de las regiones de Hermosillo (61%) y Caborca (19%) (SIAP-SAGARPA, 2012).

- El nogal pecanero (*Carya illinoensis*), es el frutal de mayor crecimiento en Sonora, pues al finalizar el 2010 se contaba con una superficie de alrededor de 8,600 hectáreas de las cuales se cosechaban alrededor de 7,000, generando 70 jornales por hectárea y alrededor de 630 mil jornales al año (Retes *et al.*, 2014). De la actual superficie, la gran mayoría (76%) pertenece a la Costa de Hermosillo (SAGARPA, 2011).
- La sandía (*Citrullus lanatus*) es una de las principales hortalizas en Sonora, cuyo fruto tiene amplia aceptación entre la población. En la Costa de Hermosillo, la superficie total se ha incrementado de 1,341 ha en el 2000 a 2,914 ha en el 2008 (SIAP, 2010). Las exportaciones se han incrementado de 94,544 Mg en el 2005 a 186,056 Mg en el 2009 (SNIDRUS, 2010).
- El trigo ocupa un lugar importante en la alimentación de la humanidad y es el tercer cereal demandado después del maíz y el arroz; Sonora ocupa el primer lugar en producción de trigo a nivel nacional con un 45% aproximadamente de la superficie sembrada (Retes *et al.*, 2013).
- Los estudios previos realizados sobre el acuífero de la Costa de Hermosillo (Tabla 1), están ausentes de la temática de la HH como herramienta de sustentabilidad hidrogeológica.

Tabla 1. Estudios previos sobre el acuífero de la Costa de Hermosillo.

Autor	Enfoque del estudio
(Andrews 1981; Puebla Menchaca 1987; Rodríguez y Pérez 1991; Steinich <i>et al.</i> , 1997 y 1998; Castro 1998; Castillo 2000 y Rangel <i>et al.</i> , 2003).	Administración y características del recurso en la región; en especial, sobre la intrusión salina y otras formas de contaminación del agua subterránea.
(Ariel Construcciones S. A. 1968; Vega y Saiz 1995; Monreal <i>et al.</i> , 2002).	Disponibilidad de agua.
(Comunatec S.A. 1986).	Relación de la escasez con el funcionamiento integral de la cuenca del río Sonora.
Cruz (1969).	Cálculos sobre las pérdidas monetarias debido al desnivel del terreno y el uso ineficiente del volumen de agua asignado.
(Zambrano 1971); Cárdenas 1981 y Cabanillas 1985).	Calculo del patrón de cultivos óptimos, haciendo énfasis en el agua como recurso escaso.
(Salazar <i>et al.</i> , 2012).	Agricultura y manejo sustentable del acuífero de la Costa de Hermosillo.

Fuente: Elaboración del autor en base a información de Salazar *et al* (2012) utilizando bibliografía anexa.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.2. Las aguas subterráneas

2.2.1. Situación Global

Según Clarke y King (2004), la distribución de agua en el mundo (Tabla 2) está representada principalmente por agua salada en un 97.5% y agua dulce en solo un 2.5%. Sin embargo cerca del 70% de agua dulce no se encuentra disponible para el ser humano.

Tabla 2. Distribución del agua en el mundo.

Agua	Disponible	Océano y mares	Glaciares, nieve, hielo	Subterránea	Lagos, ríos, humedales
	$\times 10^{12} \text{ hm}^3$	-----%-----			
Salada	1,351	100			
Dulce	35		69.7	29.9	0.4

Fuente: Elaboración propia con datos de Clarke y King (2004).

Del agua en el mundo, se estima que solo el 0.77% es agua dulce accesible al ser humano. Esta agua se localiza en los lagos, los ríos, la humedad del suelo y las cuencas de agua subterráneas relativamente poco profundas (Shiklomanov, 1999).

A nivel mundial, 2,500 millones de personas dependen exclusivamente de los recursos hídricos subterráneas para satisfacer sus necesidades básicas de agua cada día (UNESCO, 2012). Las aguas subterráneas abastecen de agua potable por lo menos al 50% de la población mundial y representan el 43% de toda el agua utilizada para el riego (FAO, 2010). No obstante, las tasas de crecimiento actuales de la demanda agrícola sobre los recursos de agua dulce son insostenibles; el uso ineficiente del agua para la producción de cultivos agota los acuíferos, reduce el caudal de los ríos, degrada los hábitats de la vida silvestre y provoca la salinización del 20% de la superficie mundial de tierras de regadío (FAO, 2011a). Por lo anterior, se estima que el 20% de los acuíferos mundiales está siendo sobreexplotado

(Gleeson *et al.*, 2012), lo que puede tener graves consecuencias, como el hundimiento del suelo y la intrusión de agua salada (USGS, 2013).

2.1.2. Situación Nacional

México cuenta con 653 acuíferos administrativos de aguas subterráneas que aportan el 38.9% del volumen para usos consuntivos. Actualmente 105 de estos se encuentra en condiciones de sobreexplotación, 32 con presencia de suelos salinos y agua salobre y, 18 con intrusión marina (Figura 1, Tabla 3 a y b).

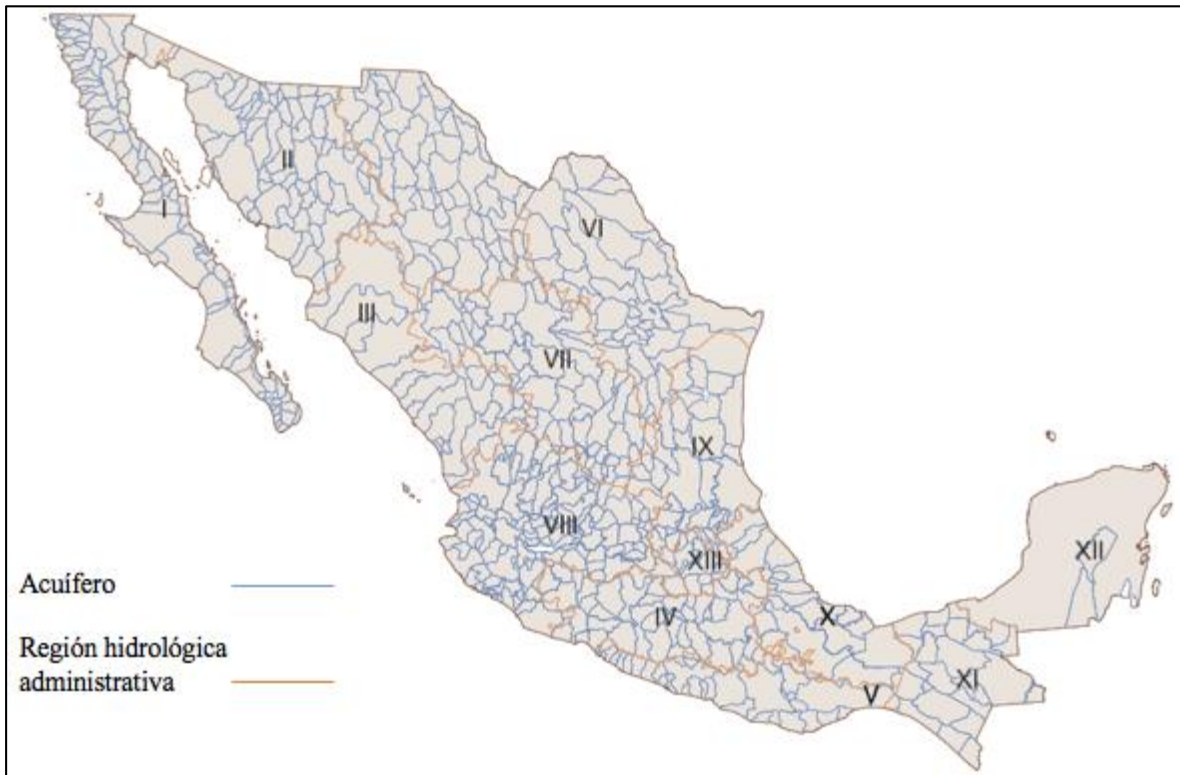


Figura 1. Acuíferos en México. Fuente: Conagua, (2016b).

Tabla 3a. Situación de los acuíferos en México.

RHA	Total	Sobreexplotado	Intrusion marina	Salinización de suelo y agua salobre	Recarga media hm ³
I	88	14	11	5	1,658
II	62	10	5		3,207

Nota: RHA (Región hidrológica administrativa). Fuente: Conagua, (2016b).

Tabla 3b. Situación de los acuíferos en México, continuación.

RHA	Total	Sobreexplotado	Intrision marina	Salinizacion de suelo y agua salobre	Recarga media hm ³
III	24	2			3,076
IV	45	1			4,873
V	36				1,936
VI	102	18		8	5,935
VII	65	23		18	2,376
VIII	128	32			9,656
IX	40	1			4,108
X	22				4,599
XI	23				22,718
XII	4		2	1	25,316
XIII	14	4			2,330
Total	653	105	18	32	91,788

Nota: RHA (Región hidrológica administrativa). Fuente: Conagua, (2016b).

Según Castillo (2003), los acuíferos del país, suministran cerca del 50% de la extracción anual para todos los usos. Sin embargo, el mismo autor menciona que de acuerdo con el balance nacional de agua subterránea, la extracción apenas equivale al 38% de la recarga, pero en las regiones áridas del país el balance es negativo, minando el recurso a ritmo de 8 km³ anuales.

La sobreexplotación de acuíferos no solo pone en riesgo los recursos hídricos; sino que también encarece la producción de los cultivos tradicionales, debido a que en varias zonas de riego los niveles de agua subterránea se han abatido decenas de metros, elevando el costo de extracción de las mismas al ser necesarios equipos mas potentes que exigen un mayor consumo de energía (CNA, 1995).

2.1.3. Situación Estatal

En el estado de Sonora, la CONAGUA (2017) tiene clasificados 61 acuíferos (Figura 2) que,

de acuerdo con su localización geográfica, 17 son costeros, 10 fronterizos y el resto intermontanos. Los acuíferos más importantes del estado, en cuanto a extensión y disponibilidad de agua, están en la Planicie Costera del Pacífico; sin embargo, la escasez de agua superficial en Sonora provoca que los recursos subterráneos sean la principal fuente de suministro para las actividades antropogénicas, situación que conllevó a que los acuíferos ubicados a lo largo de la costa se encuentran en estado de sobreexplotación y con problemas de intrusión salina (Vega-Granillo *et al.*, 2011). Los autores también mencionan que los contaminantes principales del agua subterránea además de la intrusión marina son: desechos industriales, agrícolas y mineros; entre estos contaminantes se encuentra el arsénico, bario, manganeso, compuestos nitrogenados, plaguicidas y sales.

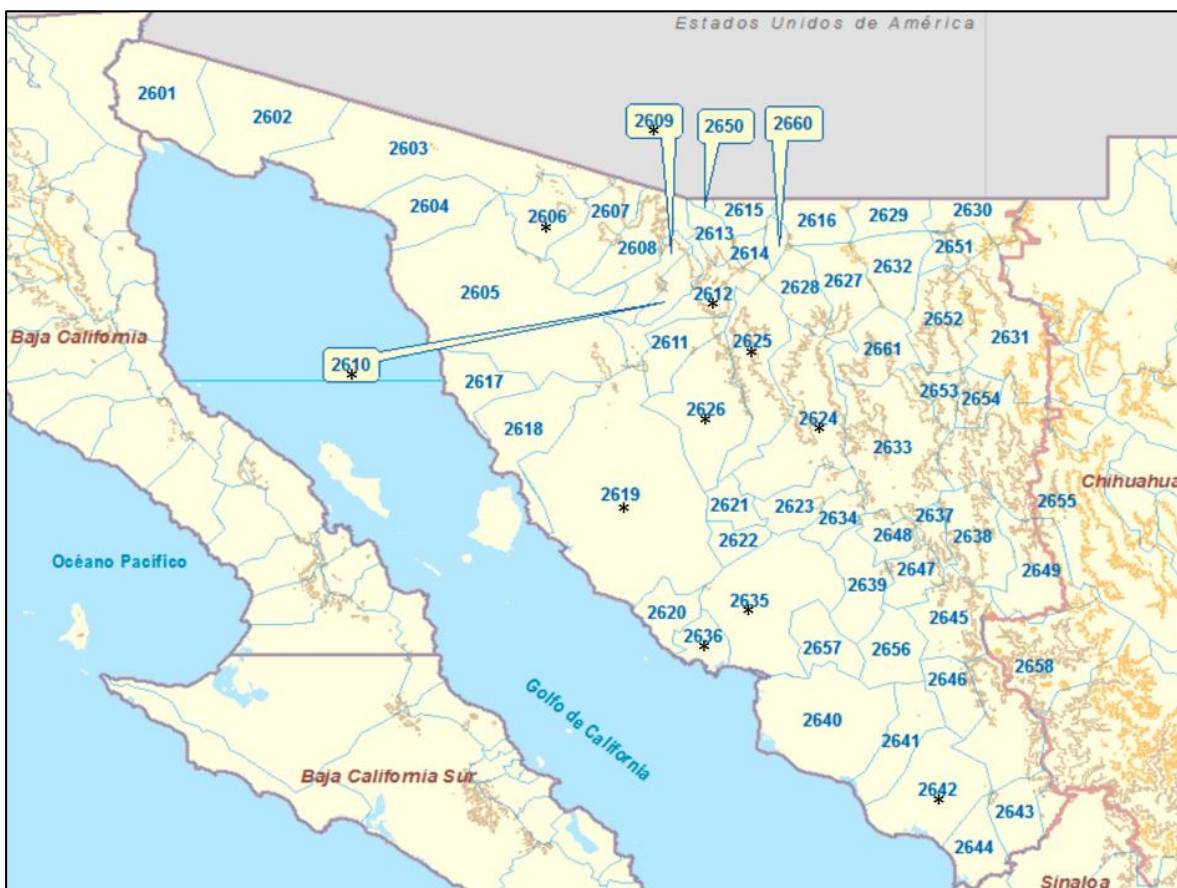


Figura 2. Acuíferos y provincias hidrogeológicas de Sonora (CONAGUAb, 2015). *Acuíferos con déficit de agua. El numero representa la clave del acuífero. La línea azul, marca los límites entre acuíferos.

Vega-Granillo *et al.* (2011), menciona que la sobreexplotación se produce cuando la extracción de agua de un acuífero se realiza a un ritmo mayor que el de su recarga media; los mismos autores afirman que de la información de descarga y recarga de 15 acuíferos publicada por la Comisión Nacional del Agua, 11 de ellos presentan déficit de agua [Los Chirriones (2606), Búsani (2609), Coyotillo (2610), Magdalena (2612), Costa de Hermosillo (2619), Río Sonora (2624), Río San Miguel (2625), Río Zanjón (2626), Valle de Guaymas (2635), San José de Guaymas (2636) y Valle del Mayo (2642)] (Figura 2), siendo los más afectados los de la Costa de Hermosillo, Valle del Mayo y Río Sonora.

2.1.4. Situación en la región noroeste de la Costa de Hermosillo

Los antecedentes de la Costa de Hermosillo se remontan a cuando en ella se realizaba una agricultura de temporal con las aguas que escurrían por el cauce del río Sonora. Moreno (2006) menciona que grupos colonizadores establecieron las primeras granjas y zonas de cultivo. En la década de los 40 se abren los primeros campos agrícolas, basados en el riego por bombeo de agua subterránea profunda y cuya región llegó a conformarse como una de las zonas agrícolas más importantes en la entidad (West, 1993).

La problemática de sobreexplotación del acuífero deriva al no conocer con certeza el potencial del reservorio de agua, y de que el alumbramiento de fuentes nuevas se realizara a gran escala sin cuantificaciones preliminares de los volúmenes existentes (Moreno, 2006). Políticamente el estado favorecía la sobreutilización del recurso hídrico pues según Hewitt (1982), entre 1926 y 1958 se destinaban de forma directa grandes sumas a las actividades relacionadas con la agricultura (ensanchamiento de superficies de cultivo e instalación de sistemas de riego), así mismo comenzó el uso de motores eléctricos para extraer agua de los pozos profundos, y se construyeron grandes obras de infraestructura, tanto hidráulica como de transportación; como la presa Abelardo L. Rodríguez en 1947 que contuvo el flujo del cauce del río Sonora, obligando al productor a intensificar la explotación de aguas subterráneas (CNA 1996). De esta manera, el número de pozos se incrementó de 7, en 1948, a 428, en 1955 (CONAGUA, 2007); mientras que en 1949 se obtenían 227 hm³ de agua de 400 pozos, para 1964 ya se alcanzaban 1,137 hm³ (Olavarrieta *et al.*, 2010), (Tabla 4 a y b).

Tabla 4a. Comportamiento del acuífero Costa de Hermosillo (1949-2007).

Ciclo agrícola	Siembra	Pozos	Recarga		Extracción	Dotación autorizada	Abatimiento medio anual	Nivel crítico al nivel del mar	
	ha	N	-----hm ³ -----				-----m-----		
1949-1950	25,220	194			226				
1950-1951	33,540	258			301				
1951-1952	41,990	308			386				
1952-1953	46,150	339			463				
1953-1954	67,974	409	360		767				
1954-1955	76,517	471	360		899				
1955-1956	78,500	473	360		902				
1956-1957	82,400	477	360		866				
1957-1958	82,400	478	360		856				
1958-1959	83,640	479	360		804				
1959-1960	106,515	479	360		988		0.78	-11	
1960-1961	116,100	479	324	360	971		0.95	-12	
1961-1962	108,600	479	360		882		1.05	-16	
1962-1963	111,100	480	360		915		1.07	-17	
1963-1964	126,175	493	360		1,136		1.53	-20	
1964-1965	130,010	493	360		1,015	1,006	1.71	-22	
1965-1966	122,860	493	570	780	360	910	939	1.05	-22
1966-1967	121,350	493	350	360	902	871	1.42	-23	
1967-1968	106,986	493	360		779	780	0.84	-25	
1968-1969	121,139	495	350	360	876	783	1.24	-27	
1969-1970	132,516	496	360		939	802	1.37	-29	
1970-1971	126,922	496	360		955	875	1.27	-31	
1971-1972	119,356		360		855	775	1.11	-32	
1972-1973	120,874		360		861	750	1.06	-34	
1973-1974	123,585		360		745	759	1.43	-36	
1974-1975	109,518		360		774	734	0.74	-36	
1975-1976	114,486		360		810	712	1.10	-38	
1976-1977	112,176		360		825	749	1.33	-40	
1977-1978	110,390		360		738	729	1.12	-42	
1978-1979	106,345		360		768	722	0.77	-45	
1979-1980	109,071		360		784	680	0.92	-46	

Fuente: Modificado de Moreno utilizando bibliografía de: (De la O Carreño, 1960); (Jiménez, 1965); (Tamayo, 1965); (Matlock, Fogel y Bush, 1966); (ACSA, 1968); Distrito de Riego 051-Costa de Hermosillo; Distrito de Desarrollo Rural 144; Distrito de Riego 051-Costa de Hermosillo y Asociación de Usuarios del Distrito de Riego.

Tabla 4b. Comportamiento del acuífero Costa de Hermosillo (1949-2007), continuación.

Ciclo agrícola	Siembra	Pozos	Recarga	Extracción	Dotación autorizada	Abatimiento medio anual	Nivel crítico al nivel del mar
	ha	N	-----hm ³ -----			-----m-----	
1980-1981	106,470		360	785	640	1.00	-48
1981-1982	99,156		360	760	600	0.76	-48
1982-1983	88,777		360	638	639	0.53	-48
1983-1984	80,353		360	588	606	0.66	-48
1985-1986	86,608		360	616	566	0.68	-50
1986-1987	83,532		360	610	527	0.78	-51
1987-1988	72,845		360	552	488	0.81	-52
1988-1989	70,271		360	473	449	0.69	-53
1989-1990	66,800		360	448	409	0.29	-54
1990-1991	64,600		360	422	409	0.38	-55
1991-1992	60,485		360	363	409	0.39	-55
1992-1993			360	388	409	-56	
1993-1994			360	431	409	-58	
1994-1995			360	395	409	-58	
1995-1996			360	471	409	-58	
1996-1997			360	459	399		
1997-1998			360	394	399		
1998-1999			350	380	399		
2001-2002			250				
2005-2006				410 461			
2006-2007	45,774	378		377			

Fuente: Modificado de Moreno utilizando bibliografía de: (García, 1998); (UNISON, 2001); (Quevedo, 2007); (CONAGUA et al, 2007); (Olavarrieta et al. 2010); Distrito de Riego 051-Costa de Hermosillo; Distrito de Desarrollo Rural 144; Distrito de Riego 051-Costa de Hermosillo y Asociación de Usuarios del Distrito de Riego.

Las Tablas 4 a y b, muestran un ineficiente manejo del acuífero, basado en extracciones de agua subterránea por encima de la recarga que recibe la unidad hidrogeológica. Esto, ha provocado el agotamiento de los recursos hídricos, por lo cual Salazar *et al.* (2012), mencionan que las condiciones de uso desregulado, poco sustentable y con desconocimiento del acuífero, provocaron los primeros signos de alarma; que dieron paso a la toma de medidas de acción entre 1951 y 1978 para minimizar los problemas de administración en la región hidrogeológica, entre ellas formular adecuados programas de riego (Tabla 5).

Tabla 5. Acciones para minimizar la problemática de administración del acuífero Costa de Hermosillo.

Año	Acción	Propósito
1951	Decreto presidencial.	Restringir el área para alumbramientos nuevos a 500 mil hectáreas en la planicie costera entre Hermosillo y el mar de Cortés.
11/07/1951	Primera veda.	Proteger una superficie muy pequeña de la Costa de Hermosillo, comprendida en los municipios de Villa de Seris y Hermosillo.
1953	Establecimiento del Distrito de Riego 051 (DR051).	Monitoreo sistemático del comportamiento del acuífero, y que se manejara de forma eficiente el agua subterránea.
11/12/1954	Primera ampliación del área de veda.	Abarcar hasta los límites del Distrito de Riego.
02/03/1963	Segunda ampliación del área de veda.	Como respuesta a los abatimientos de los niveles de agua subterránea.
1963-1964	Equipar pozos con medidores.	Determinar el volumen de la extracción.
1963-1966	Reducción programada de extracciones.	Como respuesta a los abatimientos de los niveles de agua subterránea.
02/06/1967	Tercera ampliación del área de veda.	Como respuesta a los abatimientos de los niveles de agua subterránea.
1978	Declaración del interés público.	Conservación de los mantos acuíferos de Sonora.
1994	Transferencia del DR051 a la Asociación de Usuarios del Distrito de Riego 051 (AUDR051).	Mejorar la administración y mantenimiento del mismo.
1996	Formulación de programa de riego.	Llevar acabo las extracciones conforme a la recarga.

Fuente: Elaboración del autor en base a Salazar *et al.* (2012), utilizando bibliografía anexada: (Halvorson *et al.*, 2003); (CONAGUA, 2015); (Moreno, 2006); (Olavarrieta *et al.*, 2010).

Estas medidas parciales y muchas veces fallidas no han evitado que se exploten grandes volúmenes de agua, lo que ha provocado que el nivel estático medio del acuífero disminuya los valores positivos que tenía hace seis décadas hasta casi 40 metros por debajo del nivel del mar, cuestión que ha causado problemas no sólo económicos y sociales, sino también ambientales, como la inversión del gradiente hidráulico, la intrusión salina y la afectación de alrededor de 22 mil hectáreas de tierra (Quevedo, 2007).

Aunque es evidente la sobreexplotación de agua subterránea, siguen utilizándose técnicas deficientes para el riego (gravedad y rodado); predomina el monocultivo y hay bajas eficiencias electromecánicas por falta de mantenimiento de los equipos de bombeo y pozos (Quevedo, 2007); además, persisten los subsidios a la energía eléctrica, lo cual, en palabras de Olavarrieta *et al.* (2010) "permite gran extracción de agua y el dispendio del recurso, el

uso de equipo ineficiente y cultivos no rentables". Por otra parte, también hay deficiencias en cuanto a los factores institucionales que gobiernan el uso del acuífero, pues el plan anual de riego no se cumple y los usuarios extraen el agua según sus necesidades productivas, y no de acuerdo con los volúmenes concesionados (Salazar *et al.*, 2012). Entre 1990 y 2005 se había planeado utilizar en promedio 50,314 hectáreas de riego y extraer un volumen medio de $381 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$; pero en la realidad fueron 57,979 hectáreas y se extrajeron 403 hm^3 por año en ese periodo, lo cual supera no sólo la cantidad concesionada, sino también la recarga media anual (Quevedo, 2007).

Por consiguiente, un tema prioritario en un escenario como el de la Costa de Hermosillo es la sustentabilidad de la extracción de agua subterránea, definida por Loáiciga (2003) como "la que puede desarrollarse a largo plazo, que cubre ciertos usos humanos y funciones ambientales, mientras el agua conserva su calidad natural y se evitan impactos negativos". Además, dicha sustentabilidad debe considerarse en función de los límites impuestos por la recarga media natural de la reserva y por las diferencias entre ganancias y costos relacionados con su uso, aspecto que se vuelve crucial al hablar de la rentabilidad de los productos agrícolas, puesto que este sector emplea la mayor parte del agua concesionada en la Costa de Hermosillo.

2.2. La Huella Hídrica

2.2.1. Relación de la huella hídrica y el agua virtual

El concepto de huella hídrica (HH) se basa en la teoría de "agua virtual" desarrollada por Allan (1998), al estudiar la posibilidad de importar agua virtual (en lugar de agua real) como una solución parcial a los problemas de escasez de agua en el Oriente Medio. El agua que se consume en el proceso de producción de un producto agrícola o industrial se denomina "agua virtual" (Allan, 1998). Si un país exporta un producto con un alto consumo de agua a otro país, exporta agua en forma virtual. De este modo, algunos países podrían apoyar a otros países en sus necesidades de agua. Para los países con escasez de agua podría ser atractivo

disminuir presiones a su recurso hídrico mediante la importación de productos altamente demandantes de agua, en lugar de producirlos (Hoekstra, 2003).

Hoekstra y Chapagain (2008) definen el agua virtual de un producto (bien o servicio) como el volumen de agua dulce usada para producir dicho producto; el enfoque en el agua dulce es importante porque es ésta la que es escasa, no el agua en general. El adjetivo "virtual" se refiere al hecho de que la mayor parte del agua utilizada para producir el producto no está contenida en el producto. El interés en el agua virtual empezó a aumentar rápidamente una vez que los primeros estudios cuantitativos se publicaron (Hoekstra y Hung, 2002; Hoekstra, 2003; Chapagain y Hoekstra, 2004; Oki y Kanae, 2004; De Fraiture *et al.*, 2004). De este modo, la huella hídrica de una comunidad o de un individuo puede obtenerse mediante la multiplicación de todos los bienes y servicios consumidos, por su contenido de agua virtual (Hoekstra, 2009).

2.2.2. Elementos de la huella hídrica

La HH de un sistema, individuo o de una comunidad se divide en tres elementos: azul, verde y gris. La HH azul es el volumen de agua dulce que se evapora de las aguas superficiales y aguas subterráneas usadas para producir los bienes y servicios consumidos por el individuo o la comunidad; se excluye la parte del agua que se extrae del suelo o aquel volumen de agua que vuelve al sistema directamente después de su uso o por fugas. La HH verde es el volumen de agua usada por parte de la vegetación (evapotranspiración). La HH gris es el volumen de agua contaminada que se asocia con la producción de todos los bienes y servicios para el individuo o la comunidad (Builes, 2013).

2.2.3. Aplicación de la huella hídrica

La HH puede calcularse para cualquier grupo bien definido de consumidores, entre ellos una familia, pueblo, ciudad, provincia, estado o nación (Hoekstra, 2009; Ma *et al.*, 2006; Hoekstra y Chapagain, 2007; Kampman *et al.*, 2008) o una persona, empresa u organización (Gerbens-Leenes y Hoekstra, 2008). También se puede calcular para una actividad específica, bien o servicio. Por ejemplo, Chapagain *et al.* (2006) realizó el cálculo de la huella

hídrica del algodón; Chapagain y Hoekstra (2007) evaluaron la huella hídrica del café y el té, y Gerbens-Leenes *et al.* (2008) estimaron la huella hídrica de los productos energéticos primarios.

Inicialmente el concepto de HH se ha discutido en foros de política, mas no en eventos científicos y/o ambientales (Hoekstra, 2009). Después de su lanzamiento en la reunión de expertos en Delft en 2002, el concepto ha sido discutido en varias reuniones internacionales sobre el agua (Builes, 2013) (Tabla 6).

Tabla 6. Discusión del concepto de huella hídrica a nivel internacional.

Año	Autor	Reunión internacional	Lugar
2003	(Builes, 2013)	Tercer Foro Mundial del Agua	Japón
2003	(WWC, 2004)	Conferencia "El Comercio de Agua Virtual y Geopolítica" organizada por el World Water Council.	
2005	(Horlemann y Neubert, 2007)	Reunión de expertos "El Comercio de Agua Virtual" organizada por el Instituto Alemán de Desarrollo.	Bonn Alemania
2006	(Builes, 2013)	Cuarto Foro Mundial del Agua.	Cd. México
2006	(Hummel <i>et al.</i> , 2007)	Reunión de expertos "La Gobernanza Mundial del Agua" organizado por el Proyecto Global del Sistema de Agua.	Bonn Alemania
2006	(Hummel <i>et al.</i> , 2007)	Segunda reunión de expertos "El Comercio de Agua Virtual" organizado por el Instituto de Investigaciones Socio Ecológicas.	Frankfurt Alemania

Fuente: Elaboración del autor utilizando datos de Builes, (2013) y bibliografía citada.

2.2.4. Estudios previos de huella hídrica

Alrededor del mundo existen estudios a diferentes escalas, centrados generalmente en cinco niveles: proceso, producto, sector, unidad administrativa (país) y global (Zeng *et al.*, 2012). A nivel de proceso, como se mencionó anteriormente, Chapagain *et al.* (2006) calcularon la HH de la producción de algodón para diferentes procesos; Oel y Hoekstra, (2010) estimaron la huella hídrica del proceso de producción de papel. A nivel de producto, Mekonnen y Hoekstra (2010a) estimaron la huella hídrica de 126 cultivos en todo el mundo, durante el período 1996-2005, con una alta resolución espacial; Kongboon y Sampattagul (2012) calcularon la HH para la caña de azúcar en Tailandia; la HH de pasta y pizza (Aldaya y

Hoekstra, 2010) y el café y el té (Chapagain y Hoekstra, 2007) también han sido analizadas. A nivel sectorial, Aldaya *et al.* (2010) calcularon la HH de los sectores doméstico, industrial y agrícola en España y encontraron que el sector más ineficiente en el uso de agua es el agrícola. A nivel nacional se han calculado la HH de China (Liu y Savenije, 2008; Ma *et al.*, 2006), India (Kampman *et al.*, 2008), Indonesia (Bulsink *et al.*, 2009), Países Bajos (Van Oel *et al.*, 2009), Reino Unido (Chapagain y Orr, 2008), Francia (Ercin *et al.*, 2012) y recientemente Colombia (WWF, 2012). A nivel mundial, la HH de los bienes y servicios consumidos por los seres humanos han sido cuantificados por Hoekstra y Chapagain (2007) y Hoekstra y Mekonnen (2012).

En lo que se refiere a la agricultura, los estudios sobre el consumo global de agua (uso de agua por evapotranspiración) se muestran en la Tabla 7 a y b. L'vovich *et al.* (1990) y Shiklomanov (1993) evaluaron el consumo de agua azul a nivel continental. Postel *et al.* (1996) hicieron una estimación global de los usos consuntivos de agua azul y verde. Seckler *et al.* (1998) realizaron una primera valoración de los usos consuntivos del agua azul en la agricultura a nivel de país. Rockström *et al.* (1999) y Rockström y Gordon (2001) realizaron algunas de las primeras apreciaciones mundiales de consumo de agua verde por parte de cultivos. Shiklomanov y Rodda (2003) estimaron los usos consuntivos de agua azul a nivel de condado o municipalidad. Hoekstra y Hung (2002) fueron los primeros en hacer una estimación global del uso consuntivo del agua para un determinado número de cultivos a escala de país, pero no distinguen explícitamente los componentes verde y azul. Chapagain y Hoekstra (2004) y Hoekstra y Chapagain (2007, 2008) tomaron como base este último estudio y lo mejoraron en varios aspectos, pero todavía no distinguen explícitamente entre el consumo de agua verde y azul.

Tabla 7a. Publicaciones de estudios de HH alrededor del mundo.

Autor	Escala	No Cultivos	HH azul	HH verde	HH gris
L'vovich <i>et al.</i> (1990)	Continental		√		
Shiklomanov (1993)	Continental		√		
Postel <i>et al.</i> (1996)	Global		√	√	
Seckler <i>et al.</i> (1998)	País		√		
Rockström <i>et al.</i> (1999), Rockström and Gordon (2001)	Global			√	

Fuente: Modificado de (Builes, 2013).

Tabla 7b. Publicaciones de estudios de HH alrededor del mundo, continuación.

Autor	Escala	No Cultivos	HH azul	HH verde	HH gris
Hoekstra and Hung (2002)	País	38	√	√	
Shiklomanov and Rodda (2003)	Condado		√		
Chapagain and Hoekstra (2004)	País	164	√	√	
Hoekstra and Chapagain (2007, 2008)	País	164	√	√	
Rodriguez-Casado <i>et al.</i> (2008)	País	11	√	√	
Rost <i>et al.</i> (2008)	Global 30'x30'	11	√	√	
Bulsink <i>et al.</i> (2009)	País	56	√	√	√
Siebert and Döll (2008, 2010)	Global 5'x5'	26	√	√	
Liu <i>et al.</i> (2009)	Global 30'x30'	17	√	√	
Liu and Yang (2010)	Global 30'x30'	22	√	√	
Hanasaki <i>et al.</i> (2010)	Global 30'x30'		√	√	
Mekonnen y Hoekstra. (2011)	Global 5'x5'	146	√	√	√
Samoral <i>et al.</i> (2011)	Cuenca	9	√	√	
Zeng <i>et al.</i> (2012)	Cuenca	16	√	√	
WWF (2012)	País	10	√	√	√
Hoekstra <i>et al.</i> (2012)	País	9	√		

Fuente: Modificado de (Builes, 2013).

Los estudios mencionados se realizaron a partir de imágenes y datos con baja resolución espacial, sin embargo, el avance computacional y tecnológico ha permitido aumentar dicha resolución y tener mejores resultados. Rost *et al.* (2008) hicieron una estimación global del consumo de agua verde y azul agrícola con una resolución espacial de 30 minutos de arco. Siebert y Döll (2008, 2010) realizaron cálculos del consumo global de agua verde y azul para 26 cultivos mediante una malla de celdas con una resolución espacial de 5 minutos de arco. Liu *et al.* (2009) y Liu y Yang (2010) hicieron una estimación global del consumo de agua verde y azul para la producción de 17 y 22 cultivos respectivamente, con una resolución espacial de 30 minutos de arco. Hanasaki *et al.* (2010) presentaron el consumo global de agua verde y azul para todos los cultivos, asumiendo un cultivo dominante por cada celda de 30 minutos de arco de resolución espacial. Mekonnen y Hoekstra (2010a) han sido los que han calculado, con mayor resolución espacial, la HH de los cultivos a escala global con datos

provenientes de imágenes de 5 minutos de arco de resolución espacial, para 126 cultivos en todo el mundo.

Por otro lado, a nivel de país, Rodríguez-Casado *et al.* (2008) hacen una aproximación a la HH verde y azul para 11 cultivos en España, diferenciando los componentes azul y verde de la HH agrícola española. Bulsink *et al.* (2009) calcularon la huella hídrica de 56 cultivos de Indonesia al igual que WWF (2012) quienes estimaron la HH para 10 cultivos en Colombia. Hoekstra *et al.* (2012) calcularon la HH hídrica para los Países Bajos, sin embargo, solo se enfocaron en el componente azul.

Son pocos los reportes de estudios en los cuales se estime la huella hídrica gris en la agricultura, solo Mekkonen y Hoekstra (2010a) realizaron una aproximación a escala global de HH gris para 126 cultivos y Arévalo *et al.* (2012) y Bulsink *et al.* (2009) quienes hallaron la HH gris para diferentes cultivos a nivel de país, para Colombia e Indonesia respectivamente. A nivel de cuenca hidrográfica, Samoral *et al.* (2011), realizaron estimaciones de huella hídrica extendida para la cuenca del río Guadalquivir en España; Aldaya *et al.* (2009) analizaron el agua virtual y la HH, desde el punto de vista hidrológico y económico, en la parte española de la cuenca del Guadiana, Zeng *et al.* (2012) evaluaron la huella hídrica en la cuenca del río Heihe en China y su sostenibilidad a escala mensual.

De acuerdo con lo anterior; a pesar de que en los últimos años la producción de literatura en temas de huella hídrica va en aumento, es notoria la carencia de estudios que se aproximen explícitamente al cálculo de huella hídrica a nivel de cuenca para el sector agrícola y que discriminen la HH azul, verde y gris (Builes, 2013).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología general en la que se basó este trabajo incluye las cuatro fases (Figura 3), descritas por Hoekstra *et al.* (2011).

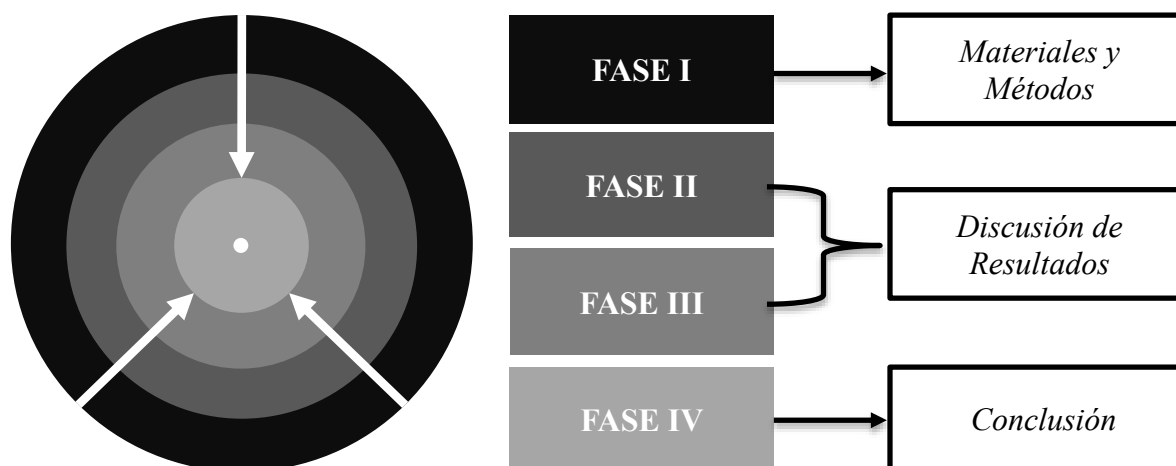


Figura 3. Fases para la evaluación de la huella hídrica. Fuente: Modificado de Arévalo Uribe, (2013).

La figura anterior, muestra como al concluir cada una de las fases se avanza hacia la meta de estudio. La Fase I, tiene como propósito definir el alcance del estudio y enfatizar el objetivo del mismo. En la fase II, se cuantifica la huella hídrica por unidad de estudio. La fase III consiste en evaluar la sustentabilidad de la huella hídrica. Por último, en la fase IV, se generan respuestas estratégicas frente a los resultados.

3.1. Fase I. Alcance

3.1.1. Alcance por unidad de estudio

El cálculo de la HH ($\text{m}^3 \text{Mg}^{-1}$), se llevó acabo con un enfoque directo hacia la producción agrícola en los cultivos anuales: Sandía (*Citrullus lanatus*), Trigo (*Triticum aestivum*) y perennes: Uva de mesa (*Vitis vinifera*), Nogal pecanero (*Carya illinoensis*); sin considerar el uso de agua correspondiente a mano de obra, energía eléctrica, combustibles, material de embarque, entre otros (huella hídrica indirecta). En el caso de la HH gris, se consideró el

nitrógeno (N) como contaminante a degradar considerando ya que, a nivel mundial la contaminación de las aguas subterráneas por nitratos ha sido atribuida a la excesiva aplicación de fertilizantes nitrogenados (Kessebalou *et al.*, 1996). Mientras que el análisis de sustentabilidad ambiental se enfocó en la $HH_{prod,azul}$, buscando conocer el impacto de los cultivos de estudios sobre el acuífero Costa de Hermosillo, dado que este ha cedido un fuerte volumen de agua subterránea desde la década de 1940, en la producción de cultivos de exportación, fundamentalmente a los Estados Unidos de Norteamérica.

El periodo de tiempo evaluado para obtener la HH de cada cultivo en específico fue: sandía otoño-invierno (OI) 2015 y primavera-verano (PV) 2016; trigo en 2008; vid variedad perlette 2005 y variedad superior 2006 y; nogal pecanero 2006. Y el periodo de tiempo evaluado para el análisis de sustentabilidad ambiental fue del 2003 al 2013. Tanto para el análisis como para los cálculos se utilizó la información estadística en Tabla 8 a y b.

Tabla 8a. Estadísticas de cultivos agrícolas (sandía, trigo, vid y calabaza).

Año	Cosecha ha ⁻¹	Producción Mg ⁻¹	Rendimiento Mg ⁻¹ ha ⁻¹
Sandía			
2016	4,431	235,815	53.2
2015	2,788	134,710	48.3
2014	1,676	50,223	30
2013	3,139	93,788	29.9
2012	3,312	106,374	32.1
2011	3,325	100,080	30.1
2010	3,282	131,280	40
2009	2,816	112,640	40
2008	2,841	113,640	40
2007	2,277	79,239	34.8
2006	1,385	47,555	34.3
2005	1,033	38,120	36.9
2004	1,563	52,542	33.6
2003	921	31,323	34
Promedio	2,485	94,809	36.9
Trigo grano			
2016	7,409	53,450	7.2
2015	8,223	47,447	5.8
2014	7,442	45,607	6.1
2013	8,402	57,094	6.8
2012	8,719	65,393	7.5
2011	11,390	68,337	6
2010	12,631	84,628	6.7
2009	14,888	89,328	6
2008	8,945	56,354	6.3
2007	10,580	64,587	6.1
2006	11,500	71,300	6.2

Fuente: Elaboración del autor en base a datos del SIAP.

Tabla 8b. Estadísticas de cultivos agrícolas (sandía, trigo, vid y calabaza), continuación.

Año	Cosecha	Producción	Rendimiento
	ha ⁻¹	Mg ⁻¹	Mg ⁻¹ ha ⁻¹
Trigo grano			
2005	24,146	140,046	5.8
2004	22,328	116,225	5.2
2003	16,380	94,243	5.8
Promedio	11,827	75,289	6.2
Vid de mesa			
2016	9,228	138,591	15
2015	9,196	150,104	16.3
2014	8,497	145,594	17.1
2013	8,497	155,278	18.3
2012	8,431	170,690	20.3
2011	8,653	108,924	12.6
2010	8,713	118,183	13.6
2009	8,202	104,424	12.7
2008	8,662	109,352	12.6
2007	11,226	182,616	16.3
2006	11,490	101,274	8.8
2005	11,976	182,664	15.3
2004	12,956	138,239	10.7
2003	11,330	161,560	14.6
Promedio	9,790	140,535	14.6
Nogal			
2016	6,175	14,203	2.3
2015	6,075	12,150	2
2014	6,075	11,057	1.8
2013	6,075	13,354	2.2
2012	6,075	15,188	2.5
2011	6,075	10,328	1.7
2010	6,075	13,973	2.3
2009	3,075	6,150	2
2008	5,841	5,841	1
2007	3,070	7,675	2.5
2006	2,555	2,172	0.9
2005	2,555	5,366	2.1
2004	2,338	4,208	1.8
2003	2,647	5,029	1.9
Promedio	4,622	9,050	1.9

Fuente: Elaboración del autor en base a datos del SIAP.

3.1.2. Alcance geográfico

El área de estudio trata principalmente de una planicie agrícola de 169.593 ha (Figura 4), donde se localiza el Distrito de Riego 051 y los cultivos anuales y perenes ocupando alrededor de 53,000 ha, irrigadas con agua subterránea extraída por medio de alrededor de 500 pozos profundos. El clima es árido con una precipitación anual de alrededor de 200 mm, la estación lluviosa se presenta de julio a septiembre (70 %) y tiene escasas precipitaciones de marzo a junio (Figura 5). Las temperaturas diarias medias oscilan entre los 22 °C y 24 °C, con heladas esporádicamente en invierno y temperaturas frecuentemente superiores a 40 °C desde el final de la primavera hasta el verano (Rodríguez *et al.*, 2010).

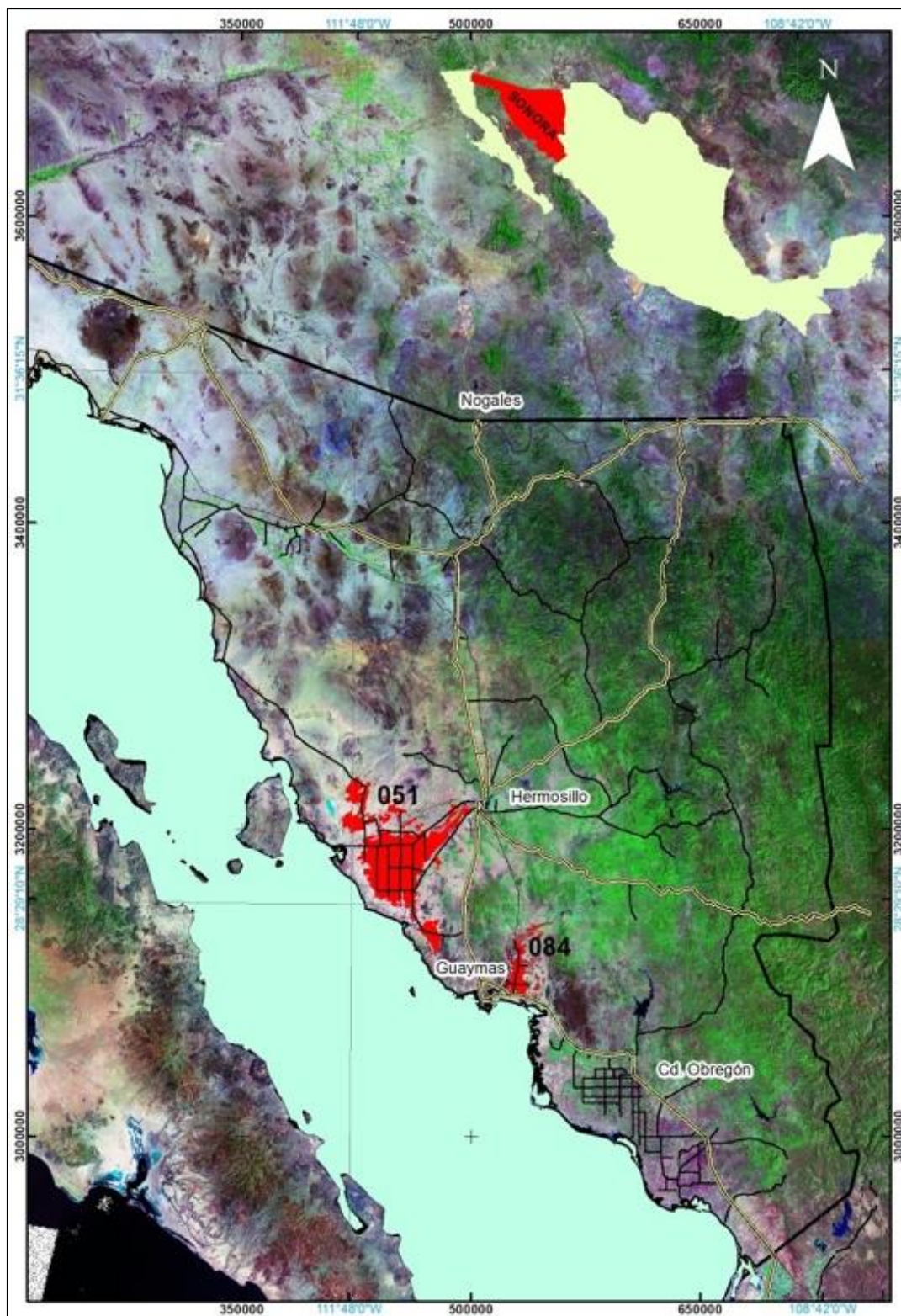


Figura 4. Planicie Costa de Hermosillo y Distrito de riego 051. Fuente: CONAGUA, 2009. Elaborado por: Luna-Salazar, CEDES.

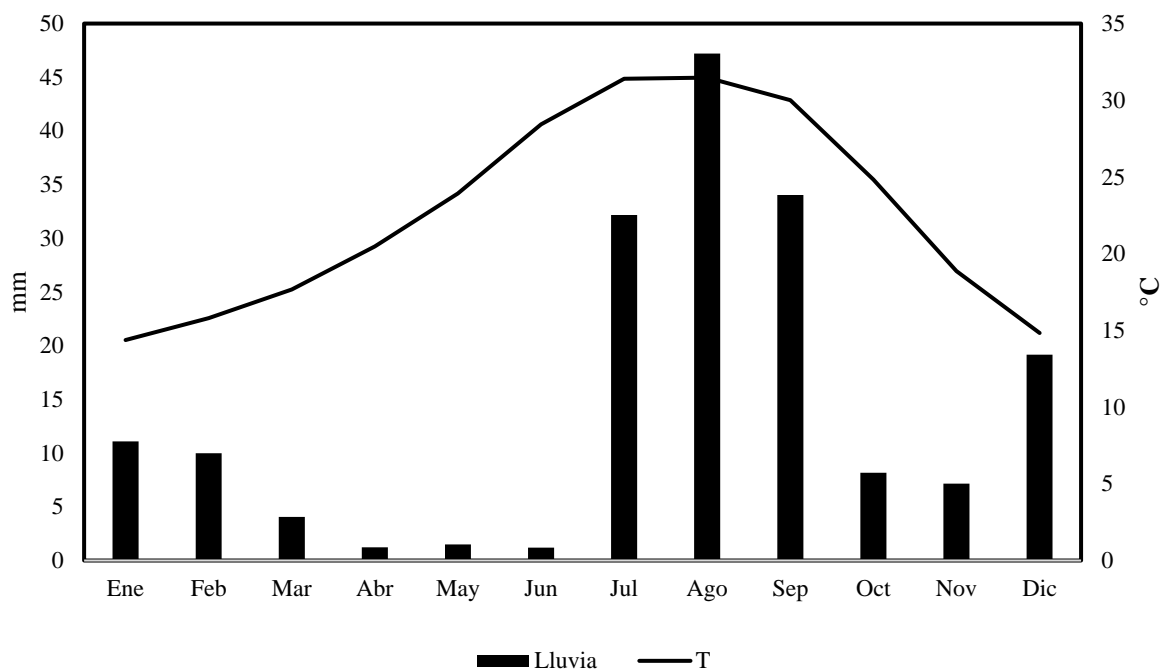


Figura 5. Climograma, de la Costa de Hermosillo, Sonora. En base a datos de las normales climatológicas (máximas y mínimas) de las estaciones en la región: Carmen, Palo verde y San Isidro (Tabla 9).

Tabla 9. Número de años con datos por mes, en las estaciones climatológicas Carmen, Palo verde y San Isidro.

Mes	Carmen	Palo verde	San Isidro
Enero	32	37	50
Febrero	32	41	51
Marzo	32	39	50
Abril	33	37	47
Mayo	33	39	47
Junio	33	38	48
Julio	34	38	50
Agosto	34	36	49
Septiembre	34	36	50
Octubre	33	39	49
Noviembre	35	35	51
Diciembre	34	38	51

Fuente: elaboración del autor en base a datos CONAGUA: www.smn.cna.gob.mx/

3.1.3. Alcance metodológico

3.1.3.1. Huella hídrica

Según la metodología de la Red de Huella Hídrica (WFN, por sus siglas en inglés), para calcular la HH de un producto primero es necesario conocer los elementos que la componen. La Figura 6 muestra de forma detallada el proceso utilizado para el cálculo de la HH_{prod} de cada cultivo en este estudio:

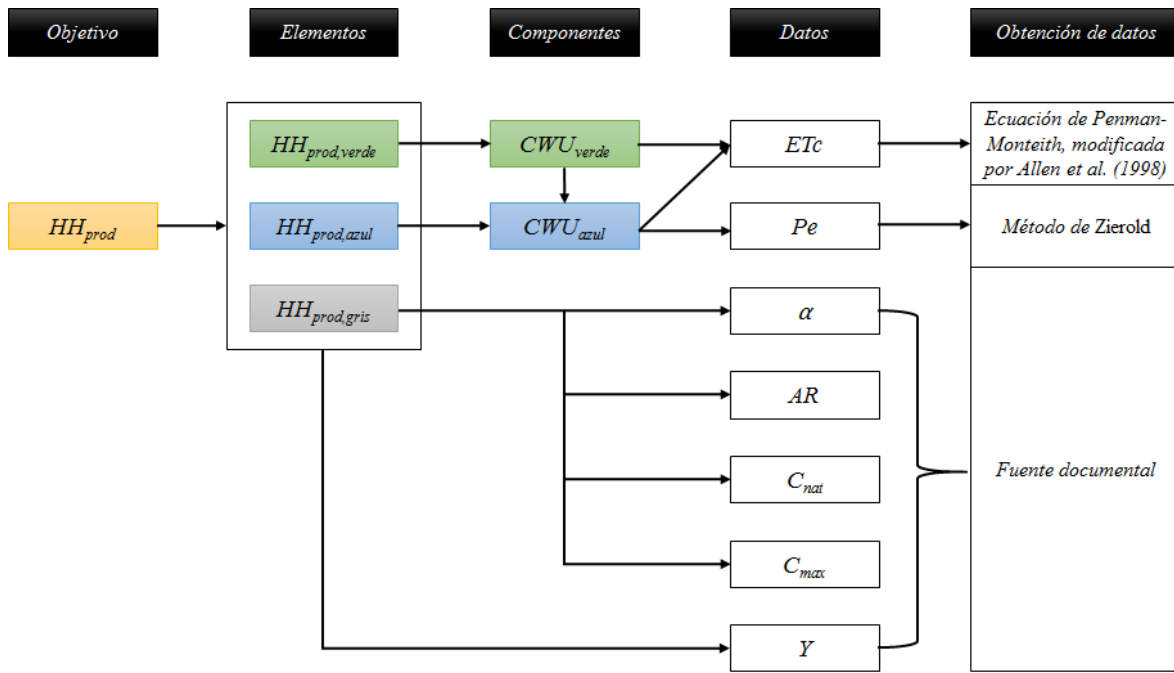


Figura 6. Modelo conceptual para el cálculo de HH. En base a información de The Water Footprint Assessment Manual (Hoekstra *et al.*, 2011).

El modelo anterior, muestra como la huella hídrica de la producción (HH_{prod}) es igual a la suma de sus elementos según la siguiente ecuación:

$$HH_{prod} = HH_{prod,verde} + HH_{prod,azul} + HH_{prod,gris}, [m^3 Mg^{-1}] \quad (1)$$

Dónde; HH_{prod} = Volumen total de agua dulce necesario para producir el producto, $HH_{prod,verde}$ = volumen total de agua dulce (precipitación) para producir el producto,

$HH_{prod,azul}$ = volumen total de agua dulce (superficial y o subterránea) para producir el producto y, $HH_{prod,gris}$ = Volumen total de agua dulce necesario para degradar los contaminantes utilizados en el proceso productivo.

Para la obtención de los elementos verde y azul ($HH_{prod,verde}$ y $HH_{prod,azul}$), se utilizaron las ecuaciones 2 y 3:

$$HH_{prod,verde} = \frac{CWU_{verde}}{Y} [m^3 Mg^{-1}] \quad (2)$$

$$HH_{prod,azul} = \frac{CWU_{azul}}{Y} [m^3 Mg^{-1}] \quad (3)$$

Donde; CWU_{verde} y CWU_{azul} = el uso de agua verde y azul de los cultivos y, Y = el rendimiento por hectárea de los cultivos. Los datos para (Y) fueron adquiridos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesca (SIAP), mientras que los componentes verde y azul, se calcularon teniendo en cuenta la acumulación de la evapotranspiración diaria (ET , mm día⁻¹) durante el período de crecimiento de los cultivos según las expresiones siguientes:

$$CWU_{verde} = 10 \times \sum_{d=1}^{lgp} ET_{verde} [m^3 ha^{-1}] \quad (4)$$

$$CWU_{azul} = 10 \times \sum_{d=1}^{lgp} ET_{azul} [m^3 ha^{-1}] \quad (5)$$

Donde; la ET_{verde} , representa la evapotranspiración del agua verde y ET_{azul} , la evapotranspiración de agua azul. El factor 10 convierte la profundidad del agua medida de lámina a volúmenes de agua de superficie en m³ ha⁻¹. La suma se realiza sobre el período entre el día de la siembra hasta el día de la cosecha (lgp es igual a la duración del período de

crecimiento en días para los cultivos anuales y, es igual a un año para los perennes debido a que la planta constantemente requiere agua para mantenerse).

Para calcular la ET_{azul} , y ET_{verde} , se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$ET_{azul} = ET_c - P_e \quad (6)$$

$$ET_{verde} = ET_c - CWU_{azul} \quad (7)$$

Donde; la ET_c , representa la evapotranspiración real del cultivo y P_e , la precipitación efectiva.

Para el cálculo de la ET_c , se recopiló información generada por un sistema de flujos turbulentos covarianza de vórtices (CE), instalado en una torre tres metros por encima de los cultivos, con sensores para medir las componentes de la ecuación de balance de energía (BE), sobre la superficie sembrada para cada cultivo: sandía otoño-invierno (OI) 60 ha en 2015 (datos no publicados) y primavera-verano (PV) 60 ha en 2016 (Román *et al.*, 2017); trigo 50 ha en 2008 (datos no publicados); vid perlette 10 ha en 2005, superior 10 ha en 2006; y nogal pecanero 50 ha en 2006 (Rodríguez *et al.*, 2010).

La P_e , se cálculo utilizando el método de Zierold (1988), el cual consiste en la aplicación de las siguientes formulas empíricas:

$$P_e = P - 0.05 P^2 \quad \text{Si } P < 2.5\text{cm} \quad (7)$$

$$P_e = 1.27 P^{0.75} - 0.0806 P^{1.5} \quad \text{Si } P > 2.5\text{cm} \quad (8)$$

Dónde; P_e = Precipitación efectiva y P = Precipitación observada.

La $HH_{prod,gris}$, se calculó como la cantidad aplicada de productos químicos para el cultivo (AR , kg N ha^{-1}) multiplicado por la fracción (α) de lixiviación y escorrentía, y dividido por la concentración máxima aceptable (C_{max} , kg m^3), menos la concentración natural para el contaminante considerado (C_{nat} , kg m^3) y finalmente dividido por el rendimiento del cultivo (Y , Mg ha^{-1}), según la siguiente ecuación:

$$HH_{prod,gris} = \frac{(\alpha \times AR) / (C_{max} - C_{nat})}{Y} [m^3 Mg^{-1}] \quad (10)$$

Se utilizó como (α) el 10% del N total aplicado (Chapagain *et al.*, 2006); el (AR , kg ha^{-1}) utilizado para vid fue de 135 Kg ha^{-1} , nogal 200 Kg ha^{-1} y sandía 225 Kg ha^{-1} , según la Guía Técnica para el Área de Influencia del Campo Experimental Costa de Hermosillo, México 2010; mientras que, para el trigo fueron 250 Kg ha^{-1} según la Agenda Técnica Agrícola de Sonora segunda edición 2015. La C_{max} de N en cuerpos de agua, se estableció siguiendo el valor límite que presenta la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA), organización que permite 10 mg N L^{-1} en aguas para consumo humano (Mekonnen y Hoekstra; 2010). Lo anterior considerando que aguas con 20 mg N L^{-1} o más, según Voisin, (1971) pueden producir cianosis en lactantes. La C_{nat} se estableció igual a (0), siguiendo la recomendación del manual de WFA (Hoekstra *et al.*, 2011).

3.1.3.2. Análisis de sustentabilidad de la Huella hídrica

El análisis de sustentabilidad ambiental de la HH, consiste en comparar la oferta hídrica natural (O_{hn}) que recibe la unidad hidrogeológica, con la demanda hídrica azul (D_{ha}) para uso agrícola. El propósito de dicho análisis es el de identificar hotspot [representación de puntos en los cuales la HH azul en un período específico en una cuenca específica, excede la disponibilidad de agua azul (Hoekstra *et al.*; 2011)]. El análisis se llevó a cabo utilizando las siguientes ecuaciones:

Si $O_{hn} \geq D_{ha}$ = No se presenta hotspot ambiental (11)

Si $O_{hn} < D_{ha}$ = Se presenta hotspot ambiental (12)

Inicialmente, la recarga media anual del acuífero fue calculada en 350 hm³ anuales, considerando como las principales fuentes a la precipitación, las aguas de retorno agrícola y el aporte por infiltración de los ríos Sonora y Bacoachi (Matlock *et al.*, 1966; ACSA, 1968 *in* Castro-García, 1998). Posteriormente, con datos de 1997 a 2001, se calculó la recarga total al acuífero en 250 hm³ anuales (UNISON, 2001). Sin embargo la O_{hn} para las actividades agrícolas es inferior pues, según Quevedo (2007), respecto a la recarga anterior 23.36 hm³ están concesionados para uso público urbano, 1.18 hm³ para industrial, 0.97 hm³ para pecuario; y según Monreal *et al.* (2002), el agua restante (98.4 hm³) se recarga de agua salina proveniente del mar de Cortez. Lo anterior significa que la O_h disponible para la agricultura es igual a 121.6 hm³, considerando que según Hoekstra *et al.*, (2011), la huella hídrica solo toma en cuenta el agua dulce y no considera el agua dulce que retorna a la cuenca, o en este caso al acuífero.

Según Calle (2008), una aproximación a la demanda hídrica se puede obtener a partir de los volúmenes de producción sectorial y de factores de consumo de agua por tipo de producto o servicio, donde dependiendo del tipo de escenario, la demanda total es igual a la suma del uso del agua doméstico, industrial, agrícola, pecuario y el sector de servicios. Para el caso de estudio solo se considera el sector agrícola en específico la demanda hídrica azul [D_{ha} ($HH_{prod, azul}$ m³ año⁻¹)] de los cultivos sandía, trigo, vid y nogal.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Fase II. Cuantificación de la huella hídrica

Los resultados obtenidos para los cultivos de estudio se muestran en la Figura 7, donde se aprecia como la HH_{prod} difiere de cultivo a cultivo. Considerando los rendimientos de los cultivos promedio, los valores más bajos se muestran en la hortaliza PV = $119 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$, OI = $141 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$ y año agrícola = $260 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$; seguido de la vid = $591 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$; el cereal = $927 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$; y por último la nuez = $7,880 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$. Lo anterior se asemeja a la tendencia en aumento encontrada por Mekonnen y Hoekstra (2010) al evaluar la HH de 146 cultivos primarios a escala mundial (Tabla 10).

Tabla 10. Tendencia de HH en aumento, según el tipo de cultivo.

Tipo de cultivo	HH ($\text{m}^3 \text{ Mg}^{-1}$)
Azucareros	200
Verduras	300
Raíces y tubérculos	400
Frutas	1,000
Cereales	1,600
Oleaginosas	2,400
Legumbres	4,000
Espicias	7,000
Frutos secos	9,000

Fuente: Elaboración del autor en base a datos de Mekonnen y Hoekstra (2010).

Los resultados también presentan semejanza con los resultados de Mekonnen y Hoekstra (2010) en cuanto a la tendencia en aumento. No obstante hay diferencias, por ejemplo la sandía en su año agrícola, se asemeja a los valores mostrados entre los cultivos azucareros y las verduras; la vid se asemeja a las raíces-tubérculos y frutas; el trigo concuerda con los valores en las frutas; y la nuez se encuentra entre las especias y los frutos secos (Tabla 10). Sin embargo, los valores en la tabla anterior son generalizados, es decir los autores promediaron la HH de (n) cantidad de futas, verduras, cereales, etc. Situación que conlleva a que se presenten variaciones entre los resultados de ambos estudios.

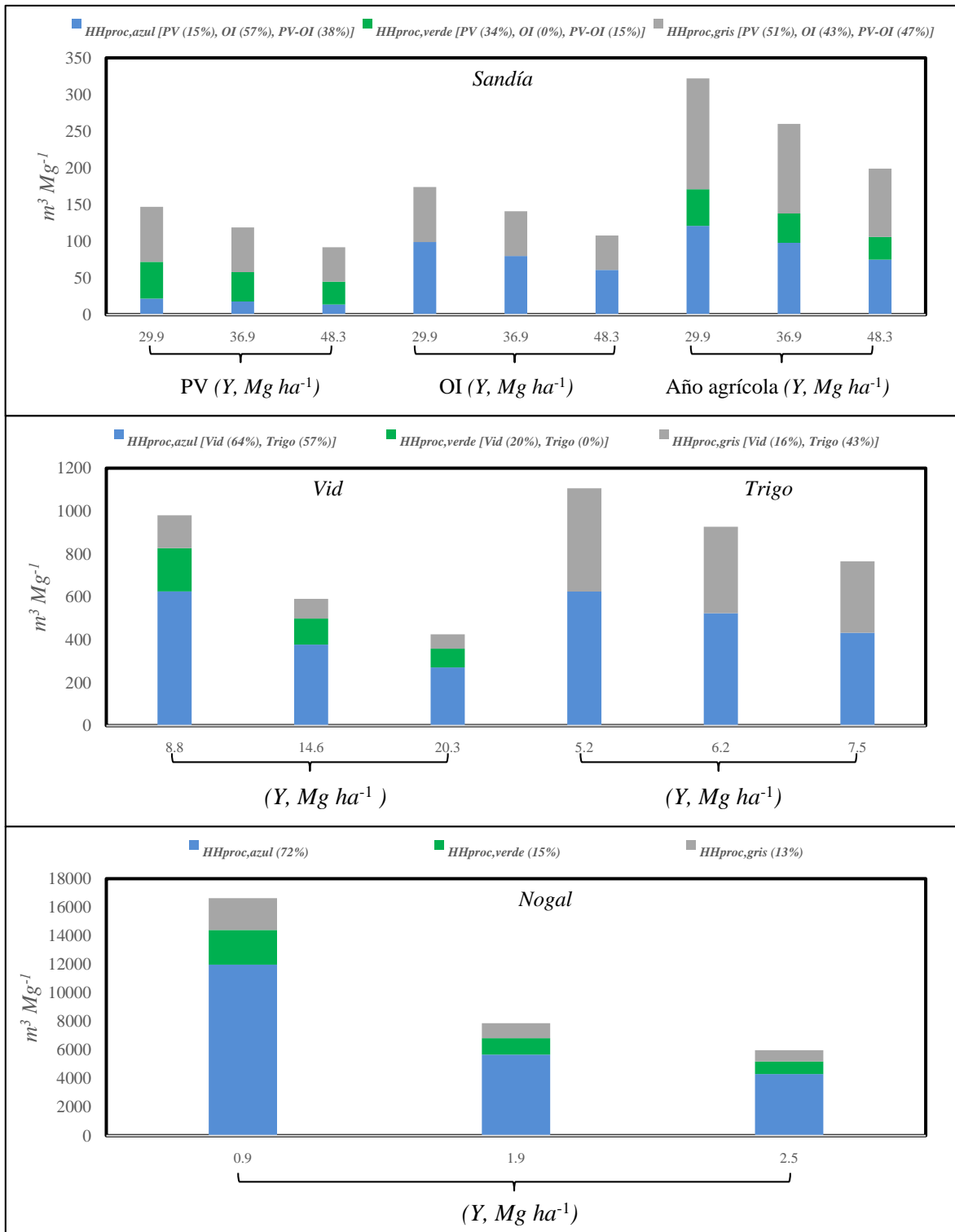


Figura 7. HH_{prod} ($m^3 Mg^{-1}$), sandía, vid, trigo y nogal. Rendimiento promedio máximo y mínimo de según el SIAP (2003-2015). Resultado de la vid con respecto al promedio de las 2 variedades evaluadas (Perlette-Superior).

La Figura 7, muestra como tendencia en aumento “sandía, vid, trigo y nogal”, se debe principalmente al rendimiento de los cultivos, por lo que este factor también es relevante para los cálculos de HH. Mekonnen y Hoekstra (2010) mencionan que los cultivos con un alto rendimiento o biomasa cosechada, generalmente tienen una huella hídrica más pequeña por tonelada que los cultivos con un rendimiento bajo. Es decir, la huella hídrica puede variar significativamente dependiendo del rendimiento de los cultivos (Y), ejemplo de esto es la HH del nogal, cultivo de estudio con el más bajo rendimiento ha^{-1} y con la HH más grande llegando hasta los $16,633 m^3 Mg^{-1}$, cantidad superior 17 veces a la HH de la vid, 15 a la del trigo y 52 en lo que concierne a la sandía año agrícola [comparaciones entre los rendimientos más pequeños (Tabla 11 a y b)].

Puesto que los rendimientos de los cultivos son variables (Tabla 8 a y b), es importante calcular la HH no solo en base al rendimiento promedio sino también en base al máximo y mínimo para apreciar de forma más clara su máxima y mínima expresión. Así, se puede decir que en la Costa de Hermosillo la huella hídrica de la sandía puede ir desde los $91 - 147 m^3 Mg^{-1}$ (PV), $108 - 174 m^3 Mg^{-1}$ (OI) y $199 - 321 m^3 Mg^{-1}$ (año agrícola); la vid: $426 - 981 m^3 Mg^{-1}$; el trigo: $766 - 1,106 m^3 Mg^{-1}$; y el nogal $5,988 - 16,633 m^3 Mg^{-1}$, como lo muestra la Figura 7. Otros factores importantes que influyen en la HH de los cultivos son las condiciones edafológicas, climáticas y el manejo agronómico, esto explica la diferencia entre la HH de los cultivos de estudio y los resultados obtenidos por Mekonnen y Hoekstra (2010), directamente sobre el cultivo de sandía, trigo, vid y el nogal.

Tabla 11a. HH_{prod} [sandía, vid, trigo, nogal ($m^3 Mg^{-1}$)] Vs HH estimada según Mekonnen y Hoekstra (2010). En base a rendimiento promedio máximo y mínimo según el SIAP (2003-2015).

$Y (Mg^{-1} ha^{-1})$	$HH_{prod} (m^3 Mg^{-1})$	$HH_{prod*} (m^3 Mg^{-1})$	Diferencia ($m^3 Mg^{-1}$)
Sandía (PV)			
29.9	147	235	88
36.9	119		116
48.3	91		144

* HH_{prod} , según Mekonnen y Hoekstra (2010).

Tabla 11b. HH_{prod} [sandía, vid, trigo, nogal ($m^3 Mg^{-1}$)] Vs HH estimada según Mekonnen y Hoekstra (2010). En base a rendimiento promedio máximo y mínimo según el SIAP (2003-2015), continuación.

$Y (Mg^{-1} ha^{-1})$	$HH_{prod} (m^3 Mg^{-1})$	$HH_{prod*} (m^3 Mg^{-1})$	Diferencia ($m^3 Mg^{-1}$)
Sandía (OI)			
29.9	174	235	61
36.9	141		94
48.3	108		127
Sandía (año agrícola)			
29.9	321	235	86
36.9	260		25
48.3	199		36
Vid			
8.8	981	609	372
14.6	591		18
20.3	426		183
Trigo			
5.2	1,106	1,826	720
6.2	927		899
7.5	766		1,060
Nogal			
0.9	16,633	9,280	7,353
1.9	7,880		1,400
2.5	5,988		3,292

* HH_{prod} , según Mekonnen y Hoekstra (2010).

La Tabla 11 a y b muestra los resultados promedio para la sandía (año agrícola) y la vid, son muy parecidos a los de Mekonnen y Hoekstra. En el primer caso la diferencia es solo de 25 $m^3 Mg^{-1}$, mientras que en el segundo solo se difiere por 17 $m^3 Mg^{-1}$. Al hacer las comparaciones en sandía con respecto al ciclo del cultivo (PV) y (OI), la diferencias se hacen más grandes (144 $m^3 Mg^{-1}$ en el primer caso y 127 $m^3 Mg^{-1}$ en el segundo). Debido a lo anterior, se puede decir que Mekonnen y Hoekstra realizaron sus cálculos para la sandía con respecto al año agrícola y que los rendimientos promedio utilizados por los autores fueron semejantes a los observados; sin embargo las diferencias relevantes en el trigo y el nogal

(900 m³ Mg⁻¹ con respecto al primero y, 1,400 m³ Mg⁻¹ referente al segundo), pueden indicar que los autores difieren en los rendimientos promedio utilizados y que los mismos consideraron solo uno de los dos ciclos que presenta el cultivo de sandía. Esta situación, ocurre en cada uno de los elementos que conforman a la HH_{prod} , (Tabla 12).

Tabla 12. Elemento azul, verde y gris de la HH_{prod} , (m³ Mg⁻¹) Vs, HH de los elementos azul, verde y gris, calculados por Mekonnen y Hoekstra (2010).

Y	HH_{prod}											
	Azul	Azul*	Diferencia	Verde	Verde*	Diferencia	Gris	Gris*	Diferencia			
M ³ ha ⁻¹	-----m ³ Mg ⁻¹ -----											
Sandía (PV)												
29.9	22	15%	25	3	50	34%	147	97	75	51%	63	12
36.9	18			7	40			107	61			2
48.3	14			11	31			116	47			16
Sandía (OI)												
29.9	99	57%	25	74	---	147	62%	147	75	43%	63	12
36.9	80			55	---			147	61			2
48.3	61			36	---			147	47			16
Sandía (Año agrícola)												
29.9	121	38%	25	96	50	15%	147	97	151	47%	63	88
36.9	98			73	40			107	122			59
48.3	75			50	31			116	93			30
Vid												
8.8	626	64%	97	529	202	20%	425	223	153	16%	87	66
14.6	378			281	122			303	92			5
20.3	271			174	88			337	67			20
Trigo												
5.2	625	57%	342	283	---	1,277	70%	1,277	481	43%	207	274
6.2	524			182	---			1,277	403			196
7.5	433			91	---			1,277	333			126
Nogal												
0.9	11,978	72%	2,451	9,527	2,433	15%	5,293	2,860	2,222	13%	1,536	686
1.9	5,674			3,223	1,153			4,140	1,053			483
2.5	4,312			1,861	876			4,417	800			736
Global**												
***	13,350	70%	2,915	10,435	2,685	14%	7,142	4,457	3,007	16%	1,893	1,114
***	6,674			3,759	1,315			5,827	1,670			223
***	5,091			2,176	995			6,147	1,293			600

* HH_{prod} , (azul, verde y gris) según Mekonnen y Hoekstra (2010). **El global considera el año agrícola de la sandía, ***Rendimiento máximo mínimo y promedio para cada cultivo de estudio según el SIAP.

Como lo muestra la Tabla 12, las diferencias entre los resultados obtenidos y las estimaciones de Mekonnen y Hoekstra (2010), se aprecian en todos los elementos que conforman a la HH_{prod} . Estas diferencias, dependen del tipo de cultivo, los rendimientos y en su caso a los diferentes ciclos; pudiendo ir desde los 3 – 10,435 m³ Mg⁻¹ con respecto a la $HH_{prod,azul}$, de 91 – 6,147 m³ Mg⁻¹ referente a la $HH_{prod,verde}$, y, por último desde los 2 – 1,114 m³ Mg⁻¹ con respecto a la $HH_{prod,gris}$. Aunque dichas diferencias son muy radicales, la situación cambia al analizar cada uno de los elementos de la HH_{prod} , en forma global (en este caso solo considerando el año agrícola para la sandía) y considerando sus porcentajes. Así, se puede ver como los datos no difieren en la $HH_{prod,gris}$, (16% vs 16%) posiblemente porque la tasa de lixiviación y escorrentía del N utilizada en ambos estudios es la misma. Sin embargo en lo que se refiera los otros elementos, la diferencia es relevante: $HH_{prod,azul}$ (70% vs 24%) y la $HH_{prod,verde}$ (14% vs 60%).

Lo anterior, se debe principalmente a que la Costa de Hermosillo es considerada como una región árida en la cual se practica la agricultura de regadío y no de secano; por lo que el uso consuntivo total de agua en la agricultura [uso consuntivo de agua azul y de agua verde, representado por la evapotranspiración total y real del cultivo (Siebert y Döll, 2010)], es en su mayoría azul; ya que, aproximadamente, el 70% del agua azul es utilizada en la agricultura, siendo mayor su porcentaje en países áridos y semiáridos (Comprehensive Assessment of Water Management in Agricultura, 2007). Además, Mekonnen y Hoekstra utilizaron información generalizada a nivel global para sus cálculos; esto, conlleva a que el porcentaje entre el agua azul y verde se comporte a la inversa (mayor en agua verde y menor en agua azul); pues, de acuerdo con Köppen (1931), el clima árido y semiárido colectivamente representan el 26% de la superficie del mundo (12 y 14%). Por otra parte las estimaciones de HH de Mekonnen y Hoekstra (2010) son referenciales, pues los autores expresan en sus conclusiones que sus resultados se deben manejar con cuidado, ya que asumen una serie de supuestos; como el de estimar por medio de modelos, datos de relevancia como la (ET_c); mientras que en el caso de este estudio la (ET_c) fue medida.

4.1.1. Elemento azul

La Tabla 13 compara la demanda hídrica azul de los cultivos [D_{ha} ($HH_{prod,azul}$ $m^3 ha^{-1}$)] con la lámina de riego aplicada sobre mismos “irrigación y consumo de agua”; mostrando un manejo del sistema de riego deficiente en la mayoría de los casos, pues el volumen de agua aplicado se encuentra por encima de la D_{ha} de los cultivos, con excepción de la sandía en su ciclo OI.

Tabla 13. D_{ha} [$HH_{prod,azul}$ ($m^3 ha^{-1}$)] vs irrigación medida y el consumo de agua estimado para cada cultivo.

Y	$HH_{prod,azul}$	$HH_{prod,azul}$	Irrigación	Diferencia	Exceso	Consumo	Diferencia	Exceso
$Mg^{-1} ha^{-1}$	$m^3 Mg^{-1}$		$m^3 ha^{-1}$		%	$m^3 ha^{-1}$		%
Sandía (PV)								
36.9	18	664	1,661	997	1.5	4,516	3,852	6
Sandía (OI)								
36.9	80	2,952	3,170	218	0.07	4,516	1,564	0.5
Sandía (año agrícola)								
36.9	98	3,616	4,831	1,215	0.34	4,516	900	0.25
Vid								
14.6	378	5,519	11,045	5,526	1	12,500	6,981	1.26
Trigo								
6.2	524	3,249	6,000	2,751	0.85	6,500	3,251	1
Nogal								
1.9	5,674	1,0781	14,590	3,809	0.35	15,001	4,220	0.4
Global**								
*	6,674	23,165	36,466	13,301	0.57	38,517	15,352	0.66

*Rendimiento promedio de cada cultivo. **En el caso de sandía solo considera año agrícola. Irrigación según (Rodríguez *et al.*, 2010; Román *et al.*, 2017, datos no publicados en sandía 2016 y trigo 2008). Consumo según Salazar *et al.* (2012).

Como muestra el cuadro anterior (Tabla 13), la D_{ha} de los cultivos de estudio es superada por la lámina de riego aplicada por los productores. Dependiendo del tipo de cultivo y el ciclo (si es el caso), la lámina se excede de 218 – 5,226 $m^3 ha^{-1}$ considerando la irrigación medida pues; al considerar el consumo de agua estimado, los valores se incrementan de 900 – 6,981

$m^3 ha^{-1}$. El cultivo en el cual se desperdicia más agua azul, es la vid, seguida del trigo. En estos cultivos prácticamente la lámina aplicada es el doble de lo necesario (por cada hectárea irrigada, se puede irrigar otra más). En el caso del nogal, se puede irrigar poco más de media hectárea y, en el caso de la sandía (año agrícola), alrededor de un tercio de hectárea.

Considerando la superficie cosechada en la región de estudio, para cada uno de los cultivos más recientes según el SIAP (Tabla 8 a y b) y los resultados obtenidos en la Tabla 13; se puede decir que el volumen de agua que se expone a ser evaporada y contaminada debido a la aplicación de láminas de riego superiores a la D_{ha} de los cultivos: sandía $5.4 hm^3$ (año agrícola); vid $51.0 hm^3$; trigo $20.4 hm^3$; y nogal $23.5 hm^3$. Lo anterior es equivalente a un total de agua azul expuesta de $100.3 hm^3$; las Figuras 8 a y b lo muestran para los últimos 14 años de agricultura en la región.

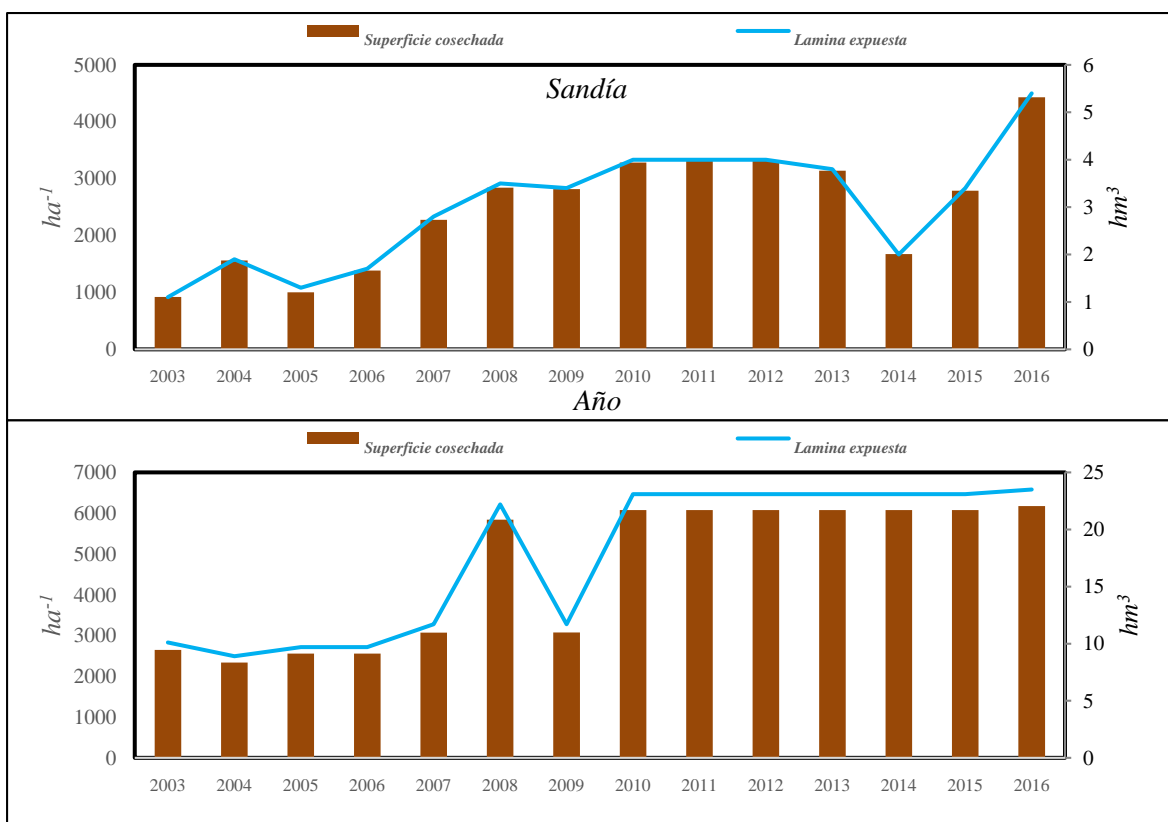


Figura 8a. Lámina expuesta global para los cultivos de sandía y nogal. En base a la superficie cosechada, la diferencia entre la D_{ha} , y la irrigación medida para cada cultivo (Rodríguez *et al.*, 2010, Román *et al.*, 2017, datos no publicados en sandía 2016 y trigo 2008).

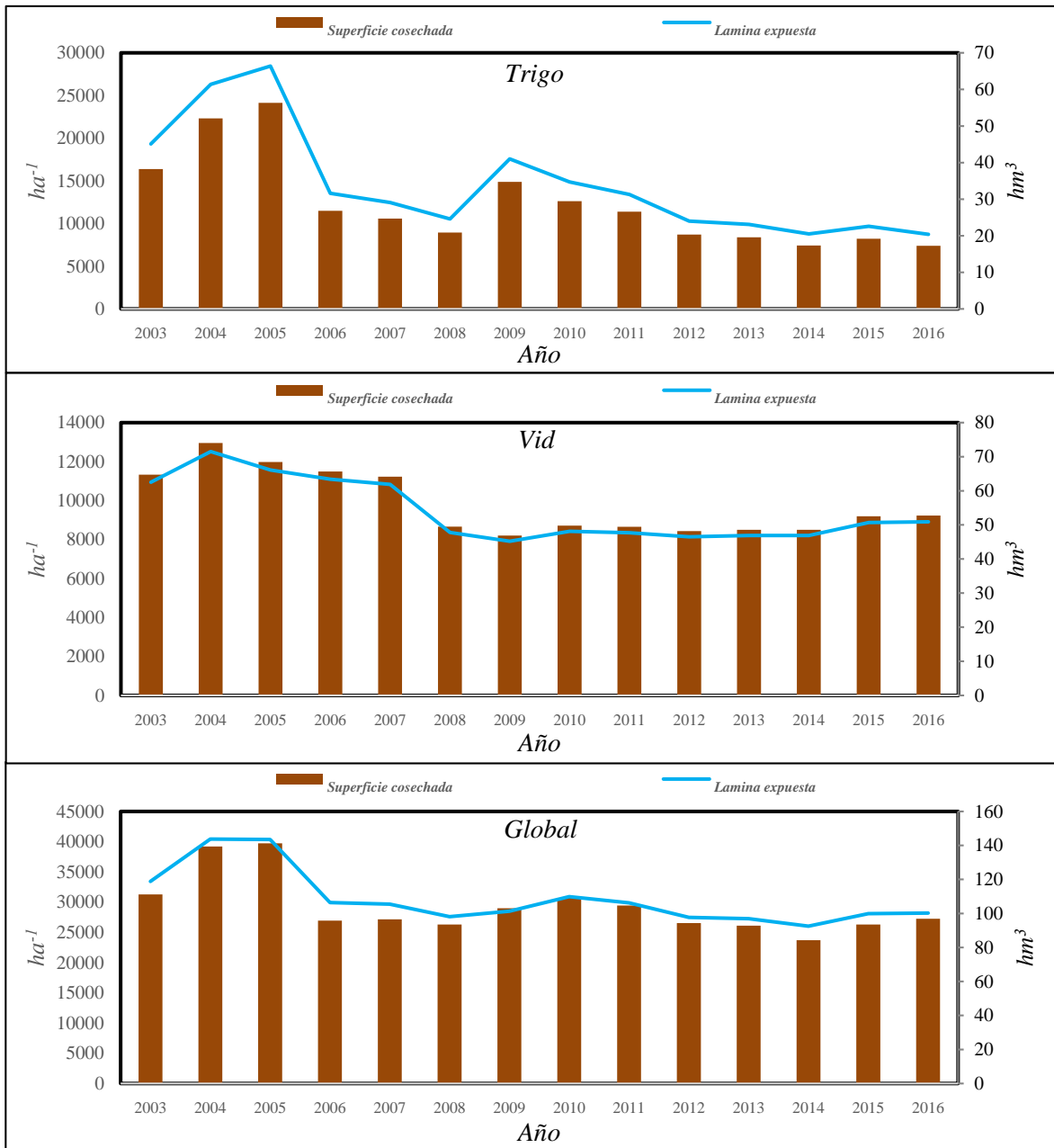


Figura 8b. Lamina expuesta global para los cultivos de trigo, vid y global. En base a la superficie cosechada, la diferencia entre la D_{ha} , y la irrigación medida para cada cultivo (Rodríguez *et al.*, 2010, Román *et al.*, 2017, datos no publicados en sandía 2016 y trigo 2008), continuación.

Como lo muestran las Figuras 8 a y b, cada cultivo expone anualmente un valor considerable de lámina de riego no aprovechada por las plantas. Según los datos, en promedio la sandía expone cada año 3 hm^3 , el nogal 18 hm^3 , el trigo 34 hm^3 y, la vid 54 hm^3 . Lo anterior es debido a que el trigo y la vid son los cultivos en los cuales se desperdicia más agua (Tabla

13), además de ser los cultivos con más superficie cosechada.

Es relevante el mencionar, que la suma de los promedios de los cultivos con respecto al agua azul expuesta es igual a 109 hm³. Este valor es equivalente en alrededor del 90% con respecto a la oferta hídrica disponible para la agricultura mencionada en la metodología de este estudio (121.6 hm³ anuales). Esta situación, expone un crítico manejo de aguas azules provenientes del acuífero Costa de Hermosillo.

4.1.2. Elemento verde

Según la Figura 5, las precipitaciones en la Costa de Hermosillo pueden llegar a ser considerables, de tal forma que la $HH_{prod,verde}$ llega a cubrir significativamente parte de la demanda hídrica de los cultivos [$D_h (HH_{prod,azul} + HH_{prod,verde}) \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$]. Los datos analizados muestran que se utiliza hasta un 70 % en sandía (PV), o 29 % (año agrícola) en la hortaliza y, de un 17 al 24 % en frutales (Tabla 14).

Tabla 14. Aportación de agua verde en los cultivos de sandía, vid y nogal. Irrigación por (Rodríguez et al., 2010; Román et al., 2017, datos no publicados en sandía 2016 y trigo 2008).

Cultivo	$D_h (HH_{prod,azul} + HH_{prod,verde})$ -----m ³ Mg ⁻¹ -----	Aportación de la $HH_{prod,verde}$		$D_{ha} (D_h - D_v)$	Irrigación	Diferencia entre D_{ha} e irrigación	Agua verde ignorada	
			%					-----m ³ ha ⁻¹ -----
Sandía	PV	58	40	70	664	1,661	997	1,476
	Año agrícola	138	40	29	3,316	4,831	1,515	1,476
Vid	499	122	24	5,519	11,045	5,526	1,781	
Nogal	6827	1,153	17	10,781	14,590	3,809	2,191	

Según la Tabla 14, La $HH_{prod,verde}$, puede cubrir desde poco más de una cuarta parte de la D_h de los cultivos, hasta casi tres cuartas partes dependiendo del cultivo. Aun con lo anterior, la $HH_{prod,verde}$ es ignorada por el agricultor al observar que la irrigación supera la D_{ha} inclusive cuando hay una aportación de agua verde considerable. Por otra parte, a pesar de que en las zonas áridas pueden ocurrir periodos de sequía, el agua verde es ignorada como se muestra en la Figura 9.

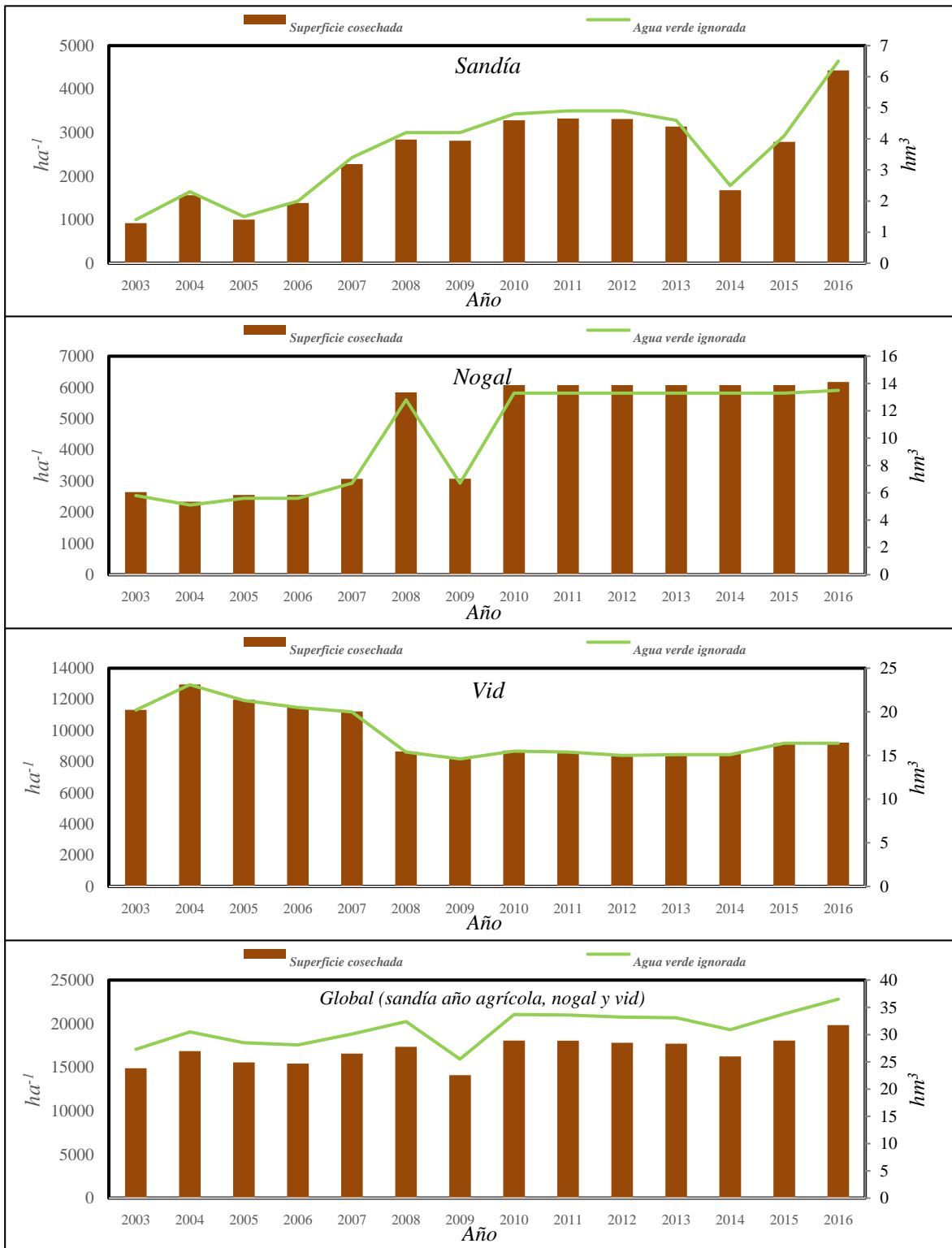


Figura 9. Agua verde ignorada. En base a datos en Tabla 14 y superficie cosechada en Tabla 8 a y b.

Como se muestra en la figura anterior, el agua verde ignorada puede ser de hasta 31 hm³ anuales. Esta cantidad representa el 25% de la oferta hídrica disponible para la agricultura. Por lo que el aprovechamiento de agua verde en la Costa de Hermosillo es deficiente.

4.1.3. Elemento gris

La $HH_{prod,gris}$ ocupa alrededor del 15 % en vid y nogal, mientras que en el caso de la sandía y el trigo alrededor del 45% (Figura 7). A pesar de que para el cereal y la hortaliza el porcentaje es relativamente alto, inclusive para los frutales, se refleja mayor al considerar un porcentaje más alto como fracción de lixiviación y escorrentía (α), o bien tomando en cuenta otro tipo de pérdidas de N como la volatilización y desnitrificación.

Mekonnen y Hoekstra (2010), en sus cálculos de HH, utilizan una (α) del 10% en base a Chapagain *et al.* (2006). Sin embargo, según Janssen (1998), los fertilizantes nitrogenados tienen baja eficiencia (15 a 20%), debido a pérdidas principalmente por lixiviación, volatilización y desnitrificación.

A pesar de que por medio de la lixiviación los acuíferos son contaminados, la volatilización y desnitrificación también se presentan para contaminar cuerpos de agua pues, según Lee y Weber (1982), dichos fenómenos exponen el N hacia la atmósfera donde por medio reacciones químicas se da paso a la formación de la lluvia ácida. Por lo que es importante considerar que no solo el 10% de la dosis de N (AR , kg ha⁻¹) puede contaminar cuerpos de agua, sino que este porcentaje puede alcanzar hasta el 85%.

Según Janssen (1998), en la agricultura tradicional la eficiencia en el uso del N en el mejor de los casos es del 50% cuando el manejo del fertilizante se lleva a cabo adecuadamente, concordando con Barber (1984) y Benjamín *et al.* (1998). A pesar de que no se tiene información precisa sobre el UEN en la Costa de Hermosillo, el tipo de agricultura que se maneja en la región se considera tradicional aun cuando en la mayoría de los casos se cuenta con riego por goteo (excepto el trigo) y de que el acolchado es común en las hortalizas, el

sistema se basa en aplicar cierta lámina de riego; pero no son comunes los análisis de suelo, ni tampoco los análisis de foliares y de recuperación de N.

Por lo anterior, la Tabla 15 muestra proyecciones de la $HH_{prod,gris}$ basados en el uso eficiente del nitrógeno (UEN); pues este, brinda información más precisa enfocada a la asimilación del elemento por las plantas, considerando así el porcentaje no asimilado como posible contaminante de cuerpos de agua.

Tabla 15. Proyecciones de $HH_{prod,gris}$, con respecto al UEN.

Cultivo		Y	$HH_{prod,gris}$		$HH_{prod,gris}$ [*]		$HH_{prod,gris}$ ^{**}		$HH_{prod,gris}$ ^{***}		$HH_{prod,gris}$ ^{****}	
			Mg ⁻¹ ha ⁻¹	m ³ Mg ⁻¹	%	m ³ Mg ⁻¹	%	m ³ Mg ⁻¹	%	m ³ Mg ⁻¹	%	m ³ Mg ⁻¹
Sandía	(PV)	36.9	61	51	122	68	183	76	244	84	305	84
	(OI)		61	43	122	60	183	70	244	79	305	79
	Año agrícola		122	47	244	71	366	79	488	83	610	86
Vid		14.6	92	16	185	27	277	36	370	43	462	48
Trigo		6.2	403	43	806	61	1,210	70	1,613	75	2016	79
Nogal		1.9	1053	13	2,105	24	3,158	32	4,211	38	5,263	44

*(UEN = 80%), **(UEN = 70%), ***(UEN = 60%), *****(UEN = 50%).

La $HH_{prod,gris}$ aumenta o disminuye con respecto al UEN, por lo que se puede apreciar como el porcentaje de la $HH_{prod,gris}$ pasa a ocupar desde el 13% hasta el 86% de la $HH_{prod,gris}$, dependiendo del tipo del cultivo (Tabla 15). De tal manera, que esta se convierte en el principal consumo de agua dulce sobre los cultivos, ocupando conforme al tipo del cultivo, desde 61 m³ Mg⁻¹ hasta 5,263 m³ Mg⁻¹.

Entre más grande sea la huella $HH_{prod,gris}$, mayor es la concentración del contaminante (N) a degradar, es decir, con el incremento de la $HH_{prod,gris}$, el contaminante a degradar se aleja más del valor utilizado como concentración máxima permitirle (C_{max}) en un cuerpo de agua (10 mg N L⁻¹). En la Figura 10, se muestra la cantidad de hm³ de agua dulce necesarios para degradar los niveles de nitrógeno hasta al C_{max} con respecto a la superficie cosechada de cada cultivo.

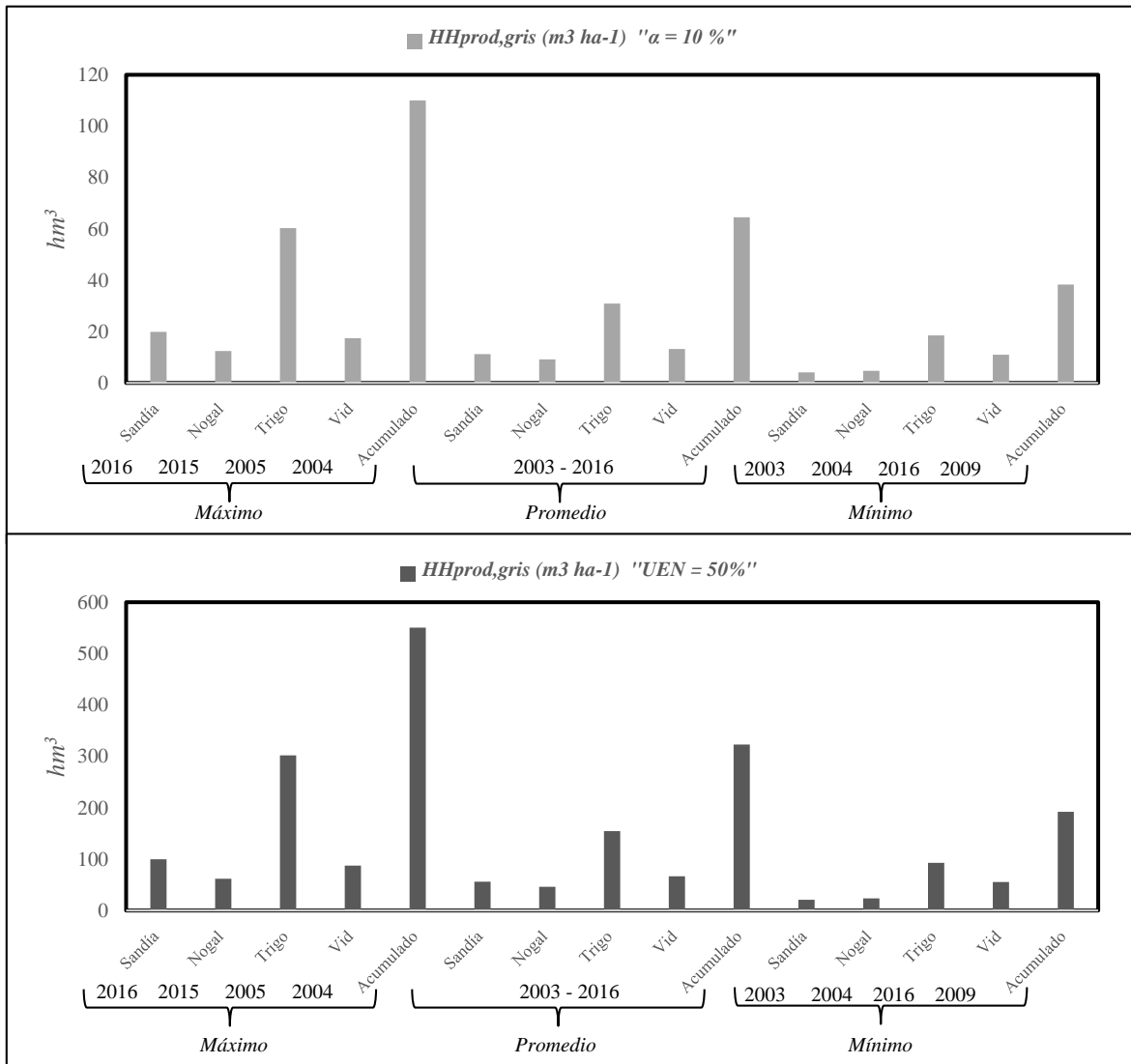


Figura 10. $HH_{prod,gris}$, expresión en hm^3 por cultivo. En base a los resultados en Tabla 15 y la superficie cosechada para cada cultivo según el SIAP. Tasa de lixiviación y escorrentía (α) según Chapagain *et al.*, (2006). Uso eficiente del nitrógeno (UEN) según Janssen (1998).

En la $m^3 h^{-1}$ figura anterior, se visualiza como la $HH_{prod,gris}$ viene a convertirse en un grave problema para la unidad hidrogeológica de la región Costa de Hermosillo. Pues con respecto a la superficie cosechada promedio en cada cultivo, se necesitan alrededor de entre 65 y 323 hm^3 (α y UEN), para degradar el N aplicado hasta $10 mg N L^{-1}$ (C_{max}); cantidad que representa aproximadamente el 53% de la Oh en el primer caso y que supera a la misma 2.7 veces en el segundo. Referente al máximo de superficie cosechada que se ha alcanzado en los últimos

14 años los valores representan el 90% de la *Oh* en el primer caso y esta es superada 4.5 veces en el segundo.

Estos resultados indican, que la cuenca hidrogeológica de la Costa de Hermosillo no puede degradar los compuestos nitrogenados ya que no hay recursos hídricos para hacerlo. Esta situación ha conllevado, a que en determinados sitios se acumulen iones de nitratos y nitritos; así lo expone Modelska *et al.* (2006), al mencionar que las concentraciones de compuestos de nitrógeno se han incrementado en el acuífero, principalmente debido a la actividad antropogénica sobre el ciclo natural de la química del agua, teniendo repercusiones importantes como riesgos para la salud humana. Los mismos autores mencionan tres jerarquías de concentraciones de iones de nitrato y nitrito, sobre tres sitios distintos: 1) 1.2 – 99.94 mg NO₃ L⁻¹ y 5.99 – 12.5 mg NO₂ L⁻¹ en el agua subterránea y superficial de la zona de recarga; 2) 6.35 – 158.77 mg NO₃ L⁻¹ y 0.11 – 10.47 mg NO₂ L⁻¹ en el agua subterránea de las áreas agrícolas donde se tiene el riego intensivo; 3) 0.00 – 114.49 mg NO₃ L⁻¹ y 13.93 – 22.67 mg NO₂ L⁻¹ en el agua subterránea donde existe el agua salobre producto de la intrusión marina.

En un estudio previo realizado por Steinch *et al.* (1998), se encontraron concentraciones de hasta 17 mg L⁻¹; esto evidencia que en pocos años esta cifra ha aumentado considerablemente y que en los próximos años se le pudiera considerar como un problema grave por la contaminación por N en el acuífero de la costa de Hermosillo, esto considerando que la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (USEPA) por sus siglas en inglés, establece el límite de las concentraciones en 10 mg N L⁻¹.

4.2. Fase III. Análisis de sustentabilidad de la huella hídrica azul

La Figura 11, muestra como el acuífero de la Costa de Hermosillo puede sustentar la *Dha* ($HH_{prod,azul}$ m³ ha⁻¹) de los cultivos estudiados de forma individual sin embargo, la *Dha* acumulada expresa lo contrario al visualizar hotspots constantes año con año.

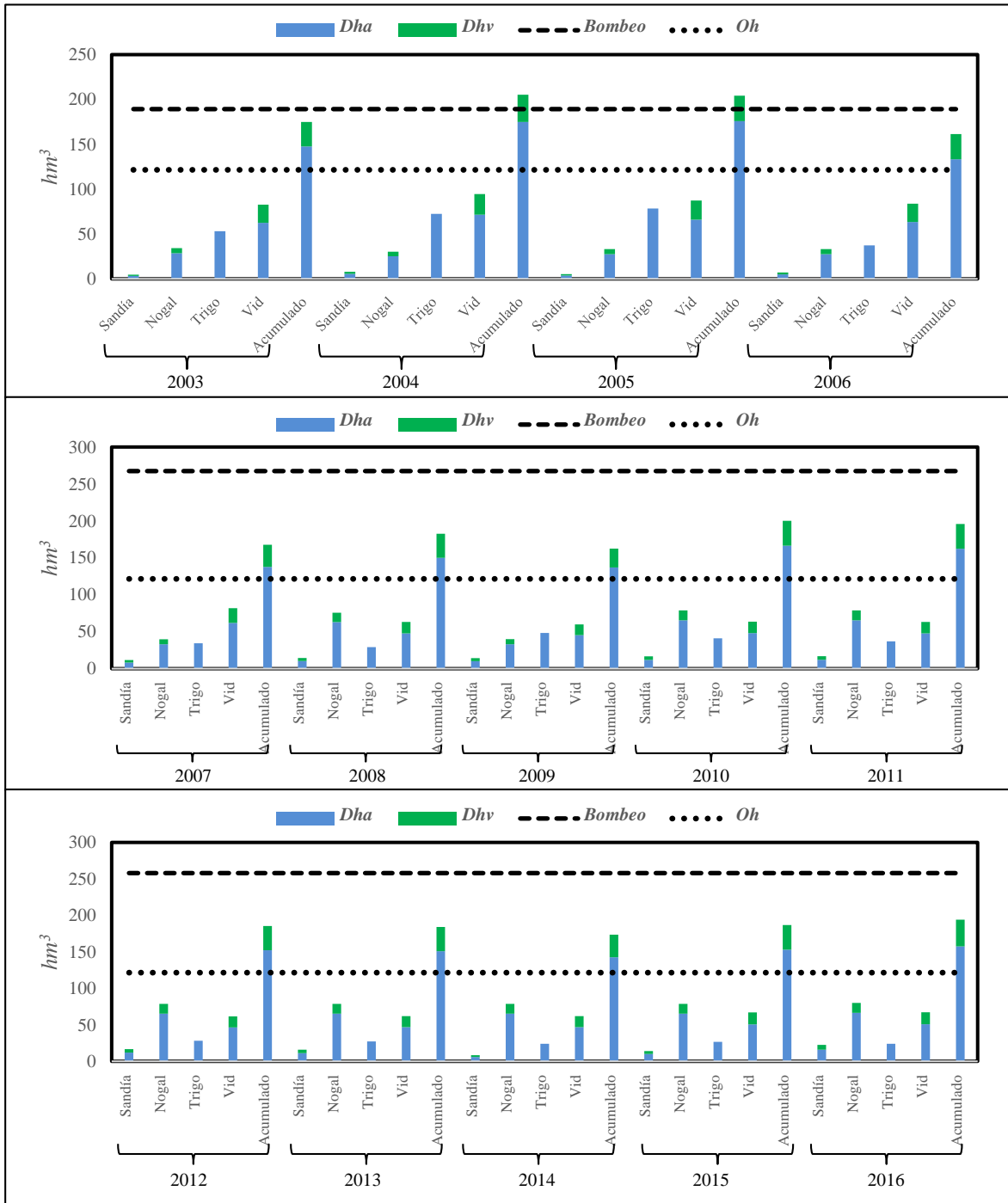


Figura 11. Análisis de sustentabilidad ambiental de la $HH_{prod,azul}$ (a). En relación a la oferta hídrica (Oh) y la demanda hídrica [D_h ($HH_{prod,azul} + HH_{prod,verde}$) $m^3 ha^{-1}$] y, comparación con el bombeo. D_h con base a la superficie cosechada y el rendimiento de los cultivos según el SIAP 2003-2016 y en relación a al HH promedio calculada para cada año en específico como se describe en la metodología. Bombeo con respecto al promedio entre el consumo de agua de los cultivos según (Salazar *et al.*, 2012), la irrigación medida para cada cultivo [nogal y vid (Rodríguez *et al.*, 2010), sandía (Román *et al.*, 2017), y datos no publicados en sandía 2016 y trigo 2008)] y superficie según el SIAP (tabla 7). La demanda hídrica verde (D_{hv}), solo representa hasta dónde puede llegar la demanda hídrica azul (D_{ha}) en caso de que no se presente lluvia.

Conforme a los datos de la Figura 11, en los últimos 14 años (2003 – 2016), los cultivos de estudio en conjunto han demandado en promedio alrededor de 153 hm³ de agua azul proveniente del acuífero regional (31.4 hm³ por encima de su oferta hídrica anual). Mientras que el bombeo promedio es igual a 273 hm³ (151.4 hm³ sobre la oferta hídrica anual y 120 hm³ por encima de la demanda hídrica azul promedio). El cultivo que más ha demandado el recurso hídrico azul es la vid, pues con un promedio de 9,790 ha cosechadas (Tabla 8b), ha requerido de 54 hm³ anuales. Consumo que representan el 35% de la demanda hídrica total y el 43% de la oferta hídrica anual. En segundo lugar se encuentra el nogal con un promedio de 4,622 ha cosechadas (Tabla 8b), que han requerido de 50 hm³ anuales equivalentes al 33% de la demanda hídrica total y el 40% de la oferta hídrica anual. El trigo representa el tercer lugar, consumiendo el 26% de la demanda hídrica total y el 32% de la oferta hídrica anual, con una superficie promedio cosechada de 11,827 ha (Tabla 8b). Por último la sandía, con una superficie cosechada promedio de 2,485 ha (Tabla 8a), representa el 6% de la demanda hídrica total y el 7% de la oferta hídrica anual. La Figura 12, visualiza el comportamiento enfocando los valores máximos y mínimos visualizados en Figura 11.

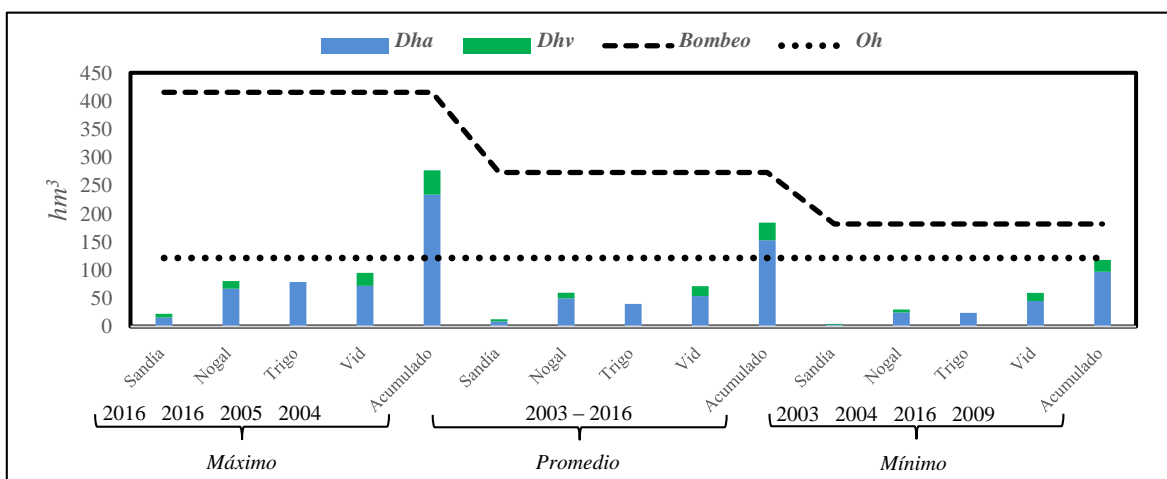


Figura 12. Análisis de sustentabilidad ambiental de la $HH_{prod,azul}$ (b). En relación a la oferta hídrica (Oh) y la demanda hídrica [D_h ($HH_{prod,azul} + HH_{prod,verde}$) $m^3 ha^{-1}$] máxima, promedio y mínima; y, comparación con el bombeo máximo, promedio y mínimo. D_h con base a la superficie cosechada y el rendimiento de los cultivos según el SIAP (tabla 8) y en relación a al HH promedio calculada para cada año en específico como se describe en la metodología. Bombeo con respecto al promedio al consumo de agua de los cultivos según (Salazar *et al.*, 2012), la irrigación medida para cada cultivo [nogal y vid (Rodríguez *et al.*, 2010), sandía (Román *et al.*, 2017), y datos no publicados en sandía 2016 y trigo 2008)] y superficie según el SIAP (tabla 7). La demanda hídrica verde (D_{hv}), solo representa hasta dónde puede llegar la demanda hídrica azul (D_{ha}) en caso de que no se presente lluvia.

Como se aprecia en la Figura 12, el acuífero de la Costa de Hermosillo apenas puede sostener la *Dha* con respecto al mínimo de superficie cosechada en los últimos 14 años (921 ha de sandía, 2,338 ha de nogal, 7,409 de trigo y 8,202 de vid); inclusive en caso de sequía, ya que la *Dha* apenas alcanzaría el límite de la oferta hídrica. Es decir el acuífero solo puede sostener una demanda hídrica total de los cultivos igual a 121.6 hm³. No obstante con respecto al máximo de superficie, la oferta es superada por la demanda en aproximadamente 112.4 hm³.

Por otra parte, en el caso del máximo de superficie, el bombeo supera la oferta hídrica por 294 hm³ y, supera a la demanda en alrededor de 182 hm³. Referente a la superficie mínima el bombeo supera la oferta por 60.2 hm³ y la demanda por 85 hm³. Esto ocurre debido a que el volumen concesionado e inscrito en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) es igual a 431 hm³ (CONAGUA, 2015); por lo que a los agricultores, se les da la libertad de desperdiciar agua azul y desaprovechar aguas verdes. Por esta razón autores como Salazar *et al.* (2012), han expresado que la sustentabilidad en el área hidrogeológica está perdida, lo que es verídico pues según UNISON (2001), la composición isotópica del acuífero revela no solo agua de origen meteórico, sino que también agua fósil con edad de 26,000 a 30,000 años.

V. CONCLUSIONES

5.1. Fase IV. Respuestas frente a resultados

La actividad agrícola con los tipos de cultivos que se producen en la región agrícola de la Costa de Hermosillo, no puede ser sustentada por el acuífero de la región y el agotamiento del almacenamiento del acuífero así lo ha demostrado. En los últimos 14 años han persistido los hotspot ambientales sin excepción, por lo que se está minando el acuífero con su uso desde hace más de 70 años.

El sistema de producción agrícola, se ha enfocado en los factores económico-sociales, dejando de lado el factor ambiental principalmente en lo que respecta al manejo de los recursos hídricos; pues, el agua verde no es aprovechada, el agua gris es ignorada y, el agua azul se desperdicia al ser expuesta sin necesidad a la evaporación y/o contaminación.

El cultivo con mayor HH_{prod} en relación a la demanda hídrica para sostener al mismo (agua verde y agua azul) y a los rendimientos promedio ya mencionados; es el nogal pecanero con $6,827 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$, seguido del trigo con $524 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$, la vid con $500 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$ y, la sandía con $138 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$. Sin embargo la medida básica en la agricultura es la hectárea y desde este punto de vista la secuencia de demanda cambia a: nogal = $12,971 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, vid = $(7,300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1})$, sandía = $5,092 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y trigo = $(3,249 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1})$. No obstante considerando la superficie actual (2016) cosechada para cada cultivo, la demanda principal (hm^3) la tiene el; nogal con 80 hm^3 , seguido de la vid con 67 hm^3 , el trigo con 24 hm^3 y, la sandía con 23 hm^3 .

Para manejar de forma sustentable el acuífero regional, es necesario tomar en cuenta los puntos anteriores; ya que, a pesar de que obteniendo los mejores rendimientos en los cultivos la HH_{prod} , disminuye, dicha estrategia es ineficaz debido a la actual superficie cosechada y a su posible aumento. Por lo cual, aunque la sustentabilidad del acuífero esta pérdida, aún se está a tiempo de crear un programa agrícola sustentable que funcione para el agua subterránea disponible y es urgente explotarla conforme a la demanda hídrica de los cultivos y la oferta

hídrica que recibe el acuífero regional; es decir que el sistema sea sustentado lo más posible por la recarga de origen meteórico.

Es importante cambiar el enfoque económico social que opera en la región, incluyendo en el uso el factor ambiental. Según Zeng *et al.* (2012) y Liu *et al.* (2009), la huella hídrica también es conocida como el contenido de agua virtual de un cultivo. Es decir, por medio de la actividad agrícola virtualmente se exportan millones de metros cúbicos de agua subterránea; situación que pone en riesgo los recursos hídricos para las generaciones futuras; en una región en donde la verdadera riqueza de una zona árida como la Costa de Hermosillo, es el agua dulce.

5.1.1. Recomendaciones

A pesar de que los resultados obtenidos para cada uno de los elementos que conforman la huella hídrica de la producción en los cultivos de estudio son contundentes; existe incertidumbre sobre el manejo de los recursos hídricos en cada uno de los campos agrícolas de la región. Es decir este estudio no da por hecho que cada eslabón que conforma el sistema de producción agrícola de la Costa de Hermosillo se comporte de manera similar en lo que respecta al manejo de los fertilizantes nitrogenados (relación con $HH_{prod,gris}$), el manejo de sistemas de riego (relación $HH_{prod,azul}$), o mediciones de la precipitación efectiva (relación $HH_{prod,verde}$). Tampoco se da por hecho, que la precipitación en la región se comporta de forma constante sino que más bien se trata de lo que este factor puede significar en esta región árida. Por dichas razones se da pauta a las siguientes recomendaciones básicas:

- Desarrollar e imponer un programa enfocado a él cuidado y uso (eficiente, equitativo y sostenible) del recurso hídrico regional, basado en la huella hídrica como herramienta de sustentabilidad hidrogeológica, con el propósito de preservar el líquido vital generación tras generación.
- Instalar estaciones meteorológicas sobre el área de influencia de cada tipo de cultivo.
- Medir la evapotranspiración real de los cultivos.
- Medir la precipitación efectiva.

- Aplicar láminas de riego conforme a la evapotranspiración real o uso consuntivo de los cultivos.
- Presentar información científica que avale la tasa de lixiviación y escorrentía y/o el uso eficiente del nitrógeno sobre los cultivos (de ser necesario aplicar este punto con otros agroquímicos).
- Aplicar fertilizantes nitrogenados con respecto al uso eficiente del nitrógeno (de ser necesario aplicar este punto con otros agroquímicos).
- Realizar análisis de las fuentes de agua para determinar las concentraciones de nitrógeno (de ser necesario aplicar este punto con otros agroquímicos).

Las recomendaciones anteriores deben de estar sujetas a la ingeniería agronómica, es decir para el resultado positivo de las mismas, es necesario llevar acabo las buenas prácticas agrícolas y de manejo que se necesitan en todo sistema de producción agrícola; como por ejemplo la rotación de cultivo, descanso del suelo y aplicaciones de composta; ya que la ausencia de estas provoca el desgaste, infertilidad e impermeabilidad de los suelos, aumentándose de esta forma la escorrentía, evaporación, la lámina de riego a aplicar y el aumento de la dosis de los fertilizantes.

Actualmente existe un programa de inocuidad agroalimentaria el cual es exigido a los productores agrícolas, principalmente en lo que respecta a sus productos de exportación. Este tiene como propósito asegurar que los productos agrícolas se mantengan libres de contaminantes físicos, químicos o microbiológicos. Dicho programa es tan importante que si no se cumple, las exportaciones se pueden ver imposibilitadas para continuar, provocando grandes pérdidas económicas a los productores. No obstante no existe ningún programa en la región que obligue y fomente por medio de una serie de acciones estratégicas para preservar los recursos hídricos, aun cuando hay pruebas contundentes de su rápido agotamiento, y deterioro, además de que principalmente por ellos es posible el producir alimentos.

5.1.2. Investigación futura

Esta tesis solo es pionera del uso de la huella hídrica como herramienta de sustentabilidad hidrogeológica y abre las puertas a innumerable cantidad de trabajos científicos que se pueden aplicar al acuífero de la región; como pueden ser: el impacto en el sector público-urbano, industrial, ecológico o bien continuar con el enfoque agrícola.

5.1.2.1. Estudios agrícolas con impacto hidrogeológico

Derivado de este estudio, se podría proponer una serie de estudios relacionados con la huella hídrica de la actividad agrícola y su impacto sobre la unidad hidrogeológica de la región.

- *Cálculo y análisis de la huella hídrica del cultivo de naranja, calabaza y garbanzo.* El objetivo de este estudio tendría un enfoque similar al presentado en esta tesis, con la relevancia de que con dichos cultivos se completaría la lista de los cultivos más importantes actualmente en explotación de la región.
- *Análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica sobre la producción agrícola y su impacto en la cuenca hidrogeológica de la región.* Este estudio evaluaría la sustentabilidad de cada elemento que conforman a la huella hídrica (verde, azul y gris), identificando hotspot ambientales en cada uno de ellos.
- *Cultivos agrícolas sustentables para la región hidrogeológica de la Costa de Hermosillo.* Por medio de este estudio se pueden identificar los cultivos adecuados para su explotación sustentable, considerando cada elemento de la sustentabilidad (económico, social y ambiental) y en lo que respecta al factor ambiental, basado en la huella hídrica de los cultivos. Pudiendo determinar por medio de un análisis de sustentabilidad, la superficie a sembrar que beneficie económico, social y ambientalmente a la región de la Costa de Hermosillo.
- *El impacto del cambio climático y/o variabilidad climática sobre la huella hídrica agrícola.* Estudios recientes indican y predicen las alteraciones en las variables del

clima; actualmente está próximo a concluir un estudio sobre este tema en el cual se encontró que las estaciones climáticas (primavera, verano, otoño, invierno) tienden a ser más calientes, incrementando así la evapotranspiración potencial y por consiguiente, la demanda hídrica de los cultivos.

- *La huella hídrica de los principales fertilizantes utilizados en la producción agrícola (nitrógeno, fósforo y potasio).* Según la literatura las plantas requieren de 17 elementos esenciales (macro elementos y micro elementos), el N, P y K son los principales macro elementos necesarios para el desarrollo de los cultivos.
- *Huella hídrica de la servidumbre agrícola.* Para tener el conocimiento de agua dulce necesaria por la mano de obra.
- *Volumen de agua verde necesario para degradar los agroquímicos sobre la planicie agrícola de la región.* Entiéndase por agroquímico, todo aquel producto químico-orgánico o químico-sintético utilizado en la agricultura. La actividad agrícola en la Costa de Hermosillo data de más de 7 décadas, por lo cual este estudio podría concientizar con respecto a los años necesarios para degradar de forma natural los compuestos químicos aplicados. El estudio también puede llamarse: *Huella hídrica gris, generada por la aplicación de agroquímicos en la región.*

La lista puede seguir y más aún, utilizando otra metodología para el cálculo de la huella hídrica, como puede ser, la norma ISO 14046 que actualmente está publicada y sus cálculos están basados en el análisis de ciclo de vida (ACV) de los productos. Es una herramienta metodológica que sirve para medir el impacto ambiental de un producto, proceso o sistema a lo largo de todo su ciclo de vida (desde que se obtienen las materias primas hasta su fin de vida). Se basa en la recopilación y análisis de las entradas y salidas del sistema para obtener unos resultados que muestren sus impactos ambientales potenciales, con el objetivo de poder determinar estrategias para su reducción.

VI. REFERENCIAS CITADAS

- Agenda Técnica Agrícola de Sonora. 2010. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación ISBN volumen: 978-607-7668-16-9 ISBN obra completa: 978-607-7668-39-8.
- Aldaya, M. M., Allan, J. A. and Hoekstra, A. Y. (2010a) 'Strategic importance of green water in international crop trade', *Ecological Economics*, vol 69, no 4, pp887–894.
- Aldaya, M. M., Martínez-Santos, P., & Llamas, M. R. (2009). Incorporating the Water Footprint and Virtual Water into Policy: Reflections from the Mancha Occidental Region, Spain. *Water Resources Management*, 24(5), 941–958.
- Aldaya, M.M. and Hoekstra, A.Y. (2010) *The water needed for Italians to eat pasta and pizza*. *Agricultural Systems*, 103 (6). pp. 351-360.
- Allan, J.A., 1998. Virtual water: a strategic resource, global solutions to regional deficits.
- Andrews, Robert. 1981. Salt-water Intrusion in the Costa de Hermosillo, Mexico: A Numerical Analysis of Water Management Proposals. *Ground Water* 19 (6): 635-647.
- Arevalo D., Lozano J., & Sabogal. J. (2011). Estudio nacional de huella hídrica Colombia, sector agrícola. *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*. 7:101-127
- Arévalo Uribe D. 2013. Evaluación de la Huella hídrica en la cuenca del Río Porce. Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia -CTA-.
- Ariel Construcciones S. A. 1968. Estudio hidrogeológico completo de los acuíferos de la Costa de Hermosillo, Sonora, México. Hermosillo.
- Arreguín-Cortés, F López-Pérez, M., Marengo-Mogollón, H. & Tejeda-González, C. Agua virtual en México, *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XXII, no. 4, Octubre-Diciembre, 2007, pp. <http://www.youtube.com/watch?v=yAzoZoM2pBY>
- Barber, S. A. 1984. Soil nutrient bioavailability. A mechanistic approach. John Wiley and Sons. New York, NY, USA.

- Benjamin, J. G., Porter, L. K. Porter, Duke, H. R. Duke., Ahuja, L. R. Ahuja, and G. Butters. 1998. Nitrogen movement with furrow irrigation method and fertilizer band placement. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 1103-1108.
- Bittelli, M. 2010. Measuring Soil Water Potential for Water Management in Agriculture: A Review. *Sustainability*, (2): 1226-1251.
- Builes, E. (2013). *Cuantificación y análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica agrícola y pecuaria de la cuenca del río Porce* (Doctoral dissertation, Tesis Mag. Sc. Medellín, Colombia, Universidad Nacional de Colombia).
- Bulsink, F., Hoekstra, A. Y., & Booij, M. J. (2009). The water footprint of Indonesian provinces related to the consumption of crop products.
- Bulsink, F, Hoekstra A.Y., & Booij, M. J. 2009. The Water Footprint of Indonesian provinces related to the consumption of crops products. Value of Water Research Report Series No. 37, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.
- Cabanillas, Cecilia. 1985. Determinación de patrones óptimos de cultivos para la región agrícola de la Costa de Hermosillo. Tesis de ingeniero industrial administrador, Universidad de Sonora.
- Calle, E. D., Rivera, H. G., Sarmiento, R. V., & Moreno, P. (2008). Relaciones demanda-oferta de agua y el índice de escasez de agua como herramientas de evaluación del recurso hídrico colombiano. *Rev. Acad. Colomb. Ciencia*, 32(123), 195-212.
- Cárdenas, Efraín. 1981. Determinación de un patrón de cultivos óptimo que satisfaga la disponibilidad de agua existente en la Costa de Hermosillo. Tesis de maestría en administración, Universidad de Sonora.
- Castillo, J. 2003. Aplicación de diferentes métodos para estudiar la intrusión salina en acuíferos de Sonora, México. En López Geta et al. 2003. Tecnología de la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: países mediterráneos. IGME. Madrid. 20 pp.
- Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. 2004. Water footprints of nations Value of Water Research Report Series No. 16, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.
- Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. 2004. Water footprints of nations Value of Water Research Report Series No. 16, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.

- Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y., Savenije, H. H. G., and Gautam, R. 2006. The water footprint of cotton consumption: an assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries, *Ecol. Econ.*, 60(1), 186–203.
- Chapagain, A., & Orr, S. (2008). UK Water Footprint: the impact of the UK's food and fibre consumption on global water resources Volume two: appendices. *WWF-UK, Godalming*, 31-33.
- Chapagain, A.K., & Hoekstra, A.Y. 2007. The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands. *Ecological Economics* 64 (1), 109–118.
- Chávez, R., F. Lara y R. Sención (2006). “El agua subterránea en México: condición actual y retos para un manejo sostenible”, *Boletín Geológico y Minero*, 117 (1): 115-126.
- Clarke, R. y King, J. 2004. *The Water Atlas*. The New Press.
- CNA. 1995. Programa Estatal Hidráulico. Gerencia Estatal en Sonora. México.
- CNA. 1996. *Estudio de factibilidad en el Distrito de Riego No 051, Costa de Hermosillo*. Hermosillo.
- Comunatic, S. A. 1986. Proyecto ejecutivo para el aprovechamiento integral de la presa Abelardo L. Rodríguez y el ordenamiento ecológico del distrito de riego Costa de Hermosillo. Hermosillo.
- CONAGUA, 2015. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Costa de Hermosillo (2619), Estado de Sonora. Publicada en el Diario Oficial de la Federación. 20 de abril 2015. 16 pp.
- CONAGUA, 2015b). Acuíferos en Sonora. http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/104292/MAPA_Sonora_.pdf
- http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/104292/MAPA_Sonora_.pdf
- CONAGUA, 2017. Acuíferos de Sonora. <http://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/sonora-74834>. Consultado 16 abril 2017.
- CONAGUA. 2006. Estadísticas del agua en México. Comisión Nacional del AGUA-SEMARNAT, México DF. 201 pp.
- CONAGUA. 2010a. *Estadísticas del agua en México*, edición 2010. México: CONAGUA.

- CONAGUA. 2010b. Disponibilidad de agua subterránea. Estado de Sonora. <http://www.conagua.gob.mx/disponibilidad.aspx?id=DisponibilidadporacuÃfero|AguasubterrÃn|ea|0|6|2|0|0|0> (11 de abril de 2011).
- CONAGUA. 2013. Estadísticas del agua en México. Comisión Nacional del AGUA-SEMARNAT, México DF. 176 pp.
- CONAGUA. 2016b. Subdirección General Técnica.
- CONAGUA., Organismo de Cuenca Noroeste y Colegio de Postgraduados. 2007. *Plan director para la modernización integral del riego del distrito de riego 051, Costa de Hermosillo, Sonora*. México: Conagua y Colegio de Postgraduados.
- Cruz, Miguel. 1969. El proceso administrativo en la agricultura de la Costa de Hermosillo. Tesis de ingeniero agrónomo, Universidad de Sonora.
- De Fraiture, C., Cai, X., Amarasinghe, U., Rosegrant, M., & Molden, D., 2004. Does international cereal trade save water? The impact of virtual water trade on global water use, Comprehensive Assessment Research Report 4, IWMI, Colombo.
- Domènech X., Jardim W.F., Litter M. (2001) Procesos Avanzados de Oxidación para la Eliminación de Contaminantes, Capitulo 1, en Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogenea. Blesa M. A., Editor. ©2001. ISBN: 987-43-3809-1.
- Ercin, A. E; Aldaya, M. & Hoekstra, A.Y. 2011. The water footprint of soy milk and soy burger and equivalent animal products. Value of Water: Research Report Series N. 49. UNESCO – IHE. Paris, France. 2011.
- Falconer, R. A., Norton, M. R., Fernando, H. J. S., Klaiæ, Z., & McCulley, J. L. 2012. Global Water Security: Engineering the Future National Security and Human Health Implications of Climate Change, in, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, Springer Netherlands, 261–269.
- Falkenmark, M. 2003. Freshwater as shared between society and ecosystems: from divided approaches to integrated challenges, Philos.T. R. Soc. Lon. B, 358, 2037–2049, 2003.
- Falkenmark, M., & Rockstrom, J. 2006. The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management, J. Water Res. Pl.-ASCE, 132, 129–132,

- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2011a. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture: Managing systems at risk. London/Rome, Earthscan/FAO. <http://www.fao.org/docrep/017/i1688e/i1688e.pdf>
- Gerbens-Leenes, P.W., Hoekstra, A.Y., 2008. Business water footprint accounting: a tool to assess how production of goods and services impacts on freshwater resources worldwide, Value of Water Research Report Series No.27, UNESCO-IHE, Delft.
- Gerbens-Leenes, P.W., Hoekstra, A.Y., & Van der Meer, Th .H., 2008. Water footprint of bio-energy and other primary energy carriers, Value of Water Research Report Series No.29, UNESCO-IHE, Delft.
- Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M.F.P. and van Beek, L.P.H. 2012. Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 488: 197-200, doi:10.1038/nature11295.
- Guía Técnica para el Área de Influencia del Campo Experimental Costa de Hermosillo. 2010. primera edición. Centro de investigación regional del noreste campo experimental Costa de Hermosillo, Sonora, México. ISBN: 978-607-425-433-4.
- Halvorson, William, Alejandro E. Castellanos y Joaquín Murrieta Saldívar. 2003. Sustainable Land Use Requires Attention to Ecological Signals. *Environmental Management* 32 (5): 551-558.
- Hanasaki, N., Inuzuka, T., Kanae, S., & Oki, T. (2010). An estimation of global virtual water flow and sources of water withdrawal for major crops and livestock products using a global hydrological model. *Journal of Hydrology*, 384(3), 232-244.
- Hewitt, Cynthia. 1982. *La modernización de la agricultura mexicana 1940- 1970*. México: Siglo XXI.
- Hoekstra A. Y., Chapagain A. K., Aldaya M. M. and Mekonnen M. M. 2009. Water footprint manual: State of the art 2009. Water Footprint Network. Enschede, the Netherlands.
- Hoekstra A. Y., Chapagain A.K., Aldaya M. M. and Mekonnen M. M. 2011. The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Earthscan, London, UK.
- Hoekstra, A. Y. 2003. Virtual water trade. Value of Water Research Report Series No.12, UNESCO-IHE, Delft.

- Hoekstra, A. Y. 2009. Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis. *Ecological Economics*, 68(7), 1963–1974.
- Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. 2012. The water footprint of humanity, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 109, 3232–3237.
- Hoekstra, A.Y, Mekonnen, M. M., Chapagain, A. K., Mathews, R. E., & Richter, B. D. 2012. Global monthly water scarcity: blue water footprints versus blue water availability. *PloS one*, 7(2), 1–9.
- Hoekstra, A.Y. and Chapagain, A.K. 2007. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern, *Water Resources Management* 21(1): 35–48.
- Hoekstra, A.Y. and Chapagain, A.K. 2008. *Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources*, Blackwell Publishing, Oxford, UK.
- Hoekstra, A.Y. y Hung, P.Q. 2002. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. *Value of Water Research Report Series No. 11*, UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands.
- Horlemann, L. & Neubert, S. 2007. *Virtual Water Trade: A Realistic Concept for Resolving the Water Crisis?* Studies 25. German Development Institute, Bonn.
- Hummel, D., Kluge, T., Liehr, S., Hachelaf, M., 2007. *Virtual Water Trade: Documentation of an international expert workshop*, July 2006, Institute for Social–Ecological Research, Frankfurt.
- Janssen, B.H. 1998. Efficient use of nutrients: An art of balancing. *Field Crops Res.* 56: 197–201.
- Kampman, D.A., Hoekstra, A.Y. & Krol, M.S. 2008. *The Water Footprint of India*, Value of Water Research Report Series No.32, UNESCO-IHE, Delft.
- Kessavalou, A., Doran, J.W., Powers, W.L., Ketter, T.A., Quian, J.H (1996): *“Bromide and nitrogen-15 tracers of nitrate leaching under irrigated corn in Central Nebraska”*. *Journal Environmental Quality*, vol.25: 1008–1014.
- Kongboon, R., & Sampattagul, S. 2012. The water footprint of sugarcane and cassava in northern Thailand. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 40, 451–460.
- L’vovich, M.I., White, G.F. & Turner, B.L.I. 1990. Use and transformation of terrestrial water systems, in Turner II, B.L. *et al.* (ed.), *The earth as transformed by human*

- action: Global and regional changes in the biosphere over the past 300 years, Cambridge University Press, New York, pp. 235–252.
- Lee, J. & Weber, D. (1982). Effects of Sulfuric Acid Rain on Major Cation and Sulfate Concentrations of Water Percolating Through Two Model Hardwood Forests *Journal of Environmental Quality* Vol 11, No 1, p 57-64, January-March, 1982. 5 Fig, 2 Tab, 40 Ref.
- Román R, L., Díaz, T., López, A. J., Watts, C., Cruz, B. F., Rodríguez, C. J., Rodríguez, J. C. 2017. Evapotranspiración del cultivo de sandía (*Citrullus lanatus*) en la Costa de Hermosillo Sonora, México.
- Liu J. & Yang H. 2010. Spatially explicit assessment of global consumptive water uses in cropland: green and blue water, *Journal of Hydrology* 384: 187-197.
- Liu, J. & Savenije, H. H. G. 2008. Food consumption patterns and their effect on water requirement in China, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12, 887–898.
- Liu, J., Zehnder, A.J.B. & Yang, H. 2009. Global consumptive water use for crop production: The importance of green water and virtual water, *Water Resources Research* 45, W05428.
- Loáiciga, Hugo. 2003. Sustainability and Ground Water. En *Water Resources Systems. Hydrological Risk, Management and Development*, editado por Günter Blöschl, Stewart Franks, Michio Kumagai, Katumi Musiake y Dan Rosbjerg, 313-321. Oxfordshire: International Association of Hydrological Sciences.
- Ma, J., Hoekstra, A.Y., Wang, H., Chapagain, A.K. & Wang, D., 2006. Virtual versus real water transfers within China. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.* 361 (1469), 835–842.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). National water footprint accounts: the green, blue and grey water footprint of production and consumption.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. 2010a. The green, Blue and Grey Water Footprint of Crops and Derived Crops Products Value of Water Research Report Series No.47, UNESCO-IHE, Delft.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. 2010a. The green, Blue and Grey Water Footprint of Crops and Derived Crops Products Value of Water Research Report Series No.47, UNESCO-IHE, Delft.

- Modelska, M., Rangel, M. M. y Szyrkiewicz, A. Nuevas aportaciones sobre la presencia de los iones nitrato y nitrito en la región de la costa de Hermosillo, Sonora, al noroeste de México. En XXII congreso nacional de geoquímica, Pachuca, Hidalgo, México. 2007. (13) 224 pp.
- Monreal, R., M. Rangel, J. Castillo y M. Morales. 2002. *Estudio de cuantificación de la recarga del acuífero de la Costa de Hermosillo, municipio de Hermosillo, Sonora, México*. Hermosillo: Universidad de Sonora.
- Moreno Vázquez, José Luis. 2006. *Por debajo del agua. Sobreexplotación y agotamiento del acuífero de la Costa de Hermosillo, 1945-2005*. Hermosillo: El Colegio de Sonora.
- Oel, P. R., & Hoekstra, A. Y. 2010. The green and blue water footprint of paper products: Methodological considerations and quantification.
- Oki, T. & Kanae, S. 2004. Global hydrological cycles and world water resources, *Science*, 313, 1068-1072.
- Olavarrieta, María Victoria, Christopher J. Watts y Juan A. Saiz Hernández. 2010. Beneficios de la cuota energética. Estudio de caso de la Costa de Hermosillo, Sonora, México, 2006-2007. *Región y sociedad* XXII (47): 145-164.
- Postel, S.L., Daily, G.C. and Ehrlich, P.R. 1996. Human appropriation of renewable freshwater, *Science* 271 (5250): 785-788.
- Quevedo, José Luis. 2007. Propuesta de acción para la gestión integrada en la Costa de Hermosillo, Sonora. Tesina de la especialidad en gestión integrada de cuencas hidrológicas, El Colegio de Sonora.
- Retes, L. R., Moreno, M. S., Denogean, B. F., Martín, R. M. y Ibarra, F. F. 2013. Determinación de Rentabilidad de Trigo en la Costa de Hermosillo, sonora. Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal. Volumen 32.
- Retes, L. R., Palafox, N., Ramsés, A., Moreno, M. S., Denogean, B. F. y Martín, R. M. 2014. Análisis de Rentabilidad del Cultivo de Nogal Pecanero en la Costa de Hermosillo. *Revista Mexicana de Agronegocios*, núm. 34, enero-junio, 2014, pp. 872-882 Sociedad Mexicana de Administración Agropecuaria A.C. Torreón, México.
- Rijsberman, F.R. 2003. Can development of water resources reduce poverty? *Water Policy*., Vol. 5, num. 5-6, pag. 399-412.

- Rijsberman, F.R. 2006. Water scarcity: Fact or fiction? *Agricultural Water Management*. Vol. 80, num 1-3, pag. 5-22.
- Rockstrom, J. & Gordon, L. 2001. Assessment of green water flows to sustain major biomes of the world: Implications for future ecohydrological landscape management, *Physics and Chemistry of the Earth* 26(11-12): 843-851.
- Rockström, J., Gordon, L., Falkenmark, M., Folke, C. & Engvall, M. 1999. Linkages among water vapor flows, food production, and terrestrial ecosystem services, *Conservation Ecology* 3(2): 5.
- Rodríguez, B. E. 2007. Una visión sostenibilista sobre la escasez del agua dulce en el mundo. *R. I. sostenibilidad Tecnología y Humanismo* (2): 85 – 107.
- Rodríguez, J.C., Grageda J., Watts C.J., A. Garatuza-Payan J., Castellanos-Villegas A., Rodríguez-Casas J., Saiz J., Olavarrieta V. 2010. Water use by perennial crops on the lower Sonora watershed, *Journal of Arid Environment*, 74:603-610.
- Rosegrant, M. W. and Ringler, C. 2000. Impact on food security and rural development of transferring water out of agriculture, *Water Policy* 1(6): 567-586.
- Rost, S., Gerten, D., Bondeau, A., Lucht, W., Rohwer, J. & Schaphoff, S. 2008. Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system, *Water Resources Research* 44: W09405 doi:10.1029/2007WR006331.
- Sagarpa, 2011. Demandas Del Sector. Fondo Sectorial de Investigación en materia Agrícola, Pecuaria, Acuicultura, Agrobiotecnología y Recursos Fitotécnicos. 2001-3. (2)
- Salazar, A., J. Moreno y A. Lutz. 2012. Agricultura y manejo sustentable del acuífero de la Costa de Hermosillo. *Región y Sociedad*, 24(3):155-179.
- Samoral G., Dumont, A., & Aldaya. 2011. Análisis de la huella hídrica extendida de la cuenca del Guadalquivir (p. 47). Madrid, España.
- Sanders, O., Goesch, T., Hughes, N., 2010. Adapting to Water Scarcity. ABARE Issues and Insights 10.5, Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics, Canberra, ACT.
- Seckler, D., Amarasinghe, U. & Molden, D.J., de Silva, R. and Barker, R. 1998. World water demand and supply, 1990–2025: Scenarios and issues, IWMI Research Report 19, IWMI, Colombo, Sri Lanka.

- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesca. 2017. Anuario estadístico de la producción agrícola. http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/ientidad/index.jsp
- Shiklomanov, I. A. (ed.). 1999. World water resources and their use: a joint State Hydrological Institute St Petersburg/UNESCO product. UNESCO Water Portal. International Hydrological Programme: UNESCO's intergovernmental scientific in water resources. <<http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/shiklomanov/>>
- Shiklomanov, I.A. 1993. World fresh water resources, In: Gleick, P.H. (ed.) Water in crisis: A guide to the world's fresh water resources, Oxford University Press, Oxford, UK, pp. 13-24
- Shiklomanov, I.A. and Rodda, J.C. (eds.). 2003. World water resources at the beginning of the twenty-first century, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- SIAP. 2010. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). México. <http://www.siap.gob.mx>. [Consulta: 31 de mayo de 2010]
- Siebert, S. and Döll, P. 2008. The global crop water model (GCWM): Documentation and first results for irrigated crops. Frankfurt Hydrology Paper 07, Institute of Physical Geography, University of Frankfurt, Frankfurt am Main, Germany.
- Siebert, S. and Döll, P. 2010. Quantifying blue and green virtual water contents in global crop production as well as potential production losses without irrigation, Journal of Hydrology 384: 198-207.
- Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SIAP-SAGARPA). 2012. Cierre de la producción agrícola por estado. http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=351.
- SNIDRUS. 2010. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Sistema Nacional de Información para el Desarrollo Rural Sustentable (SNIDRUS). México. <http://www.sagarhpa-export.gob.mx>. [Consulta: 31 de mayo de 2010]

- Soulis, K. X., S. Elmaloglou, and N. 2015. Investigating the effects of soil moisture sensors positioning and accuracy on soil moisture based drip irrigation scheduling systems. *Agricultural Water Management* 148:258–268.
- Steinich, B., Escolero, O., Marín, L.E., 1998. Salt-water intrusion and nitrate contamination in the Valley of Hermosillo and El Sahuaral coastal aquifers, Sonora, Mexico. *Hydrogeol. J.* 6, 518–526
- UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization). 2012. World's groundwater resources are suffering from poor governance. UNESCO Natural Sciences Sector News. Paris, UNESCO. 2010. The Wealth of Waste: The economics of wastewater use in agriculture. Rome, FAO.
- UNISON (Universidad de Sonora), 2001, Estudio de cuantificación de la recarga del acuífero “Costa de Hermosillo”, Municipio de Hermosillo, Sonora: México, D. F., Comisión Nacional del Agua, Contrato SGT-GRNO-SON-01-026-CE-13, Tomos I y II, XII-7 p.
- USGS (United States Geological Survey). 2013. Land subsistence.
- Van Oel, P. R., Mekonnen, M. M., & Hoekstra, a. Y. 2009. The external water footprint of the Netherlands: Geographically-explicit quantification and impact assessment. *Ecological Economics*, 69(1), 82–92. doi:10.1016/j.ecolecon.2009.07.014
- Vázquez, V. N. 2011. Asociación agrícola de productores de uva de mesa, modelo de la agricultura moderna en México en el siglo XXI. Fundación Produce Sonora, A. C. 92 p.
- Vega, Lourdes y Juan Saiz. 1995. Estudio del balance de agua de la zona agrícola de la Costa de Hermosillo. *Boletín del Departamento de Geología*. Universidad de Sonora 12 (2): 93-104.
- Vega-Granillo, E.L.; Cirett-Galán, Samantha; De la Parra-Velasco, M.L.; y Zavala Juárez, Raúl, 2011, Hidrogeología de Sonora, México, in Calmus, Thierry, ed., Panorama de la geología de Sonora, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 118, cap. 9, p. XXX–XXX
- VOISIN, A. 1971. Suelo, hierba, cáncer. TECNOS Madrid, España. p. 367.
- WEF. 2014. Global Risks 2014 Ninth Edition. World Economic Forum, Genova. 60 pp.

- West, R. C. 1993. *Sonora its Geographical Personality* University of Texas Press, Austin, Texas.
- WWC, 2004. *Econferencesynthesis: Virtual watertradeconsciouschoices*, WWC Publication No.2, WorldWater Council, Marseille.
- WWF. 2012. *Una mirada a la agricultura de Colombia desde su huella hídrica* (p. 48). Bogotá, Colombia.
- Zambrano, Ovidio. 1971. *Análisis económico del uso de agua, mano de obra y maquinaria agrícola en la Costa de Hermosillo*. Tesis de maestría, Colegio de Posgraduados, Centro de Economía Agrícola, Chapingo.
- Zeng, Z., Liu, J., Koeneman, P. H., Zarate, E., & Hoekstra, a. Y. 2012. *Assessing water footprint at river basin level: a case study for the Heihe River Basin in northwest China*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(8), 2771–2781
- Zierold Reyes L. 1988. *La lluvia y su aprovechamiento en la agricultura*. 3(2): 18-33 pp.