

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



*CUIDADO DEL AGUA Y MEDIO AMBIENTE EN EL RIEGO DE CULTIVOS,
MEDIANTE EL USO DE SENSORES DE HUMEDAD Y ENERGÍA SOLAR
FOTOVOLTAICA*

POR:

Ing. Miguel Armando Mendoza Muñoz

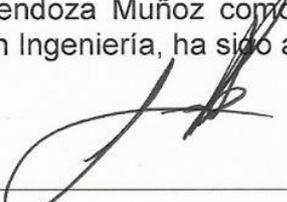
**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAestrÍA EN INGENIERÍA EN HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA.**

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

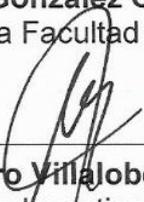
DICIEMBRE 2018



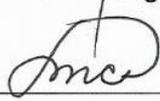
Cuidado del agua y medio ambiente en el riego de cultivos, mediante el uso de sensores de humedad y energía solar fotovoltaica. Tesis presentada por Miguel Armando Mendoza Muñoz como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, ha sido aprobada y aceptada por:



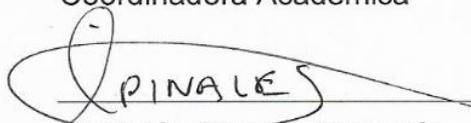
M.I. Javier González Cantú
Director de la Facultad de Ingeniería



Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Secretario de Investigación y Posgrado



M.I. Martha Lorena Calderón Fernández
Coordinadora Académica



Dr. Adán Pinales Munguía
Director de Tesis

Diciembre 2018

Fecha

Comité:

Dr. Adán Pinales Munguía
Dra. María Socorro Espino Valdés
M.I. Rodrigo De la Garza Aguilar
M.I. Agustín Javier Tonche Ramos

© Derechos Reservados

Miguel Armando Mendoza Muñoz
Circuito Número I s/n, Nuevo Campus
Universitario II, 31100 Chihuahua, Chih.
UACH- Facultad de Ingeniería

Diciembre 2018

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios, quien me ha dado vida y salud, y con su bendición siempre llena de felicidad a mí y a toda mi familia.

A mis padres “Miguel Mendoza de la Rosa” y “Eva Cipriana Muñoz Calderón” quienes se han esforzado por ayudarme a llegar al punto en el que me encuentro y son un apoyo fundamental e incondicional en las adversidades e inconvenientes que se presentan día con día.

Agradezco a mi director de tesis el “Doctor Adán Pinales Munguía” porque gracias a su experiencia, conocimiento y motivación tomó rumbo la investigación. Así como también a mis asesores por su apoyo en esta tesis y durante el posgrado. A la ingeniera “Karla Guillermina Romero Vega” por la ayuda y datos que sirvieron para la investigación. A todos los docentes que con su sabiduría, conocimiento y apoyo, ayudaron a formarme como persona y profesional.

A mis hermanos “Eva Abril Mendoza Muñoz”, y “Oscar Rodrigo Mendoza Muñoz” por todos los momentos en la vida que hemos pasado juntos que han servido para formarme como persona y fortalecer a mi familia, por brindarme la mano cuando la requería y por mantener un apoyo incondicional hacia mi persona.

A mi pareja “Susana Martínez Moreno” por la ayuda y los aportes no solo para el desarrollo de mi tesis, sino también en mi vida, por entenderme en todo, por preocuparse por mí en cada momento y porque fue persona esencial para poder culminar mi tesis con éxito.



14 de diciembre de 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

ING. MIGUEL ARMANDO MENDOZA MUÑOZ

Presente

En atención a su solicitud relativa a la Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **Dr. Adán Pinales Munguía** para que lo desarrolle como Tesis, con el título: **“CUIDADO DEL AGUA Y MEDIO AMBIENTE EN EL RIEGO DE CULTIVOS MEDIANTE EL USO DE SENSORES DE HUMEDAD Y ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA”**.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

I. INTRODUCCIÓN

- I.1 El agua
- I.2 Principales cultivos en el estado de Chihuahua
- I.3 Sensores de humedad
- I.4 Energía solar fotovoltaica
- I.5 Justificación
- I.6 Objetivos

II. MARCO FÍSICO

- II.1 Climatología
- II.2 Hidrografía
- II.3 Humedad
- II.4 Geología
- II.5 Precipitación
- II.6 Temperatura y evapotranspiración
- II.8 Agricultura
- II.9 Volumen de extracción del agua subterránea

III. METODOLOGÍA

- III.1 Recopilación y análisis de la información
- III.2 Necesidades hídricas de los principales cultivos del estado de Chihuahua
- III.3 Sistema de riego
- III.4 Sistema de control de humedad
- III.5 Configuraciones de profundidad del nivel estático
- III.6 Consumo de energía eléctrica para la extracción del agua subterránea
- III.7 Sistema de energía solar fotovoltaica
- III.8 Cuantificar el ahorro hídrico y gases contaminantes que se emiten al planeta

FACULTAD DE INGENIERÍA
Circuito No.1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125
Tel. (614) 442-95-00
www.fing.uach.mx



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

IV. RESULTADOS

- IV.1 Necesidades hídricas de acuerdo a los principales cultivos del estado de Chihuahua
- IV.2 Sistema de riego para los principales cultivos del estado de Chihuahua
- IV.4 Configuraciones del Estado de Chihuahua
- IV.5 Gasto en energía eléctrica de los principales cultivos del estado de Chihuahua
- IV.6 Diseñar un sistema de energía solar fotovoltaica, equivalente al consumo de energía eléctrica agrícola
- VI.7. Diseño del sistema de riego por goteo con sensores de humedad alimentado por energía solar fotovoltaica y monitoreo remoto
- IV.8 Cuantificación del ahorro de energía eléctrica y recurso hídrico, así como el impacto ambiental por el uso de energías renovables

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- V.1 Conclusiones
- V.2 Recomendaciones

VI. REFERENCIA

ANEXOS

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares.

ATENTAMENTE
"Naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ



EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO

DR. ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
Circuito No.1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125
Tel. (614) 442-95-00
www.fing.uach.mx

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución porcentual del agua en el planeta.	11
Figura 2. Sensor watermark (Enciso, Porter, et al, 2005).	16
Figura 3. Medidor inalámbrico (Enciso, Porter, et al, 2005).	17
Figura 4. Sensor ECH2O® y medidor ECH2O® (medidor dieléctrico), (Enciso, Porter, et al, 2005).	18
Figura 5. Radiación global promedio en México.	19
Figura 6. Partes de un módulo solar (http:// www.areatecnologia.com /electricidad/ paneles-solares.html).	21
Figura 7. Sistema solar fotovoltaico aislado (http://panelessolarespr.com/ solar101.html).	23
Figura 8. Sistema solar fotovoltaico interconectado (http://www.imagosoluciones.com/Servicios/Energia_solar_fotovoltaica.html).	24
Figura 9. Clima en el estado de Chihuahua (INEGI, 2017).	29
Figura 10. Cuencas en el estado de Chihuahua (INEGI, 2017).	32
Figura 11. Ríos principales del estado de Chihuahua (INEGI, 2017).	33
Figura 12. Distribución de la humedad en el estado de Chihuahua (INEGI, 2017).	35
Figura 13. Días de humedad en el estado de Chihuahua (INEGI, 2017).	37
Figura 14. Precipitación en el estado de Chihuahua (INEGI, 2017).	39
Figura 15. Temperatura en el estado de Chihuahua (INEGI, 2017).	40
Figura 16. Evapotranspiración en el estado de Chihuahua (INEGI, 2017).	41
Figura 17. Edafología en el estado de Chihuahua (INEGI, 2017).	43
Figura 18. Agricultura en el estado de Chihuahua (INEGI, 2017).	45
Figura 19. Volumen de extracción del agua subterránea (hm ³ /año) por zona, para el estado de Chihuahua (INEGI, 2017).	46
Figura 20. Tipos de riego (https://www.tiposde.com/riego.html).	66
Figura 21. Cabezal de control riego por goteo (Mendoza, 2013).	67
Figura 22. Modelo conceptual para medir la humedad el suelo basado en un sistema RIS (Flores-Medina, Flores-García, et al., 2015).	71
Figura 23. Configuraciones de niveles estáticos del agua en el estado de Chihuahua. ...	72
Figura 24. Pozos distribuidos en el estado de Chihuahua (INEGI, 2018).	74
Figura 25. Radiación solar en el estado de Chihuahua (CONABIO, 2017).	77
Figura 26. Trayectoria del sol a lo largo del año para Sídney Australia, la cual es parecida a la presentada en el estado de Chihuahua.	81
Figura 27. Zonas con mejor radiación, localidades y topografía.	85
Figura 28. Zonas donde se podría instalar la planta solar fotovoltaica.	88
Figura 29. Diseño de un sistema de riego por goteo con sensores de humedad, alimentado por energía solar fotovoltaica.	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales cultivos del estado de Chihuahua	12
Tabla 2. Nomenclatura de los principales climas del estado de Chihuahua.....	30
Tabla 3. Valores de radiación solar de las 73 zonas distribuidas en el estado de Chihuahua.....	78
Tabla 4. Valores promedio de la radiación solar en el estado de Chihuahua	82
Tabla 5. Componentes, unidades y cantidades indispensables para la instalación de una granja solar.....	86
Tabla 6. Componentes, unidades y cantidades indispensables para la instalación de una granja solar para el distrito de riego 43.	90
Tabla 7. Ahorro económico por la energía eléctrica y ahorro de agua, así como disminución de gases contaminantes.	94

RESUMEN

En esta tesis se presenta la investigación relacionada con la conservación del agua y el medio ambiente a través del riego de cultivos, la implementación de sensores de humedad y el uso de energía solar fotovoltaica.

Para lograr lo anterior, se recopiló y analizó información relacionada con los principales cultivos del estado de Chihuahua, sus necesidades hídricas, los sistemas de riego existentes, sensores de humedad, nivel estático de aprovechamientos subterráneos, consumo de energía eléctrica de los pozos, radiación, topografía, entre otros.

Posteriormente, se analizaron diferentes sistemas de riego y se recomendó el mejor, para aplicarlo a los cultivos del Estado. Así también, se investigó sobre la utilización de energías renovables y la probable disminución de la emisión de los gases de efecto invernadero que se generan al quemar combustibles fósiles.

A partir de esta información, se seleccionó el sistema de riego óptimo para el estado de Chihuahua. A este sistema se le agregaron sensores de humedad y nodos de conexión inalámbrica para obtener información en tiempo real a través de internet. Los datos sobre el gasto de agua y la potencia promedio del motor se obtuvieron del estudio de la SAGARPA, los cuales se utilizaron para calcular el consumo de electricidad en el Estado.

Con los datos del consumo eléctrico, se diseñaron las diferentes opciones de granjas solares fotovoltaicas para cubrir las necesidades de los servicios o pozos en el estado de Chihuahua.

De lo anterior se plantearon **tres alternativas**, entre las que se tiene: una granja solar fotovoltaica para todo el consumo eléctrico agrícola en el Estado, en la segunda opción se consideró el análisis por distrito de riego y la última, contempla la instalación de un sistema solar fotovoltaico por servicio o pozo. De los tres, el último es el que presenta el costo más alto.

Los resultados obtenidos fueron positivos ya que por cada kilowatt hora que se utiliza en energías solar fotovoltaica y no en combustibles fósiles, se deja de emitir 715 g de gases contaminantes (Dióxido de carbono CO₂). Por lo que, al utilizar el sistema propuesto, se dejaría de emitir 1'717,240.35 toneladas de

gases contaminantes al año, que equivale a plantar 68'689,614 árboles. En cuanto al ahorro del recurso hídrico, aplicando el sistema de riego por goteo resultó en 1,113.02 hm³/año. En cuanto al tiempo para recuperar la inversión al instalar el sistema de paneles solares fotovoltaicos, se tiene, que para las alternativas 1, 2 y 3 son 3.8, 4.4 y 4.6 años, respectivamente.

I. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años se ha incrementado la importancia del recurso hídrico en nuestro país y el mundo, siendo hoy en día uno de los mayores retos para la humanidad y la sociedad el cuidado y la conservación de este recurso.

I.1 El agua

El agua es una sustancia de radical importancia para la vida, con excepcionales propiedades resultado de su composición y estructura. Es una molécula sencilla formada por tres átomos, uno de oxígeno y dos de hidrógeno, con enlaces polares que permiten establecer puentes de hidrógeno entre moléculas adyacentes; aunque pareciera un compuesto sencillo y simple, el agua goza de características únicas, mismas que hacen posible la vida (Vaquero y Toxqui, 2012).

El agua dulce en el mundo se utiliza de la siguiente manera, según datos de (Vergara (s/f)): la totalidad de agua en la tierra es de 1,385 millones de km³, de tal cantidad solo el 3% es de agua dulce, de dicho porcentaje solo el 0.3% es agua superficial. En el mundo el agua dulce se encuentra diversificada de esta forma: el 65% es para riego agrícola, el 25% se utiliza para la industria y el 10% es para el consumo doméstico, comercial y otros servicios urbanos (**Figura 10**).

La distribución natural del agua es diversa en las distintas regiones del planeta y según la época del año. En el continente americano se concentra 47% del agua mundial, seguido por Asia (32%), Europa (7%), África (9%) y Australia y Oceanía (6%) (Carabias y Landa, 2015). Aunado a los datos mencionados anteriormente sobre la distribución de la totalidad del agua, es importante decir que la mayor concentración de población radica en los mantos acuíferos de agua dulce de mayor capacidad.

El uso del agua dulce de México se encuentra encabezada por el 83% dedicado para riego, el 3% para el uso industrial, el 12% para uso doméstico y el 2% se utiliza para la acuicultura (**Figura 10**).

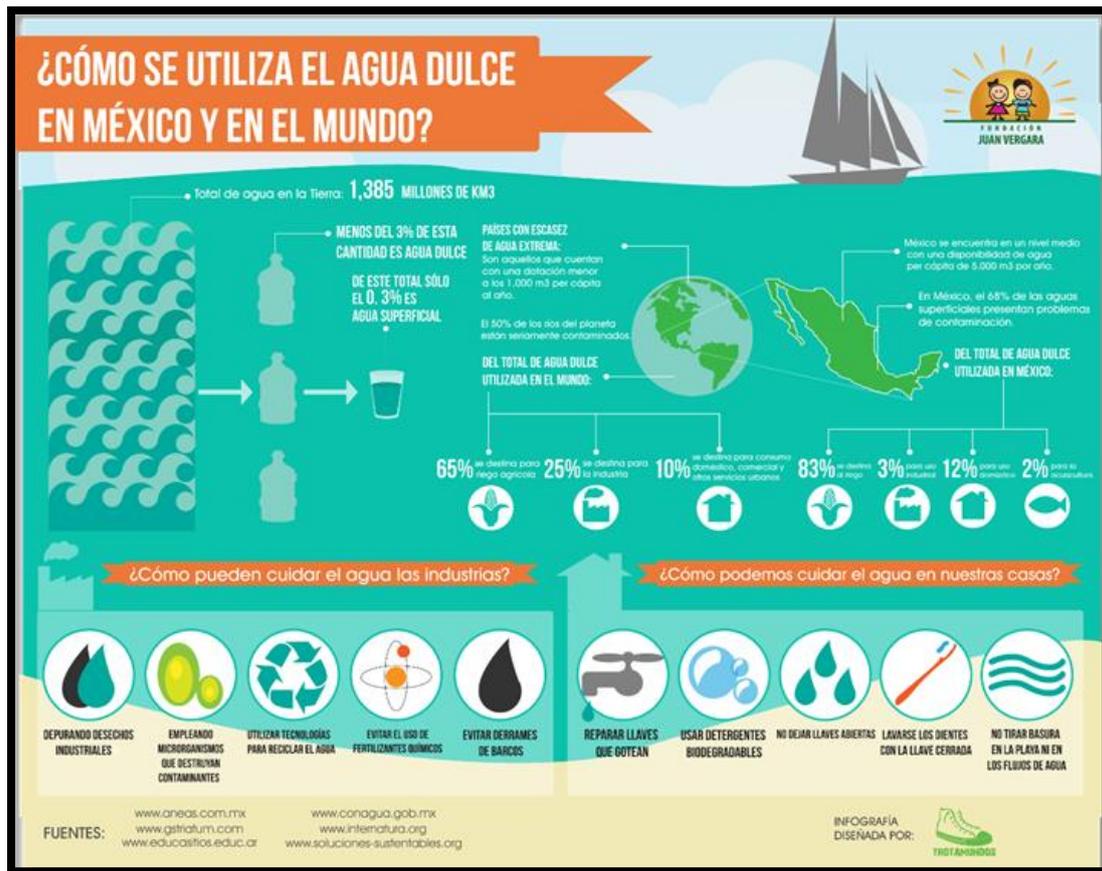


Figura 1. Distribución porcentual del agua en el planeta (https://www.trotamundosweb.com/infografias/agua_dulce_en_mexico/, 2015).

Otros datos importantes que describen lo indispensable del agua son los problemas que actualmente radican en el país, donde, en diversas regiones la cantidad de agua disponible para consumo y la naturaleza es crítica, regularmente en algunas zonas la calidad no es la adecuada, por ende, pueden perjudicar la salud. Así también, la situación económica no permite cubrir a toda la población, lo que provoca rezagos en el abasto y al crecer la demanda (crecimiento de la población) también crece el desabasto.

Los datos anteriores alertan a la sociedad en cuanto al uso y moderación del agua, ya que las actividades dedicadas a la producción agrícola se ven en la necesidad de competir por el recurso hídrico, ciertamente el porcentaje que es utilizado en el área de cultivo es de 83% (Vergara, s/f), que representa la actividad que genera más consumo de agua dulce.

I.2 Principales cultivos en el estado de Chihuahua

En el estado de Chihuahua, según el monitoreo Agroeconómico 2009, los principales cultivos de riego son: chile verde, algodón, avena forrajera y cebolla. De temporal: avena forrajera, avena grano, sorgo forrajero y maíz forrajero. Finalmente, entre los principales cultivos perennes se encuentran: manzana, nuez, durazno y uva (**Tabla 1**). A continuación, se presenta una breve descripción de cada uno de estos cultivos.

Tabla 1. Principales cultivos del estado de Chihuahua (SAGARPA, 2009).

CULTIVOS PRINCIPALES				
Volumen de producción (miles de toneladas)				
	2008*	2009	Var. Anual %	Lugar Nal 2007
RIEGO				
Chile Verde	416.7	542.3	30.1	2°
Algodón	124.5	114.7	-7.9	1°
Avena Forr.	318.1	342.5	7.7	3°
Cebolla	206.2	213.0	3.3	1°
TEMPORAL				
Avena Forr.	2,692.0	3,006.8	11.7	1°
Avena Grano	89.0	99.7	12.0	1°
Sorgo Forr.	538.7	560.4	4.0	1°
Maíz Forr.	267.1	450.3	68.6	2°
PERENNES				
Manzana	354.1	370.0	4.5	1°
Nuez	43.9	44.5	1.4	1°
Durazno	19.1	20.1	5.2	5°
Uva	3.0	3.6	20.0	5°

Chile verde

El chile verde también es un importante cultivo en Chihuahua no solo tiene un interés económico ya que contiene vitaminas C, E, A y minerales. Se puede utilizar antes y después de la maduración, ya que se destina al secado

comúnmente llamado chile seco o chipotle. Se puede consumir como alimento deshidratado, frescos o procesados, esto hace que tenga impacto social y económico (Mendoza, 2013).

Algodón

El algodón es una planta textil de fibra suave la cual ha tomado gran relevancia mundialmente ya que sus cultivos son unos de los más antiguos. En la India se realizó el primer textil, así como también los primeros escritos sobre el algodón, los cuales datan de 1,500 años A.C. En México el cultivo comenzó en Veracruz y para el siglo XVI se tenía una producción de 116 millones de libras, y a partir de 1860 este cultivo empezó a tener importancia en varias partes de México cultivándose en zonas al norte y cerca de Estados Unidos de América (SAGARPA, 2011).

Avena forrajera

La avena es una planta que produce grano y se puede utilizar como forraje, para el alimento de animales de pastoreo, heno o ensilado. En México de 1990 al 2011 se incrementó la superficie sembrada de 311,218 hectáreas a 942,823 (SIACON, 2011). En el estado de Chihuahua se cultiva de forma temporal y representa el 76% de la que siembra en México. Del 100% de la siembra en Chihuahua el 69% es utilizada para la producción de forraje, el cual se divide en 70% para la alimentación pecuaria, el 25% para consumo humano y el 5% para semilla (Ávila y Salmerón, 1999).

Cebolla

La cebolla es otro de los cultivos en Chihuahua, la cual, se ha convertido en algo común para la cocina mundial, debido a su sabor distintivo. La planta se ha cultivado desde hace más de 4,000 años (Lawande, 2001). La cebolla se produce en la actualidad en 139 países, la mayor parte la tienen India y China, las cuales cultivan casi la mitad de la cebolla en el mundo. México se ubica en el sitio número 17 en lo que respecta a superficie cultivada, pero se ubica en el cuarto lugar en cuanto a rendimiento. También, en México la cebolla se cultiva en 26 estados. En el año 2012 la superficie cultivada llegó a las 39,764 hectáreas y produciendo 1' 118,804 toneladas (Osuna y Ramírez, 2013).

Maíz

El maíz tiene orígenes en el centro de México hace más de 7,000 años y se ha vuelto una parte importante en la dieta del país. El maíz ocupa el 62 por ciento de la superficie cultivada en México. Produce entre el 63 y el 66% del volumen total agrícola y hasta 18 millones de personas dependen de este cultivo, ya que es su principal ingreso. Se siembra en diferentes climas, así como, tierras irrigadas o en tierras semiáridas y tiene ciclos que varían desde los tres hasta los trece meses (Nadal, (s/f)).

Manzana

En cuanto a la manzana, la planeación agrícola nacional 2017-2030 de la SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación) menciona que es un fruto carnoso de estructura firme derivado del receptáculo de la flor, su coloración varía desde verde claro hasta rojo muy oscuro y se presenta principalmente en suelos franco-arenosos. La mayor parte de su producción se localiza en el estado de Chihuahua, distribuyéndose de la siguiente manera: en los municipios de Guerrero (7036 ha), Cuauhtémoc (6527 ha), Namiquipa (3733 ha), Bachíniva (2961 ha), Casas Grandes (1245 ha), Cusihuiriachic (1140 ha) y en otros municipios del Estado (3770 ha), por lo tanto, la región se posiciona como la principal productora de manzana en México.

En el 95% de los casos, la producción se maneja por medio de riego por bombeo de pozos y se tiene una eficiencia del 65% o menos utilizando 1.6 m³ de agua por kg de manzana producida (Parra et al., 2005).

Nuez

La nuez es un fruto grande de cáscara dura y centro carnoso, se puede utilizar en diferentes aspectos como la panadería, la repostería, la elaboración de helado, moles de México y botanas. La nuez pecanera es originaria del sureste de Estados Unidos de América y del norte de México (Gray, 1973). Es una actividad que ha tenido gran crecimiento en el norte del país ya que este fruto se

ha adaptado muy bien al clima y edafología del lugar, además, se presentan las condiciones del mercado por su cercanía con Estados Unidos de América.

Durazno

El durazno, cuyo origen de este fruto comenzó en China, para luego expandirse a Grecia, y continuando con toda Europa, se dice que Cristóbal Colon introdujo este fruto a Estados Unidos de América y pronto se distribuyó por México. Es un árbol pequeño que crece hasta 6 m de altura, el fruto es grande con una pulpa carnosa, una cáscara suave y al centro una semilla. Existen dos tipos de fruta: la fruta de carne blanda y de carne dura. Es uno de los frutos más tecnificados y distribuidos del mundo, teniendo a China como principal productor a nivel mundial, ya que generara hasta 4 millones de toneladas, exportando solo el 10% (Nava, 2005).

Uva

Por último, pero no menos importante esta la uva. Está fruta es cultivada desde épocas muy antiguas ya que se remonta a cinco mil años antes de nuestra era. Se puede utilizar sin procesar, es decir, fresco o en la industria de la confitura, jugos y vinos, también, como alimentación de ganado con sarmientos de vid y su pámpano, ya que 100 kg de sarmientos equivalen a 40 kg de cebada (Hernández, 2001). De las uvas que se consumen en México el 63% es usado fresco, el 24.4% se utiliza para vino y jugos y el restante 12.6% se deshidrata (SAGARPA, 2017).

I.3 Sensores de humedad

La humedad está relacionada con la cantidad de moléculas de agua en alguna sustancia ya sea sólida o gaseosa. Los sensores de humedad del suelo utilizan la conductividad de la tierra, la cual debe ser mayor entre más cantidad de agua se presente (Kouro, 2001). Existen varios métodos para determinar la humedad del suelo, así como también, dos tipos principales de sensores. Los que miden la tensión o succión la cual retiene el agua en el suelo y los que miden la cantidad total de humedad en el suelo por medio del porcentaje volumétrico. Es importante considerar la humedad para lograr un riego óptimo, basándose en que la presión

capilar del agua en el suelo representa la cantidad de fuerza que debe de ejercerse para extraerla del suelo, por ende, permite conocer el déficit de humedad (Edward, 2010). En las **Figuras 2, 3 y 4**, se puede observar un tipo de sensor de humedad y un medidor para ese mismo sensor Watermark.



Figura 2. Sensor watermark (Enciso, Porter, et al, 2005).



Figura 3. Medidor inalámbrico (Enciso, Porter, et al, 2005).



Figura 4. Sensor ECH2O® y medidor ECH2O® (medidor dieléctrico), (Enciso, Porter, et al, 2005).

I.4 Energía solar fotovoltaica

México por su ubicación geográfica y los tipos de clima, se encuentra dentro del área llamada franja solar que es donde se concentra la mayoría del recurso solar del planeta. Por su parte, Chihuahua es uno de los estados con mayor promedio de insolación, la cual se encuentra entre 4.51 y 5.1 kilovatios por hora por cada metro cuadrado por día (**Figura 5**), (KWh/m² por día).

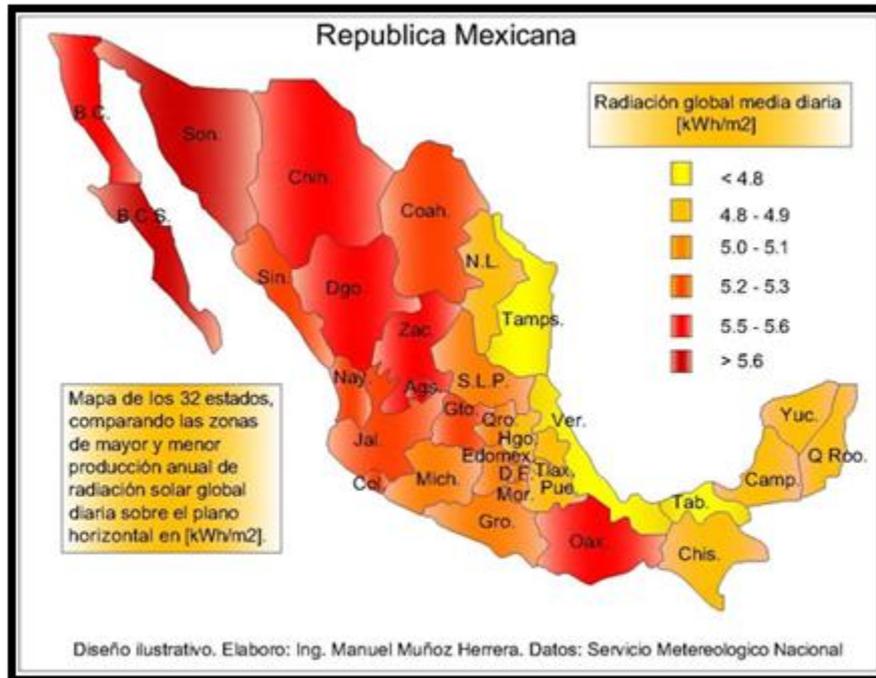


Figura 5. Radiación global promedio en México.

Debido al avance tecnológico, los sistemas fotovoltaicos han reducido su costo de producción, por lo que, se puede tener una mayor inclusión de dicha tecnología en diversas partes de la nación. Debido a lo anterior, es preciso efectuar estrategias que sugieran efectivamente su utilización en aquellos lugares en donde la cuestión económica no sea un obstáculo.

Se puede afirmar que el recurso solar en el país es sumamente alto, en abundancia, además, como se mencionó, se cuenta con un importante avance tecnológico en el rubro de los equipos fotovoltaicos. Sin embargo, el aprovechamiento del recurso solar en México aún es muy bajo, ya que la población ignora la información y las ventajas de dicha tecnología. Los equipos, incluyendo captadores solares, representaron tan solo el 0.05% de la producción

de energía primaria en México, de acuerdo con el Balance Nacional de Energía para el año 2010 (SENER, 2011).

Los sistemas fotovoltaicos comenzaron a instalarse en zonas aisladas, donde se carecía de red eléctrica, sin embargo, en los últimos años la mayor parte de los sistemas fotovoltaicos instalados han sido interconectados a la red eléctrica. Existen dos tipos de **sistemas fotovoltaicos**, el **sistema aislado** y el **sistema interconectado**.

Sistema fotovoltaico aislado

El sistema aislado corresponde a uno donde no existe red eléctrica, los cuales se forman de módulos solares, mismos que pueden ser de distintas capacidades, desde 5 w/h hasta 400 w/h; se construyen a partir de celdas solares, formadas de arseniuro de galio que son protegidas por un acrílico transparente.

Para su función cada celda utiliza el efecto fotovoltaico, donde la energía lumínica produce cargas positiva y negativa en dos semiconductores próximos de diferente tipo, lo que hace que se genere un campo eléctrico que da forma a corriente eléctrica. Existen dos tipos de celdas o células solares: las de silicio monocristalino: constituida por un único cristal de silicio y son de color azul oscuro; mientras que las de células policristalinas están conformadas por grupos de cristales de silicio, lo que hace que dé menor rendimiento que el monocristalino.

De igual manera es importante mencionar que la mayoría de los módulos solares tienen un marco a base de aluminio anodizado, lo que proporciona una máxima ligereza y una mayor durabilidad. En la **Figura 6** se puede observar cómo se conforma un panel solar.

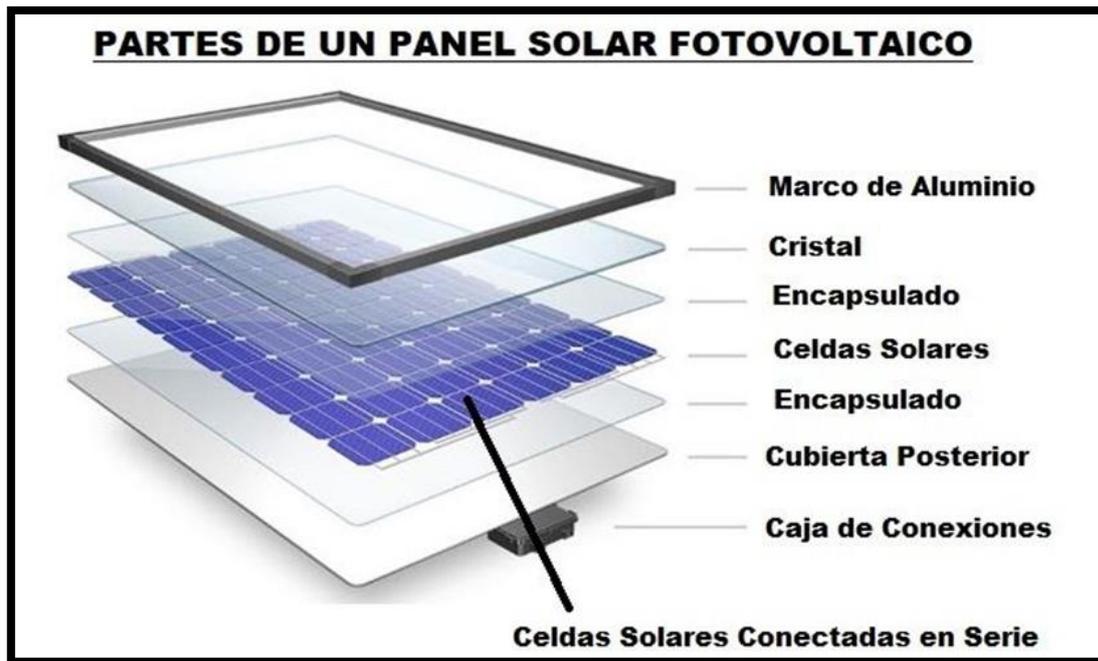


Figura 6. Partes de un módulo solar ([http:// www.areatecnologia.com /electricidad/ paneles-solares.html](http://www.areatecnologia.com/electricidad/paneles-solares.html)).

Aunado a lo anterior, otro componente de los sistemas solares aislados es el controlador de carga. Entre sus principales funciones es hacer posible la entrada de corriente de carga a las baterías que se encuentran vacías. Además, al momento en que la batería se encuentra con suficiente carga ésta se interrumpe y a su vez, cuando se encuentran descargadas, vuelve a insertar la corriente, haciendo la función de un corta circuito.

Existen dos tipos de controladores o reguladores solares: PWM (Pulse-Width Modulation, modulación por anchura de pulsos) y MPPT (Maximum Power Point Tracking, o seguidor del punto de máxima potencia) los PWM son de menor costo que un MPPT, ya que el MPPT es el que genera un mayor nivel de energía al explotar al máximo por encima del banco de baterías al grupo de módulos solares, a diferencia de los equipos PWM que tienen la desventaja de requerir un voltaje igual o menor que las baterías.

El controlador se conecta a la batería, misma que almacena la energía solar mientras se goce de horas luz, para que en la noche o con un clima poco soleado esa energía se utilice. Otra de sus funciones es proveer una mayor intensidad

de corriente al recibir de ambas direcciones (paneles solares y baterías) inyecciones de energía.

Las baterías se dividen en varios rubros: las primeras son de plomo ácido, abiertas o de mínimo mantenimiento, las cuales tienen la ventaja que pueden ser rellenadas con agua destilada, sin embargo, deben tener un mantenimiento mínimo. Otras son de plomo ácido selladas o libre de mantenimiento, como su nombre lo indica, no se les da mantenimiento lo que les da ventaja, pero con la desventaja de que acorta su vida útil. Otras más son las de gel selladas o de libre mantenimiento que cuentan con una protección contra la salida de ácido y no es necesario mantenimiento, solo que no soportan una corriente mayor a la que se especifica en cada batería, y por último las AGM selladas de libre mantenimiento que están construidas con material de fibra de vidrio, se protegen contra las salidas de ácido y tienen una vida útil más larga, convirtiéndolas en la mejor opción para los sistemas aislados, aun siendo éstas las de mayor costo.

El siguiente componente de un sistema fotovoltaico es el inversor solar aislado también conocidos como fuera de la red (off-grid) que tienen la función de usar la energía directa del grupo de baterías y transformarla a energía alterna, misma que se utiliza en los aparatos eléctricos comunes; la mayoría de éstos no permitan su utilización en sistemas interconectados. Todos los inversores tienen salida de 120 voltios o 240 voltios. Se diversifica su tipo de acuerdo a las ondas que se generan en los inversores llamadas sinusoidales; éstas pueden ser puras, las cuales son utilizadas exactamente como en la red de una casa o un comercio. Las ondas sinusoidales modificadas son más económicas sólo que hay algunos aparatos que no funcionan con ellas, como las impresoras, copiadoras, relojes digitales, entre otras. En la **Figura 7** se puede observar el funcionamiento de un sistema aislado.

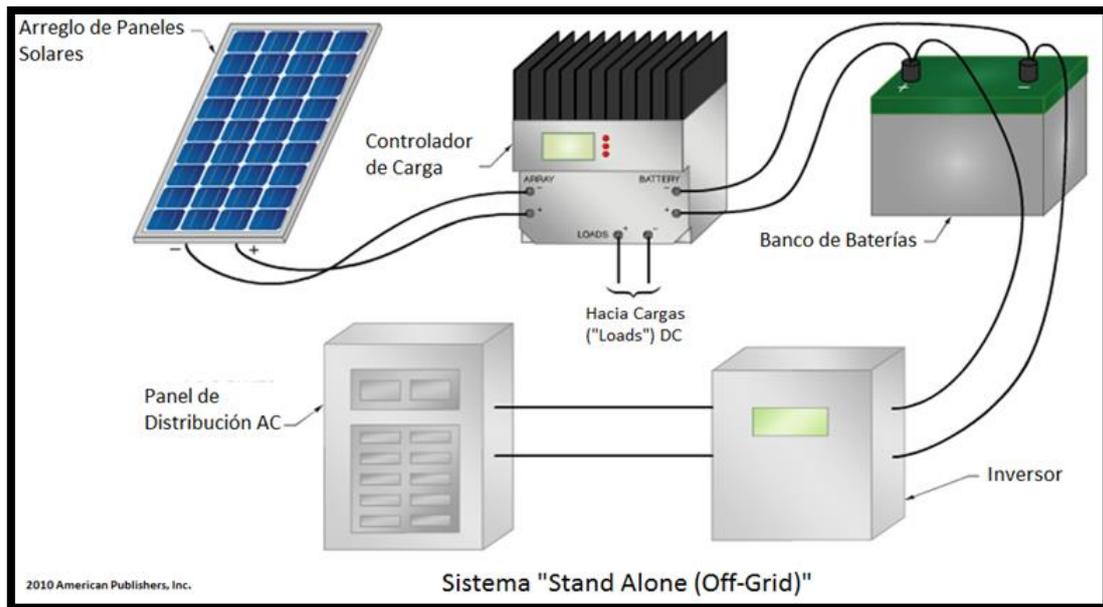


Figura 7. Sistema solar fotovoltaico aislado (<http://panelessolarespr.com/solar101.html>).

Sistema fotovoltaico interconectado

El sistema interconectado es diferente al sistema aislado, ya que este sistema necesita estar conectado a la red eléctrica para funcionar y generar energía eléctrica. Esta interconexión se da debido a la reforma energética, la cual nos permite generar energía para utilizarla o inyectarla a la red de CFE.

Además, el sistema de energía solar fotovoltaica interconectada solo se conforma por paneles solares de 250 vatios en adelante comercialmente hablando hasta los 405 vatios que es el más grande en la actualidad. Así como también, sus inversores son diferentes ya que no son tipo isla, sino, son especiales para el interconectado a la red y finalmente no es necesario el uso de baterías para almacenamiento. Un ejemplo de su funcionamiento se puede observar en la **Figura 8**.

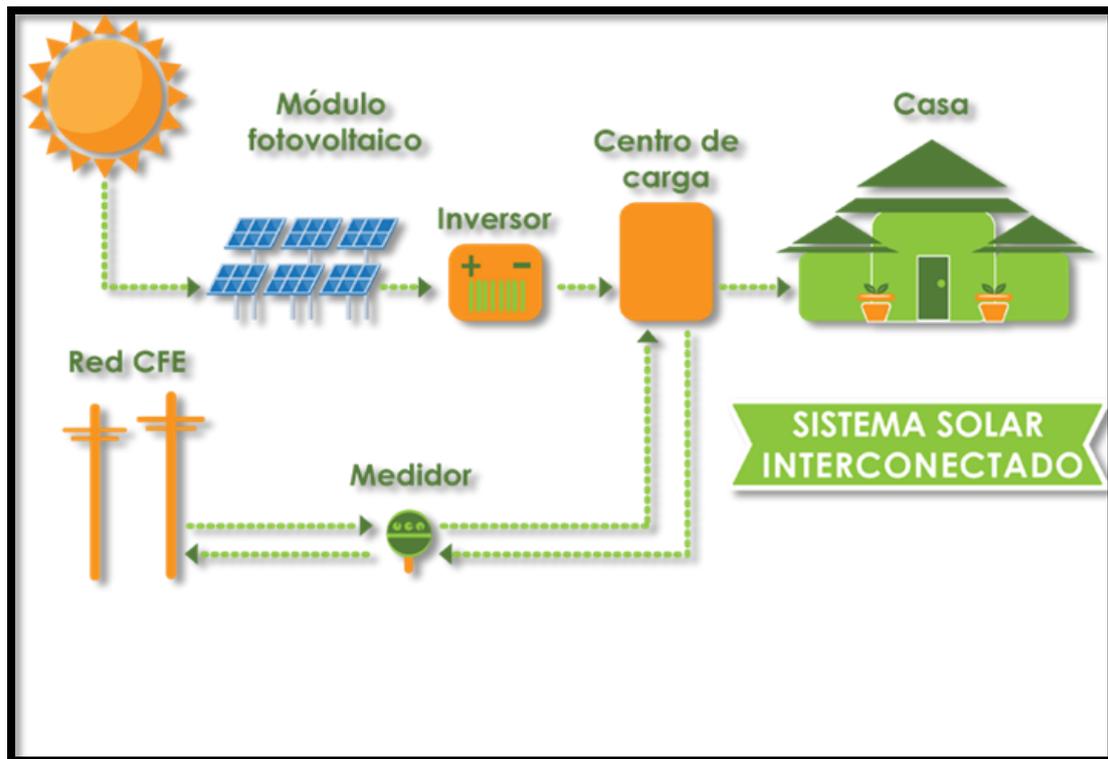


Figura 8. Sistema solar fotovoltaico interconectado (http://www.imagosoluciones.com/Servicios/Energia_solar_fotovoltaica.html).

Como se observa en la imagen, el sol genera las radiaciones necesarias para que los electrones en las células fotovoltaicas de sus módulos se muevan y generen energía directa. Esta energía directa es transmitida hacia un inversor de corriente el cual transforma la energía directa en energía alterna para poder ser utilizada. Aunado a esto, la energía es transmitida hacia el centro de carga del lugar a instalarse. El centro se carga y distribuye la energía ya sea hacia la casa o donde se instale el sistema solar fotovoltaico durante el día para que la energía generada por los módulos fotovoltaicos sea utilizada. El excedente es transmitido hacia el medidor bidireccional y hacia la red del suministrador local. Por la noche al no recibir radiación solar se utiliza la energía del suministrador local para alimentar la casa y se mide el gasto en el medidor bidireccional.

La energía excedente que se transmitió durante el día hacia la red del suministrador local es medida por el medidor bidireccional y guardada como si fuera un ahorro, el cual es utilizado en las noches cuando no hay radiación solar; por eso se le llama sistema solar fotovoltaico interconectado y se utiliza un

medidor especial bidireccional para poder observar las dos lecturas. El proveedor local deberá tener el control del gasto de energía eléctrica. Una de las desventajas de este sistema es que no se sigue generando energía eléctrica si la red del suministrador local falla, ya que si esta falla, el inversor o micro inversor contiene un elemento de seguridad para apagarse, para que no sea peligroso cuando una persona esté arreglando la falla en la red del suministrador local.

Actualmente, existen tres modalidades para el uso de energía solar interconectada. **La de consumo**, la cual se explicó en el párrafo anterior. **La de consumo y venta de excedente**, la cual se refiere a que la energía que se vaya al excedente no será utilizable sino entrará como venta de energía a CFE al precio que se presente en el mercado, el cual cambia constantemente. La última modalidad es **la de venta total**, esto es utilizado como negocio ya que es una buena inversión al ser un generador autorizado y vender energía eléctrica; en esta modalidad es donde se manejan las llamadas granjas solares.

Hasta este punto se ha presentado un panorama general de los principales cultivos del estado de Chihuahua, así como también, las tecnologías existentes para poder reemplazar la generación de electricidad convencional por aquella que se generan a partir de un sistema solar fotovoltaico. Por su parte, los cultivos para su desarrollo necesitan agua y para proporciona dicha agua es necesario contar con una fuente de energía.

I.5 Justificación

En el mundo existen varios problemas respecto al manejo del agua y a la cantidad de gases contaminantes que se emiten; el agua es considerada el recurso más importante para las personas ya que es necesaria para la agricultura, la salud, la industria, las plantas e incluso para la estabilidad social y política. Por estas razones uno de los retos que se tienen que enfrentar es la distribución del agua de forma equitativa y el buen uso de este recurso; por otra parte, los gases contaminantes como el dióxido de carbono y el monóxido de carbono son un problema serio para el mundo ya que se emiten más de 11,000 millones de toneladas de carbono a la atmósfera, los cuales son producto de los

combustibles fósiles, los vehículos y la quema de vegetación o deforestación la cual aporta el 29% de las emisiones totales de carbono (Montaño, Sandoval, 2007).

En el estado de Chihuahua existen problemas serios de escasez de agua ya que es una zona desértica, con una cantidad baja de precipitación y alta evapotranspiración; aunado a lo anterior se cuenta con malas prácticas de riego en la agricultura. Por ejemplo: el uso del volumen de agua máximo posible cuando las presas están llenas, en lugar de mantener un volumen medio de extracción con flujo constante; el riego con agua subterránea por inundación, la conducción del agua por tuberías con fugas por falta de mantenimiento, así como también, la quema de combustibles fósiles, la cual ha ido en aumento cada año.

Por estas y por otras muchas situaciones no existe en la mayoría de los casos un control de riego óptimo y por ello se generan diversos encharcamientos y lugares donde no llega el agua, así como también, no se aprovecha el potencial con el que el estado de Chihuahua cuenta para el uso de la energía solar fotovoltaica. La energía solar fotovoltaica permite disminuir la quema de combustibles fósiles, debido a que en México se producen 188 millones de toneladas de carbono anualmente (Montaño, Sandoval, 2007).

Otro de los problemas que se presentan en el Estado, es el subsidio que se les da a los agricultores en temas de energía con un 90% del consumo eléctrico, lo cual es un gran desaliento para la implementación de energías renovables ya que el 10% no representa un gasto importante para apoyar el cambio en las fuentes de energía.

Por lo tanto, en esta tesis se plantearon los siguientes objetivos:

I.6 Objetivos

I.6.1 Objetivo general

Proponer una metodología para conservar el agua y mejorar el medio ambiente a través del riego de cultivos e implementar el uso de sensores de humedad y energía solar fotovoltaica.

I.6.2 Objetivos específicos

- a) Realizar una recopilación y análisis de la información relacionada con: cultivos, tipo de riego, precipitación, radiación solar, horas pico de sol, hidrometría, piezometría, consumo de energía en extracción de agua para bombas, solares, gasolina o diésel y eléctricas.
- b) Determinar las necesidades hídricas de los principales cultivos del estado de Chihuahua.
- c) Proponer un sistema de riego adecuado para los principales cultivos del estado de Chihuahua.
- d) Diseñar un sistema de control de humedad para los principales cultivos del estado de Chihuahua.
- e) Elaborar configuraciones de igual profundidad al nivel estático en las zonas donde se localizan los principales cultivos del estado de Chihuahua.
- f) Cuantificar el consumo de energía eléctrica en el riego mecánico para los principales cultivos del estado de Chihuahua.
- g) Diseñar un sistema de energía solar fotovoltaica, equivalente al consumo de energía eléctrica.
- h) Cuantificar el ahorro del agua al implementar el uso de sensores de humedad y la disminución de gases contaminante, utilizando energía solar fotovoltaica para extraer el agua subterránea en las zonas donde se encuentran los principales cultivos del estado de Chihuahua.

II. MARCO FÍSICO

El estado de Chihuahua se encuentra en la región norte de la República Mexicana y es frontera hacia el norte con Estados Unidos. Se localiza específicamente entre los paralelos 25° 35' y 31° 50' de latitud norte y en los 103° 15' y 109° 10' de longitud oeste, respecto al meridiano de Greenwich. Comprende una superficie de 247,520.96 km², la cual colinda al este con el estado de Coahuila, al sur con Durango, al suroeste con Sinaloa y al oeste con Sonora.

Cuenta con adecuadas vías de comunicación, como carreteras y terracerías, brechas, así como también, la red ferroviaria más extensa del país y dos aeropuertos internacionales. En cuanto a servicios energéticos tiene once plantas generadoras de energía eléctrica de 2,620 MW y una red de gasoducto y poliductos.

Fisiográficamente cuenta con Cuencas y Sierras que comprenden la porción oriente y la Sierra Madre Occidental la porción poniente, la cual se divide en subprovincias como La Mesa, Barrancas y Altas Llanuras; según datos del Servicio Geológico Mexicano (2016).

II.1 Climatología

Debido a que se tiene una gran superficie en el Estado, se cuenta con diversos microclimas como los que se mencionan a continuación: semiárido cálido, semiárido semicálido, semiárido semifrío, semiárido templado, semicálido subhúmedo, cálido subhúmedo, árido semifrío, árido templado, muy árido semicálido, muy árido templado, templado subhúmedo, y semifrío subhúmedo tal y como se observa en la imagen que se realizó con los datos del INEGI (**Figura 9**).

Tabla 2. Nomenclatura de los principales climas del estado de Chihuahua

Nomenclatura clima	
(A)C(wo)	Semicálido subhúmedo del grupo C
(A)C(w1)	Semicálido subhúmedo del grupo C
(A)C(wo)x'	Semicálido subhúmedo del grupo C
Awo	cálido subhúmedo
BWkw	Muy árido templado
BWk(x')	Muy árido templado
BWhw	Muy árido semicálido
BWh(x')	Muy árido semicálido
BSokw	árido templado
BSok(x')	árido templado
BSok""w	árido semifrío
BSohw	árido semicálido
BS1kw	Semiárido templado
BS1k(x')	Semiárido templado
BS1k""w	Semiárido semifrío
BS1hw	Semiárido semicálido
BS1h(x')	Semiárido semicálido
BS1(h')w	Semiárido cálido
BS1(h')(x')	Semiárido cálido
C(w1)	Templado subhúmedo
C(w1)x'	Templado subhúmedo
C(w2)	Templado subhúmedo
C(w2)x'	Templado subhúmedo
C(wo)	Templado subhúmedo
C(wo)x'	Templado subhúmedo
Cb'(w1)x'	Templado subhúmedo
Cb'(w2)	Templado subhúmedo
Cb'(w2)x'	Templado subhúmedo

En la **Figura 9**, las áreas más grandes marcadas son de climas semiáridos, áridos y muy áridos sobre todo en el centro del estado de Chihuahua, que corresponde con la localización de la mayoría de los cultivos. Las zonas cálidas o templadas se encuentran en los límites del Estado que corresponde a la zona de sierras.

II.2 Hidrografía

El estado de Chihuahua está comprendido por 37 cuencas (**Figura 10**) y pertenece a 5 regiones hidrológicas (RH-7, RH-9, RH-24, RH-34 y RH-35) llamadas: RH-7 Río Colorado; RH-9 Sonora Sur, RH-24 Río Bravo-Conchos; RH-34 Cuencas Cerradas del Norte y RH-35 Mapimi. Se utilizan 2,581 millones de m³ anuales de agua en la agricultura, además, existen 12 cuerpos de agua superficial y cuenta con dos ríos principales: Conchos y Bravo (**Figura 11**).

Una cuenca hidrográfica es el área físico-geográfica que separa por diferencias topográficas el agua superficial, en donde, ésta se mueve dentro de una red natural por vertientes que llegan a ríos principales o a depósitos de agua naturales, pantanos o al mar (Valderrama Plata, 1985).

Las cuencas son fuentes naturales de captación de agua, donde se puede observar el desarrollo histórico de poblaciones, intereses y hábitos, que definen la forma como se organiza el territorio y las diferentes prácticas productivas realizadas (Aguilar, 2007). Esto se refiere a que las cuencas pueden ser utilizadas como unidades de planificación, ordenamiento territorial y gestión para el manejo de los recursos naturales, debido a que la conservación de estos recursos es de mayor importancia desde el punto de vista social, cultural, político y económico para la población dentro de la cuenca (Gaspari, et al., 2010).

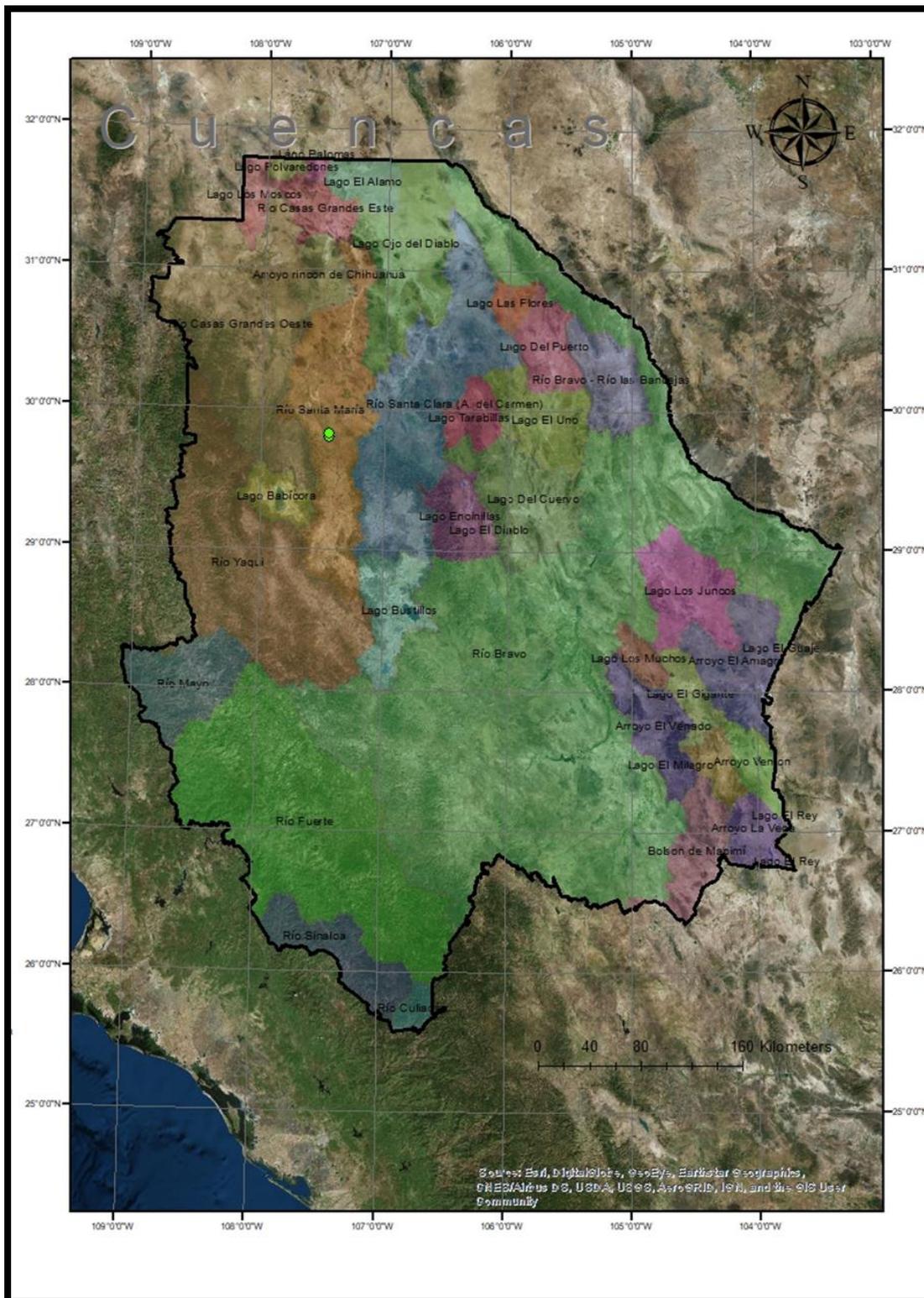


Figura 10. Cuencas en el estado de Chihuahua (INEGI, 2017).

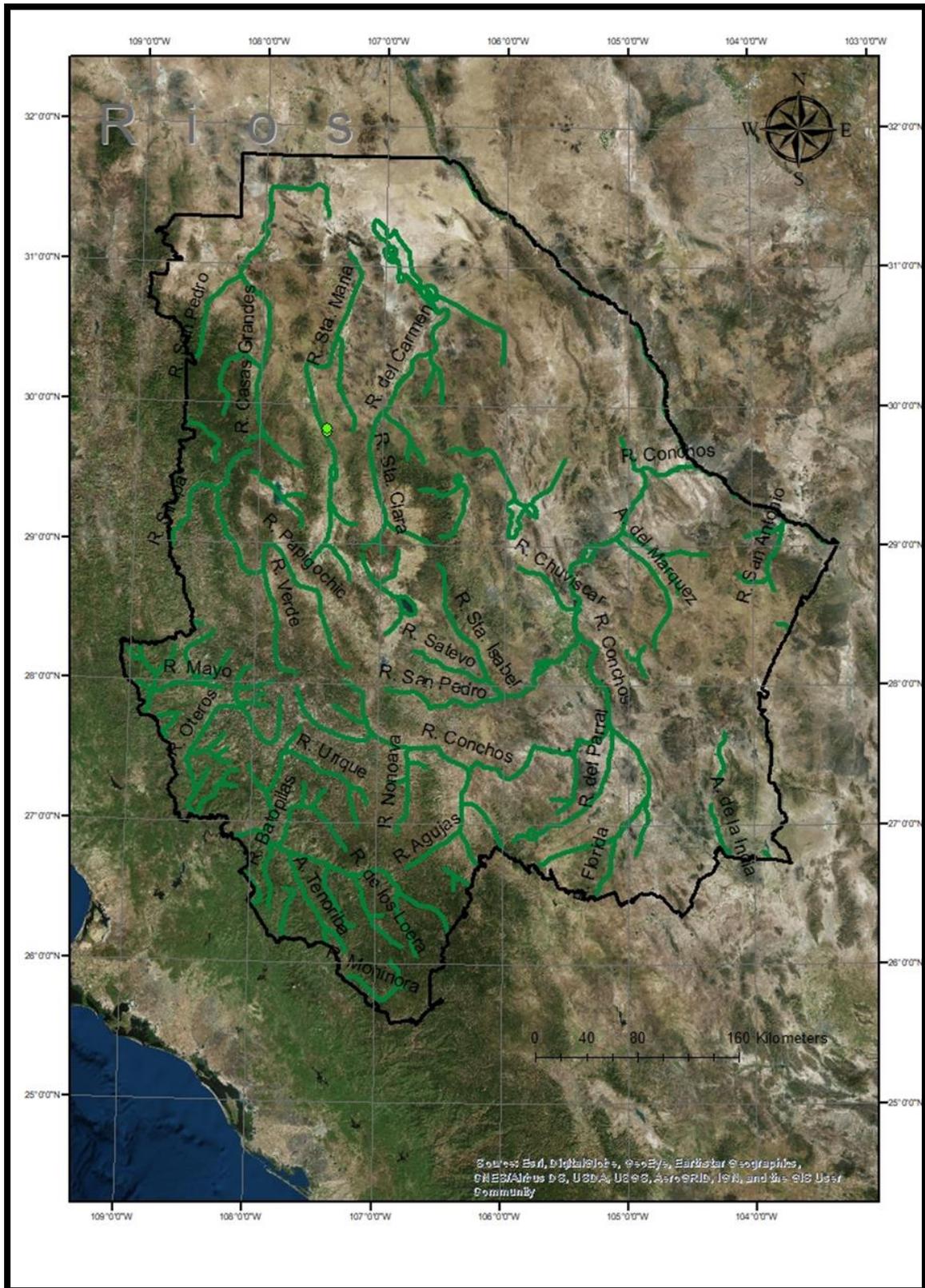


Figura 11. Ríos principales del estado de Chihuahua (INEGI, 2017).

II.3 Humedad

También es importante mencionar el aspecto de la humedad dentro del Estado, la cual va desde 6% para clima muy árido, hasta 89% para subhúmedo (**Figura 12**), donde se observa hasta cero días de humedad arídico, es decir en una zona donde el clima es árido, hasta 330 días de humedad údico, con un ambiente húmedo (**Figura 13**).

La humedad es la cantidad de vapor de agua que contiene el aire y existen diferentes tipos de humedad, la humedad absoluta o densidad de vapor, la cual es el peso de vapor de agua que está en cada unidad de volumen del aire. Ésta puede variar cuando el aire se expande o se contrae por cambios de temperatura sin que se modifique el contenido de agua; la humedad específica es la masa de vapor de agua en una unidad de masa del aire húmedo, la cual es una expresión más constante que la humedad absoluta.

Otro concepto que se asemeja a la humedad es la **razón o proporción de mezcla**, misma que es la masa de vapor de agua que existe en una unidad de masa de aire seco y se expresa igual que la humedad. Éste es un elemento bastante constante y conservativo del aire. Por último, la **humedad relativa** es una relación entre el vapor de agua en el aire y la máxima capacidad que podría haber en esa temperatura. Se expresa en porcentaje y puede variar dependiendo de la cantidad de vapor de agua en el aire y el cambio en la temperatura o el volumen.

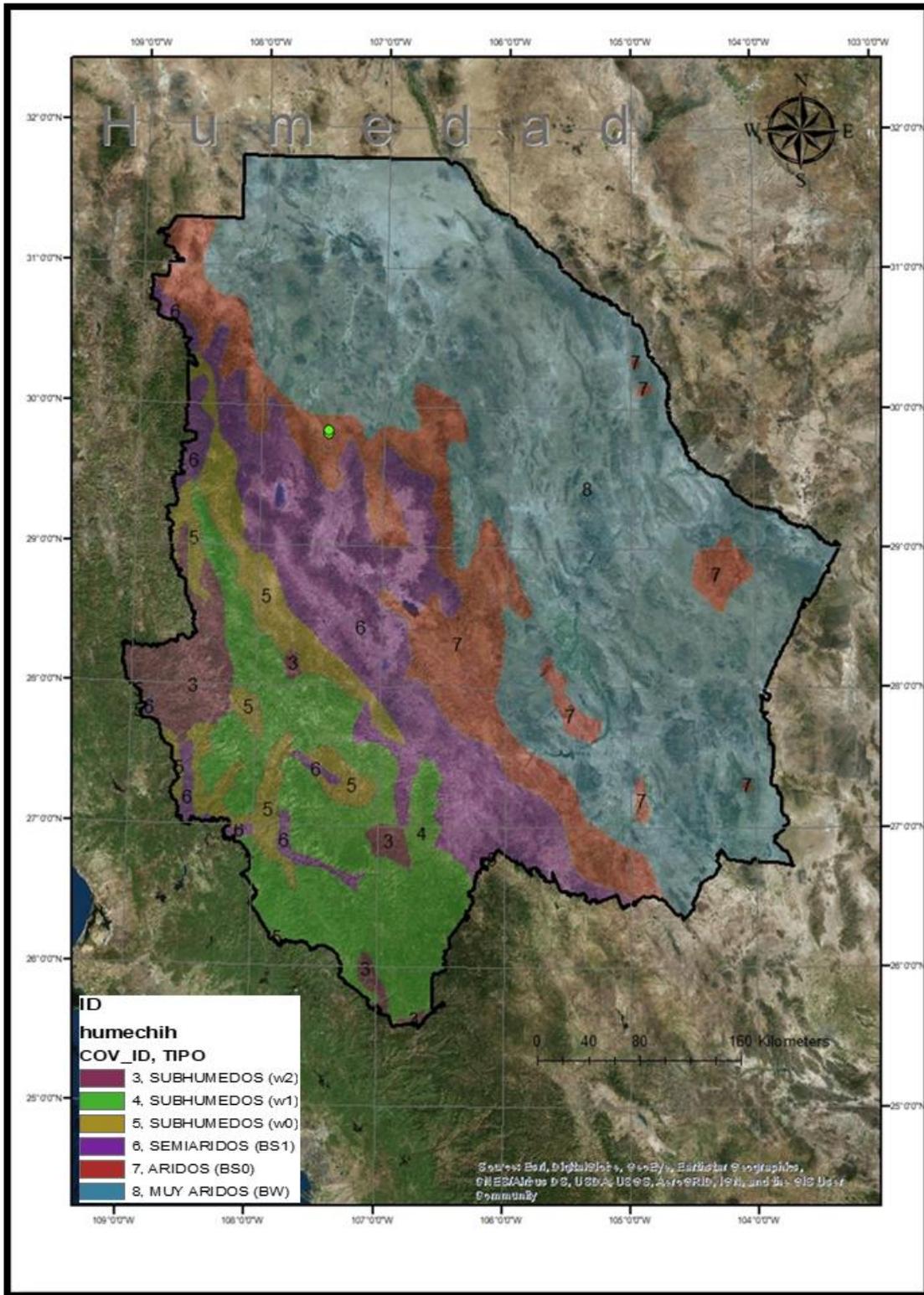


Figura 12. Distribución de la humedad en el estado de Chihuahua (INEGI, 2017).

En las **Figuras 9 y 12** se pueden observar 6 diferentes tipos de clima y cómo en el estado de Chihuahua el tipo de humedad más abundante es el de muy árido en toda la porción este del Estado y casi ocupando la mitad de su territorio. En la zona centro es árido y semiárido y en la zona montañosa del oeste y también, ocupa buena parte del territorio, se puede ver como predomina el clima subhúmedo.

En la **Figura 13** se observan más a detalle estos diferentes tipos de clima con sus días de humedad, por ejemplo, el muy árido es el más dominante, tiene 0 días de humedad según estudios del INEGI; mientras más nos desplazamos hacia el lado suroeste del Estado, se puede apreciar como los días de humedad van aumentando hasta zonas donde existen 330 días.

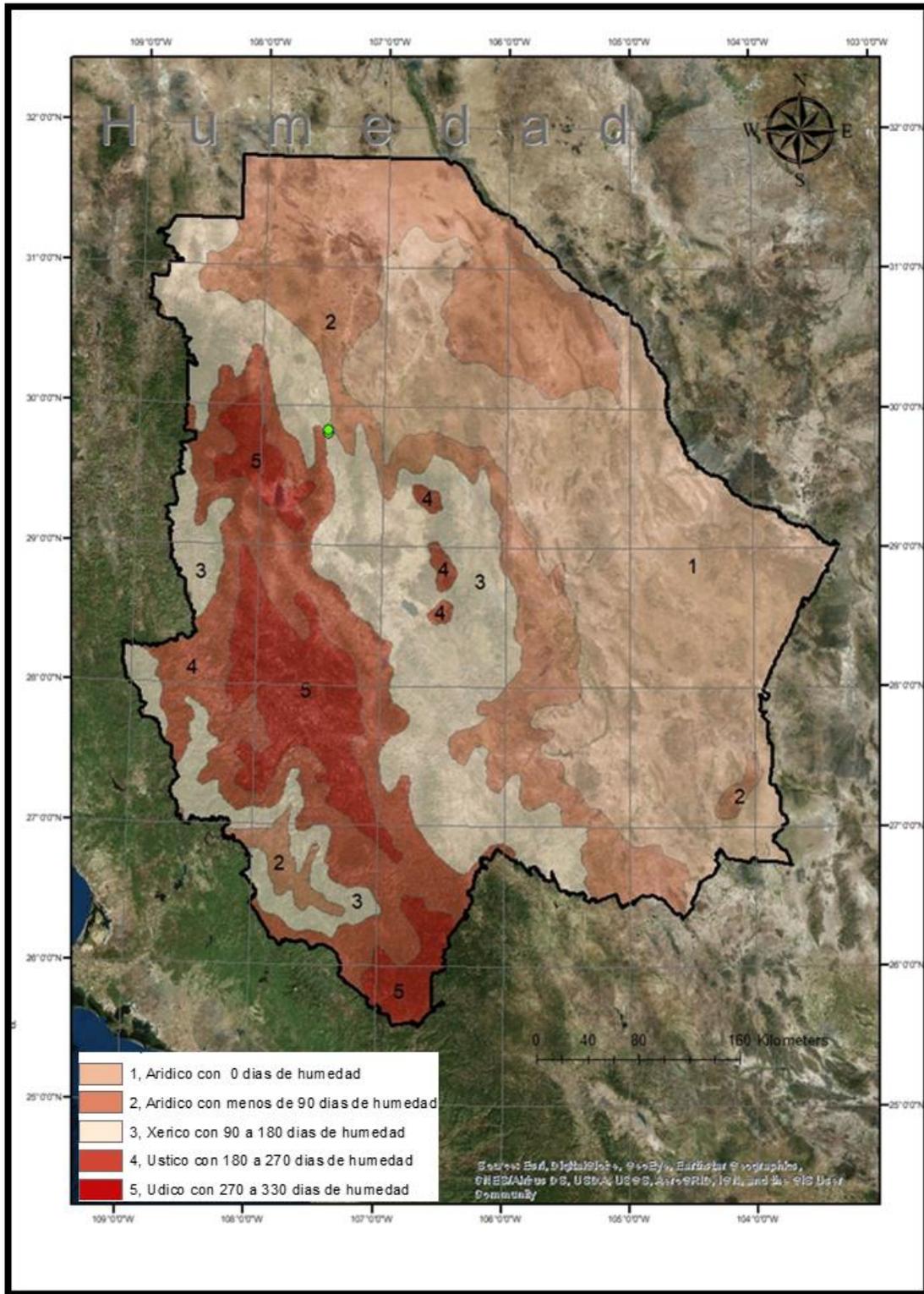


Figura 13. Días de humedad en el estado de Chihuahua (INEGI, 2017).

II.4 Geología

En cuanto a la geología, las rocas más antiguas de Chihuahua son de tipo metamórfico precámbricas, la mayoría de gneis cuarzo-feldespático, seguidas de las paleozoicas que al igual que las precámbricas son pocas. Posteriormente, se tienen calizas asociadas a limolitas y areniscas del mesozoico, donde Chihuahua tenía un ambiente marino de sedimentación carbonatada y finalmente el Cenozoico donde se desarrolló la Sierra Madre Occidental, debido al volcanismo.

II.5 Precipitación

La precipitación en el estado de Chihuahua es poca y se puede presentar en rangos desde los 125 hasta 1,200 mm anuales, siendo la mayor parte de 125 a 400 mm anuales (**Figura 14**).

II.6 Temperatura y evapotranspiración

La temperatura media anual es de 17 grados centígrados con temperaturas desde semifrío (menor a 16 grados Celsius) hasta semicálida (18-22 grados Celsius) siendo la templada (12-18 grados Celsius) la que abarca más territorio según datos del INEGI (**Figura 15**).

Un factor alterado por la temperatura y la precipitación es la evapotranspiración. La evapotranspiración es un proceso en donde el agua pasa de líquido a vapor desde la superficie a la atmósfera, así como también, es la suma de la transpiración de las plantas y la evaporación del suelo. El primero es el transporte que pasa por las plantas desde las hojas hasta la atmósfera gracias a los estomas y la evaporación es el proceso físico por el cual una superficie húmeda es expuesta a aire insaturado (Hornberger et al., 2014).

En el estado de Chihuahua la evapotranspiración oscila entre los 200 a 400 mm anuales en la zona centro del estado. En la zona norte hasta los 600 mm anuales y en la zona montañosa, hacia el suroeste hasta los 900 mm anuales (**Figura 16**). Si se compara la precipitación con la evapotranspiración existen muchas zonas en el estado de Chihuahua donde se tiene el mismo valor, por lo tanto, lo

que precipita se evapotranspira, esto hace más difícil la recolección de agua y la infiltración, tanto para el agua superficial como subterránea.

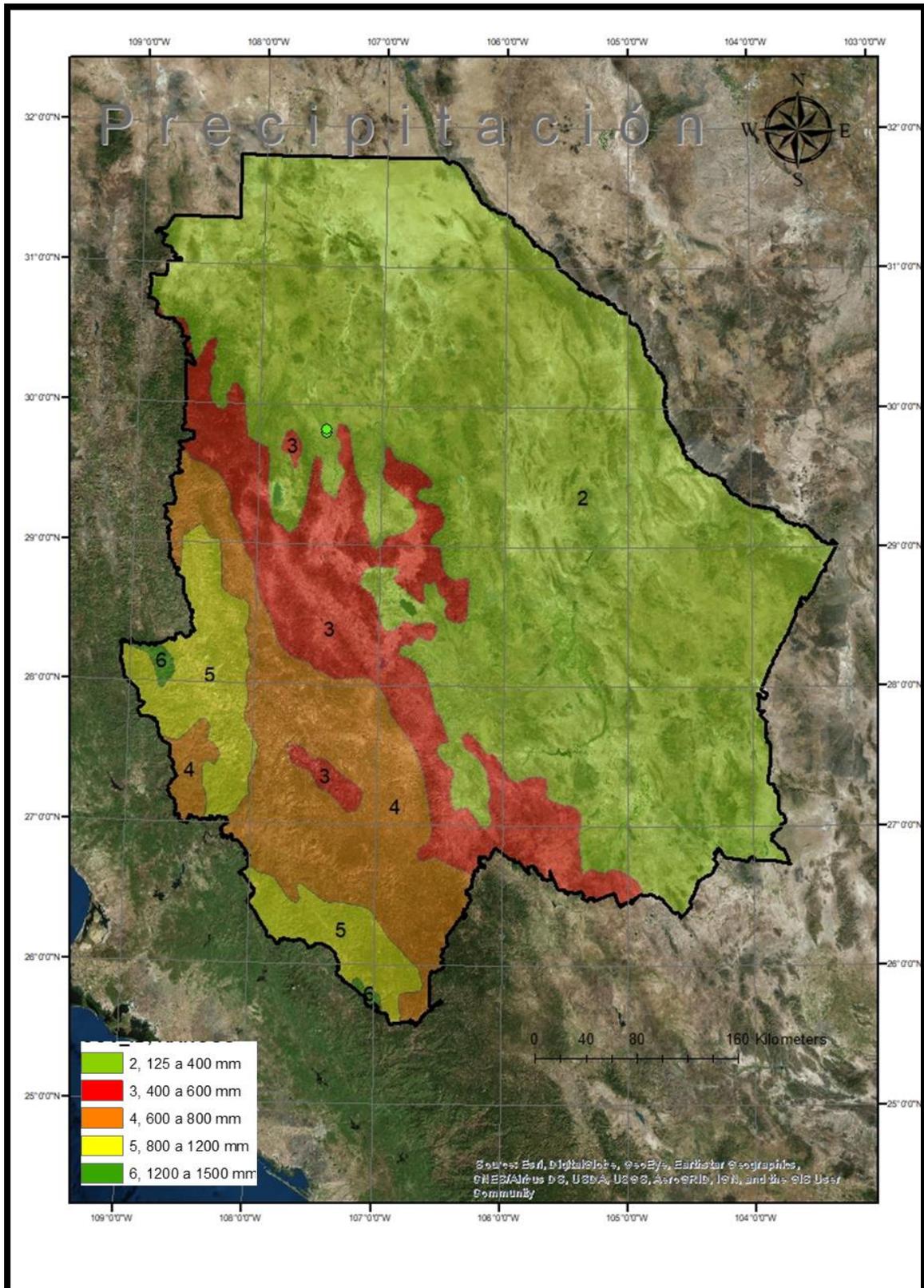


Figura 14. Precipitación en el estado de Chihuahua (INEGI, 2017).

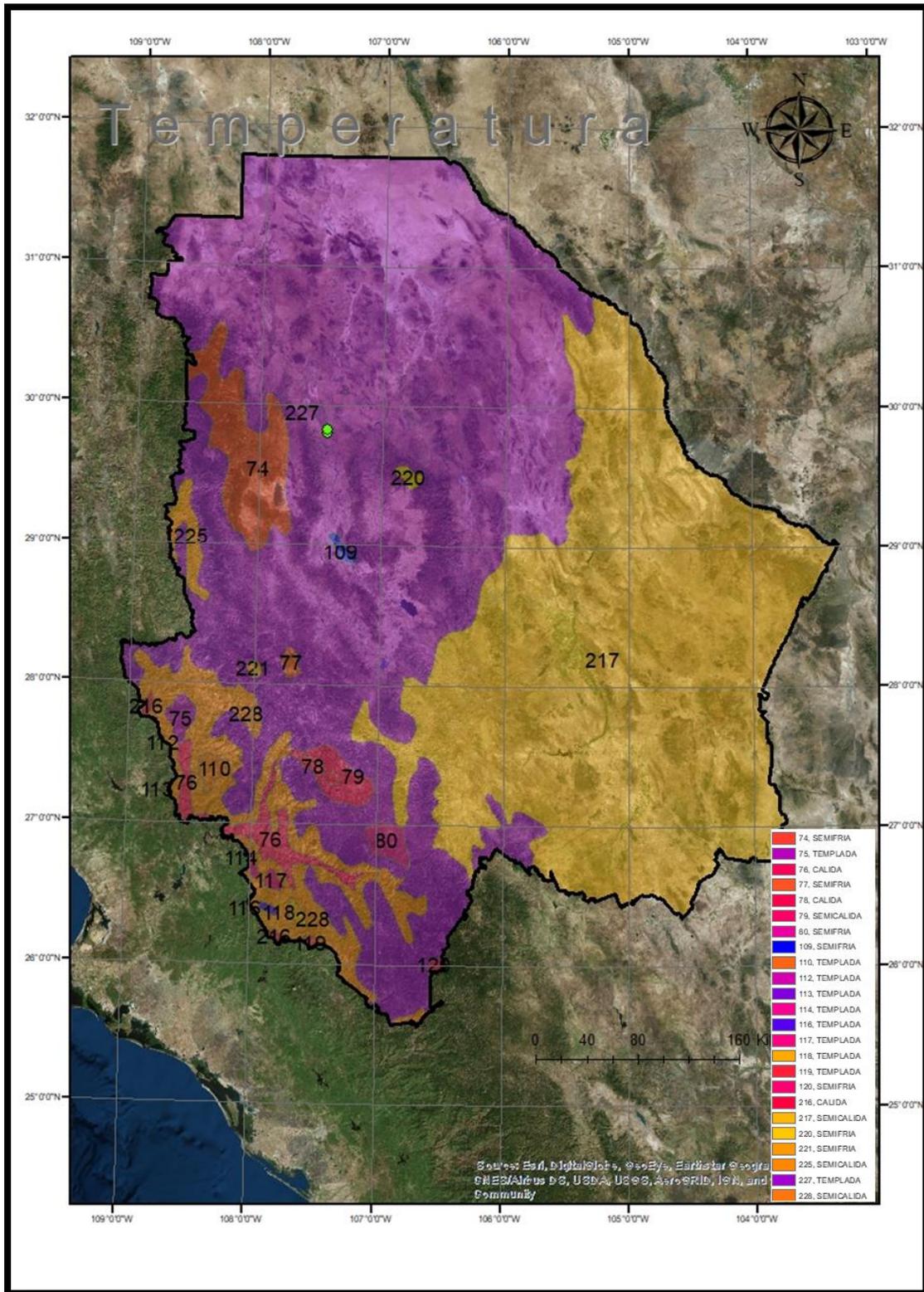


Figura 15. Temperatura en el estado de Chihuahua (INEGI, 2017).

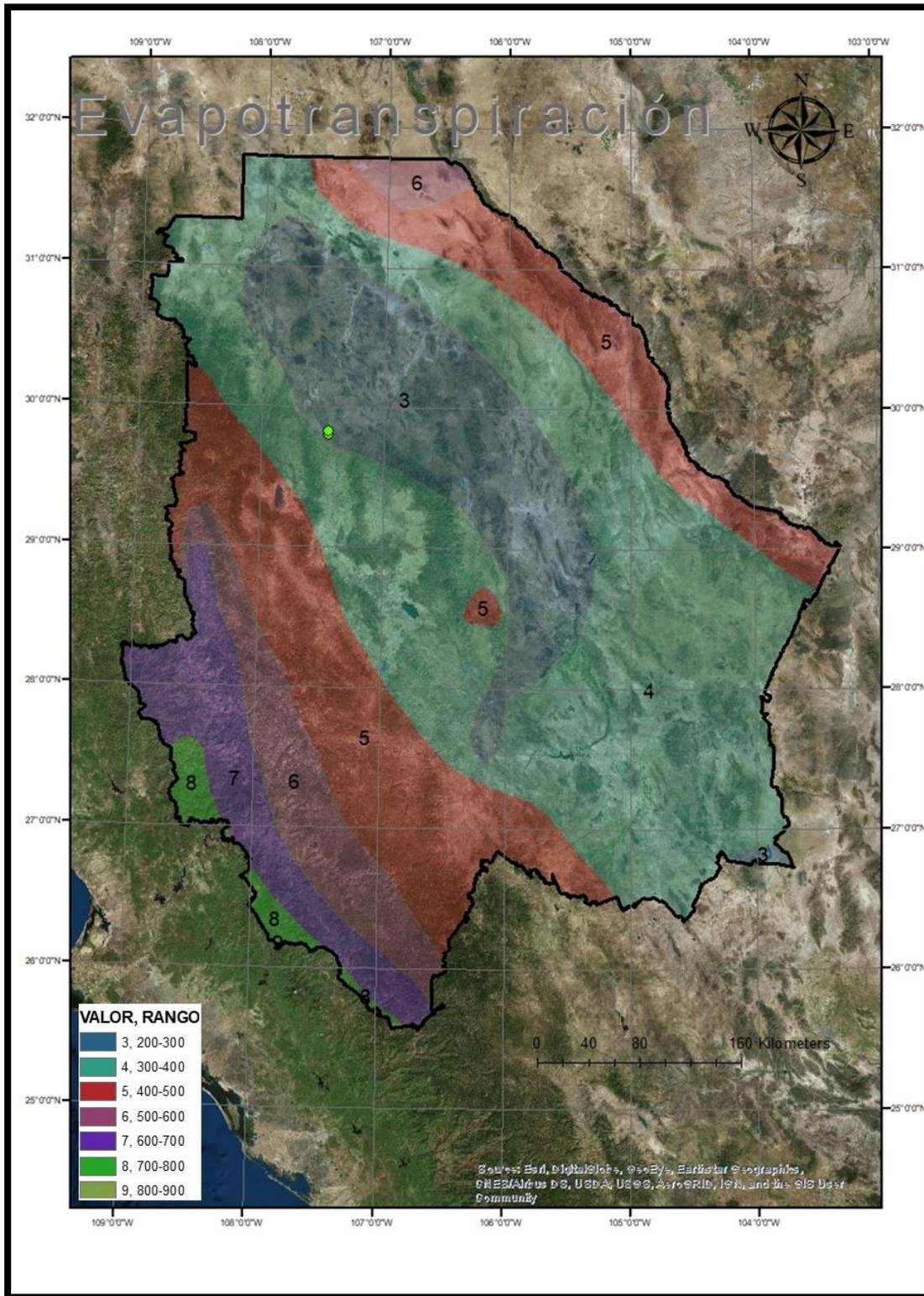


Figura 16. Evapotranspiración en el estado de Chihuahua (INEGI, 2017).

II.7 Edafología

En el estado de Chihuahua existen 16 tipos de suelo, mismos que se organizan de mayor a menor de acuerdo a su extensión territorial de la siguiente manera:

Regosol (25.46%), Xerosol (20.94%), Litosol (20.67%), Feozem (15.89%) Yermosol (4.59%), y entre los que abarcan menos del 3% del territorio estatal en orden de dominancia son el Cambisol, Luvisol, Renzina, Solonchak, Vertisol, Solonetz, Planosol, Fluvisol, Ranker, Castañozem, Chernozem (INEGI, 2003), **(Figura 17)**.

Generalmente la infiltración de agua en el Estado es buena, ya que dominan los suelos de textura media (80% del territorio estatal) y en menor porcentaje las texturas gruesa y fina (6.63% y 7.94%, respectivamente). La infiltración es un fenómeno superficial que se considera parte del ciclo hidrológico donde se pasa por un proceso por el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el interior de la tierra (Hillel, 1971). Consiste en tres fases: la entrada desde la superficie del terreno, almacenamiento dentro del suelo y transmisión dentro del suelo (Dunne y Leopold, 1978).

En la primera fase el suelo satisface su necesidad de humedad cerca de la superficie; una vez llegado a cierto punto de humedad ésta pasa a formar parte del agua subterránea donde el suelo está saturado (Gutiérrez et al., 1990), ya el suelo saturado, el agua se acumula en la superficie y dependiendo de algunos factores como la pendiente, el agua comienza a escurrir y a su vez comienza la infiltración que ocurre por medio de la fuerza gravitacional o capilar.

La infiltración provee de agua a las plantas, alimenta el agua subterránea y a la mayoría de los ríos y arroyos perennes. Cuando la tasa de infiltración es alta los riesgos de inundación y la erosión del suelo disminuyen, lo cual fomenta el crecimiento de los cultivos. Algunos factores que determinan la infiltración pueden ser la textura del suelo, cobertura vegetal, contenido de humedad inicial, compactación, uso de suelo, aire atrapado y temperatura (Aparicio, 2005).

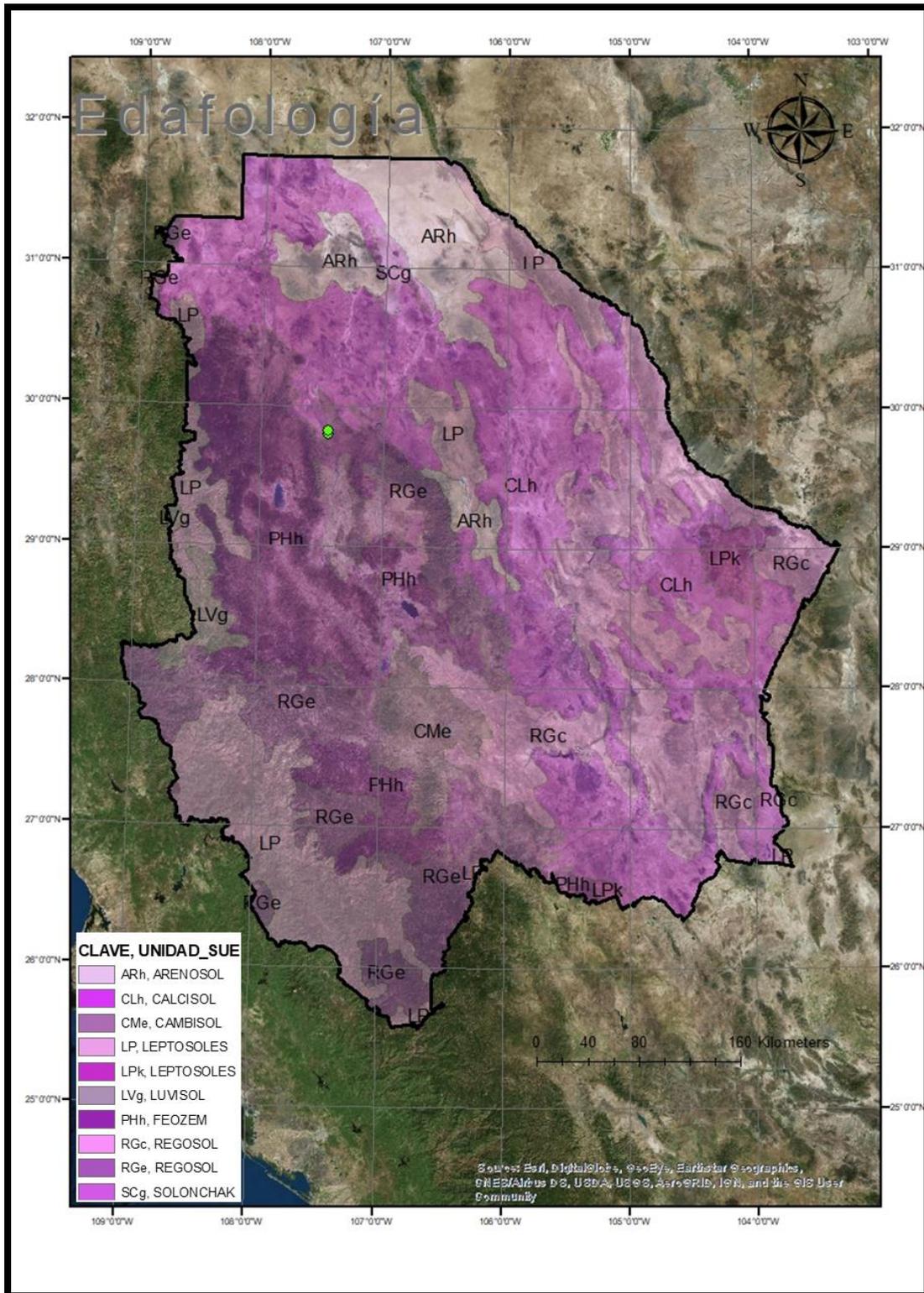


Figura 17. Edafología en el estado de Chihuahua (INEGI, 2017).

II.8 Agricultura

En los últimos años la agricultura ha tenido un gran impacto en el medio ambiente generando contaminación por nitrógeno, fósforo y magnesio en ríos, lagos, el agua subterránea, erosión del terreno, agotamiento de minerales del suelo y salinización del suelo en zonas áridas. Los efectos adversos que genera la agricultura son la causa de que el suelo pueda quedar desértico y se tenga que abandonar el terreno para buscar uno nuevo y seguir cultivando.

Debido a estos efectos adversos que genera la agricultura se formó la carrera de agronomía o ingeniería agronómica, la cual es el conjunto de ciencias aplicadas para la práctica de la agricultura y ganadería. Esta ciencia tiene como objetivo mejorar la calidad de los procesos de la producción agrícola ya que estudia los factores físicos, químicos, biológicos, económicos y sociales (Sáez, 2010).

En la **Figura 18** se observa la distribución de la agricultura en el estado de Chihuahua, siendo dominantes la agricultura de temporal anual en la zona montañosa. La agricultura de temporal es aquella en la que la producción agrícola depende de las condiciones de lluvia para producir y no se cuenta con riego o estructuras como invernaderos. La agricultura de riego anual comprende principalmente el área noreste del Estado y algunas partes del centro y corresponde a la agricultura donde el riego es permanente o semipermanente durante todo el año.

II.9 Volumen de extracción del agua subterránea

En el estado de Chihuahua existen diversas áreas agrícolas repartidas en todo su territorio y también cuenta con distritos de riego. El volumen de extracción varía en función a su localización, encontrándose que, para la zona del Río Santa María la extracción es de 0.0022 hm³, y para el área del Río Bravo se presentan valores de 2,811.94 hm³ (**Figura 19**). Los mayores volúmenes de extracción se concentran en el centro y sur del Estado.

El agua subterránea en el estado de Chihuahua se destina principalmente a actividades agrícolas, donde, la extracción media anual es de 3,130.71 hm³/año,

la recarga media anual de 4,387.70 hm³/año y por ende su disponibilidad es 1,256.99 hm³/año (Comisión Nacional del Agua,1999).

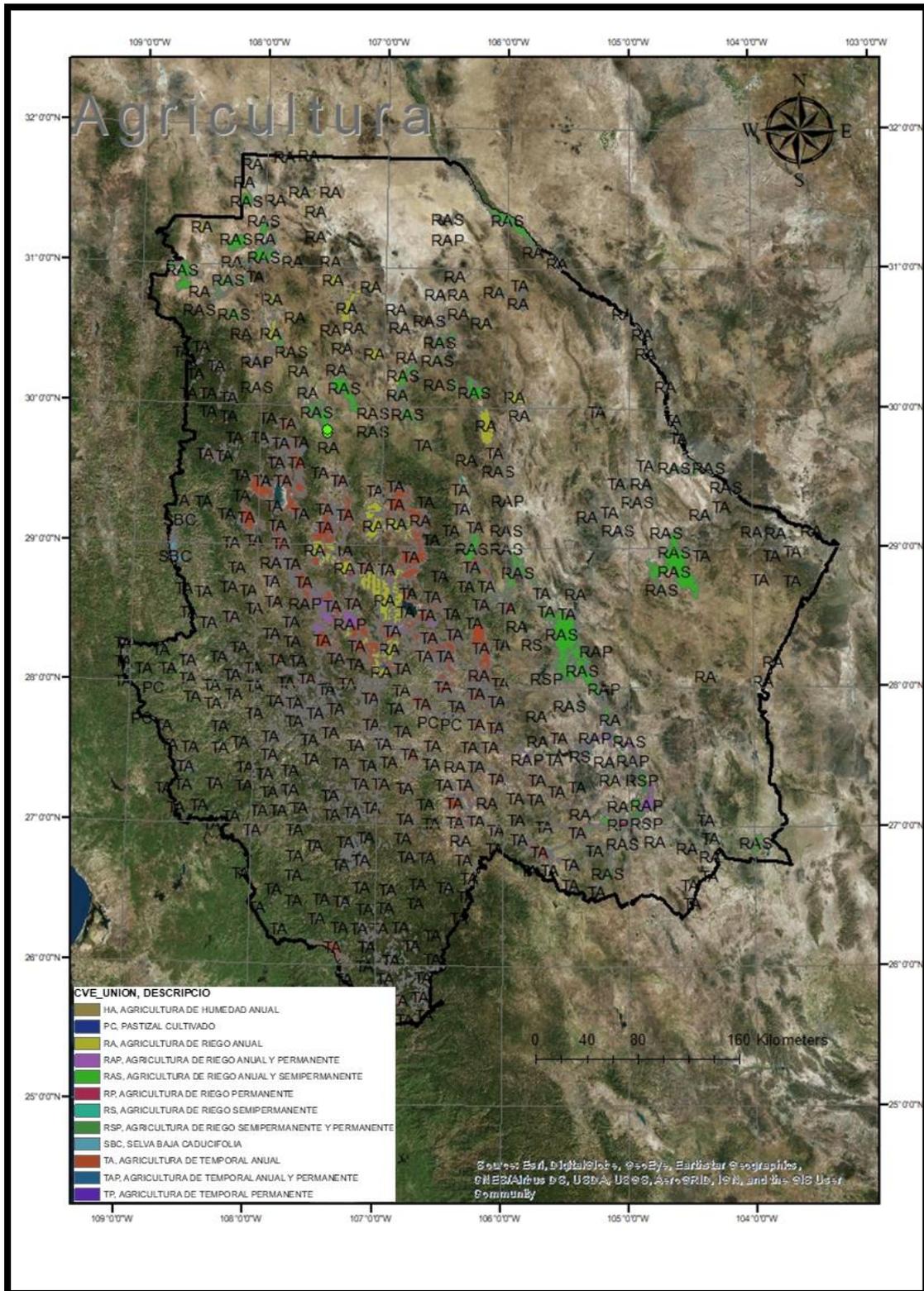


Figura 18. Agricultura en el estado de Chihuahua (INEGI, 2017).

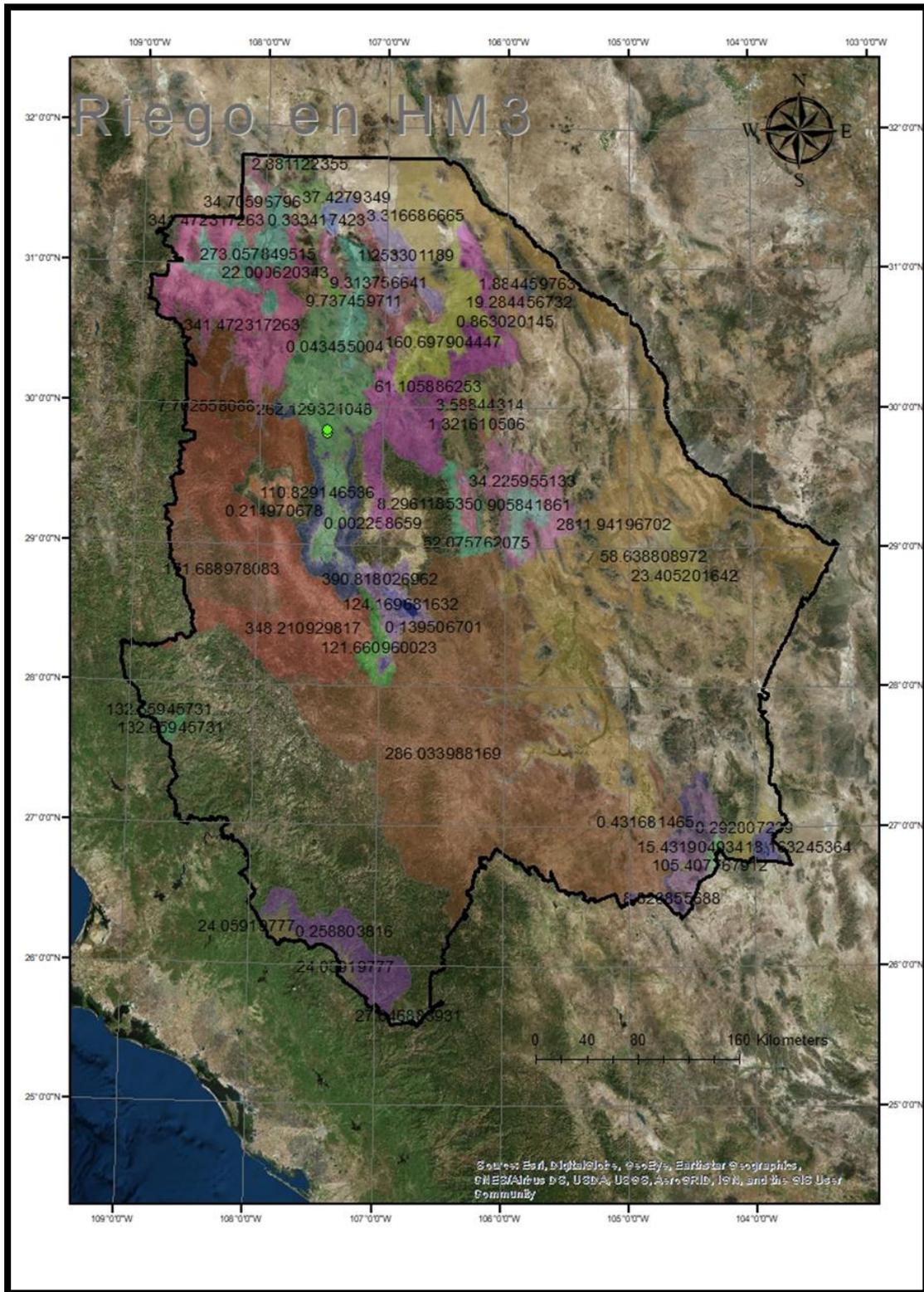


Figura 19. Volumen de extracción del agua subterránea (hm³/año) por zona, para el estado de Chihuahua (INEGI, 2017).

III. METODOLOGÍA

III.1 Recopilación y análisis de la información

Dentro de la metodología del presente estudio se realizó una búsqueda de información, la cual se hizo a través de la lectura de diversos artículos, libros y distintas opiniones respecto a dicho tema. Lo que arrojó información necesaria para el desarrollo de los apartados que se han explicado a lo largo de esta investigación.

Posteriormente, dentro de la recopilación y análisis de la información relacionada con esta tesis, se identificaron diversos artículos con información similar y útil referente a los principales tipos de cultivos, tales como: la manzana, el chile verde, algodón, cebolla, sorgo, maíz, nuez, durazno, uva y algunos tipos de avena como forraje y grano.

De igual manera, fue necesario conocer los tipos de riego que se requieren como mejor opción para cada cultivo, es decir, conocer e identificar la forma en que se debe de regar un tipo de cultivo de acuerdo al ahorro hídrico y la precipitación de la zona, así mismo, se deben tomar en cuenta los beneficios que trae el riego al suelo en el que se tiene el cultivo.

La precipitación puede ser un indicativo de la disponibilidad de agua superficial y subterránea, así como también, puede ser un reflejo de la profundidad del nivel del agua subterránea.

La piezometría se utiliza para conocer los niveles de agua subterránea en las diferentes zonas, de esta manera se puede cuantificar la disponibilidad del agua en el sitio y la posibilidad de tener un cultivo productivo. Así mismo, se pueden utilizar para estimar el consumo de energía en la extracción de agua subterránea, mediante la utilización de bombas alimentadas por: energía solar, gasolina, diésel y electricidad. Con ello, se puede determinar el tamaño de la planta solar en función de las necesidades eléctricas del Estado.

Por lo que la radiación solar es otro aspecto a tomar en cuenta, ya que contribuyó en la determinación de la zona idónea para la generación de energía solar fotovoltaica. De la misma manera, las horas pico, permiten identificar las mejores áreas para el establecimiento de una planta solar.

Posteriormente uniendo cada uno de los elementos anteriormente descritos, conforman una investigación para beneficio del estado de Chihuahua. La información básica se obtuvo de INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) y la CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad). De estas instituciones se descargaron mapas digitales de hidrografía, climatología, precipitaciones, evapotranspiración, entre otros, lo que permite presentar la información de manera visual.

III.2 Necesidades hídricas de los principales cultivos del estado de Chihuahua

Para determinar las necesidades hídricas de los principales cultivos del estado de Chihuahua se utilizó información recopilada en INEGI y CONABIO, mismas que contienen los diferentes tipos de cultivo que existen actualmente en el Estado. Con ello se pueden conocer las necesidades de cada zona, tales como; fuente de agua cercana, un terreno más favorable, precipitación y clima favorable. El clima puede variar de acuerdo a distintos factores como la radiación solar, el uso de suelo, el viento, la temperatura, entre otros.

Posteriormente, se investigó sobre cada uno de los cultivos, sus características, el ambiente ideal para las plantaciones, su crecimiento y la necesidad de humedad del suelo, los cuales son elementos importantes para diseñar un sistema de control de humedad óptimo para los cultivos.

Una vez recopilada toda la información se describieron las necesidades de cada uno de los cultivos mencionados en esta tesis, para obtener un mejor panorama de los problemas en el riego actual, lo cual se utilizó para determinar la manera en la que se diseña un sistema de riego óptimo para cada cultivo.

III.3 Sistema de riego

Basado en la información obtenida de los requerimientos para los principales cultivos del estado de Chihuahua como lo son: la localización del cultivo, temperatura, condiciones climáticas, precipitación, uso de suelo entre otras, se recolectó información sobre diferentes tipos de sistemas de riego, desde los manuales hasta los mecánicos para obtener la mejor opción para cada uno de los cultivos.

Se buscó un sistema de riego adecuado para los diferentes tipos de riego existentes, donde se tome en cuenta el gasto hídrico, para obtener un rendimiento adecuado en función de los diferentes tipos de suelo del Estado, las zonas con buena radiación solar, para que el sistema de riego funcione electrónicamente por medio de un sistema de energía solar fotovoltaico, la precipitación promedio, para calcular el monto de agua que se utilizará por mes, la temperatura y las necesidades hídricas de cada cultivo.

Al contar con todo lo anterior, se diseñó un sistema de riego autónomo y autosustentable que cumpla con las necesidades hídricas de cada cultivo con un riego óptimo. Debido a la implementación de este sistema se puede prever que existirá un ahorro tanto en el uso del agua como en la generación de gases de efecto invernadero, protegiendo al medio ambiente al no utilizar combustibles fósiles.

III.4 Sistema de control de humedad

Para optimizar el sistema de riego se utilizó un sistema de control de humedad, el cual contiene diferentes elementos, siendo uno de los principales: los sensores, los cuales permiten controlar la cantidad de humedad del suelo, acorde a las necesidades de cada cultivo. Los nodos de conexión inalámbrica por internet, se utilizan para obtener información en tiempo real; y un dispositivo electrónico para recopilar y almacenar los datos obtenidos.

Por lo tanto, se buscaron diferentes tipos de sistemas efectivos y sensores de humedad, así como, cuál de ellos es el más fiable, los distintos tipos de aparatos electrónicos que pueden enviar las señales a un servidor y la integración de todos los elementos en un solo sistema.

III.5 Configuraciones de profundidad del nivel estático

Se recopilaron las configuraciones de profundidad al nivel estático en las zonas donde se localizan los principales cultivos del estado de Chihuahua, con lo cual se observaron las áreas más proclives a tener un mayor gasto eléctrico conforme a la profundidad de extracción del agua, ya que entre más profundo mayor energía eléctrica es utilizada.

III.6 Consumo de energía eléctrica para la extracción del agua subterránea

La cuantificación del consumo de energía eléctrica en el riego mecánico para los principales cultivos del estado de Chihuahua se obtuvo de la SAGARPA, en la Subdelegación de Planeación y Desarrollo Rural, Programa de Planeación, la cual esta consignada en el estudio “Requerimiento hidráulico para agricultura en Chihuahua” (SAGARPA, 2017).

Con estos datos se calcularon los kilowatts por hora, que corresponde a la unidad que se utiliza para calcular un sistema solar fotovoltaico. Con dicha información se pudo diseñar una planta de energía solar fotovoltaica total o en su caso, para un distrito de riego e individual para cada pozo, así como también, su respectivo sistema de control de humedad.

III.7 Sistema de energía solar fotovoltaica

Se diseñó un sistema de energía solar fotovoltaica que cumple con las necesidades de energía eléctrica del uso de bombeo en pozos del estado de Chihuahua. Para ello se consideraron tres opciones: la primera corresponde a una planta central que suministre toda la energía necesaria, misma que se

encarga de transmitir electricidad a la red suministradora. La segunda es la opción de una granja solar por distrito de riego. La tercera opción fue el establecimiento de un sistema de energía solar fotovoltaica por pozo.

Es importante conocer el tipo de celda solar que se va a utilizar, la cual recibirá la radiación del sol para convertirla en energía directa. Para ello, se generó un mapa del estado de Chihuahua con la distribución de la radiación solar.

El inversor, el cual transformará la energía recibida por el panel en energía alterna, también contará con sus certificados correspondientes, de igual manera se requiere conocer la estructura a utilizar ya sea estructura fija, de rastreo en un solo eje o en dos ejes, ya que los marcos de los paneles son de aluminio y tiene que ser un elemento compatible al aluminio para no causar problemas de corrosión. Por último es primordial conocer la localización de la zona ideal para instalar este tipo de sistema.

Finalmente, para calcular el tamaño del sistema fotovoltaico con módulos de 370 w, se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$P = G/Tp$$

P = Numero de paneles

G = Gasto en kilowatts hora

Tp = Tamaño del panel solar en kilowatts hora

$$I = G/Ti$$

I = Numero de inversores

G = Gasto en kilowatts hora

Ti = Tamaño del inversor en kilowatt por hora

$$Ts = I*Ti$$

Ts = Tamaño del sistema

$$As = P*4.5m^2$$

As = Área que ocupara la granja solar fotovoltaica

4.5 m² = Constante que se considera para estos sistemas donde se utilizan estructuras con rastreador de radiación

$$H_s = G * R * R_a * D$$

H_s = Ahorro aproximado mensual
G = Gasto en kilowatts hora
R = Precio por kilowatt actual
R_a = Radiación de la zona
D = Días del mes

Es importante considerar que los materiales para un sistema solar fotovoltaico se cotizan en dólares, por lo que se realizó el cálculo aproximado en dólares del costo, utilizando la siguiente fórmula y datos obtenidos de diferentes proveedores.

$$C = C_w * G * 1000$$

C = Costo del sistema en dólares
C_w = Costo de la construcción por watt
G = Gasto total en kilowatts por hora

Por último, la recuperación de la inversión se calculó considerando el costo y el ahorro mensual.

$$R_i = C / H_s$$

R_i = Recuperación de la inversión en meses
H_s = Ahorro aproximado mensual

III.8 Cuantificar el ahorro hídrico y gases contaminantes que se emiten al planeta

Con la información obtenida en los distintos temas, se cuantificó el ahorro hídrico promedio de Chihuahua y de un distrito de riego, al implementar un sistema de riego óptimo con sensores de humedad e ilustrando como se conecta entre sí dicho sistema diseñado.

Una vez obtenido el ahorro hídrico para los diferentes sitios y teniendo en cuenta el diseño de un sistema solar fotovoltaico, se cuantificaron los gases contaminantes que se dejarían de emitir al uso el sistema de energía solar fotovoltaica aquí propuesta y diseñado.

IV. RESULTADOS

IV.1 Necesidades hídricas de acuerdo a los principales cultivos del estado de Chihuahua

Para las necesidades hídricas de los principales cultivos del estado de Chihuahua el riego es un aspecto fundamental. Como se ha comentado anteriormente, el riego en la agricultura es el mayor consumidor de agua en dicho Estado.

Uno de los cultivos de mayor producción es la avena, misma que en su riego debe satisfacer la necesidad de campo de cubrir los primeros 90 centímetros de la capa de suelo. Aproximadamente cada riego está entre 5 y 12.5 cm, donde influyen varios aspectos como el clima, el tipo de suelo, precipitación, entre otras.

El resultado de un estudio realizado sobre el cultivo de avena (Chávez, 1999), menciona que el riego por goteo proporciona los mayores ahorros de agua, dado que la avena es un cultivo que se da en suelos profundos y arcillo-arenosos, donde se retiene la humedad con mayor facilidad que en otros tipos de suelo.

Es necesario verificar que el suelo se encuentre en estado húmedo, principalmente los centímetros de la capa del suelo al pasar el amacollamiento. El espesor de humedad debe permanecer entre 50 y 80 centímetros, variando según el estado de la siembra y las condiciones de clima que se tengan. Para finalizar, el riego se debe programar entre el inicio y el final del espigamiento, lo que depende del suelo y el tipo de riego.

Otro de los principales cultivos en el estado de Chihuahua es la cebolla; para sembrarse se hacen surcos pequeños manualmente a lo ancho de las camas, cada una de las cuales debe llevar una separación de 7 cm y una profundidad de 1.5 cm. Una vez que los surcos se encuentren listos se procede a rallar y sembrar la semilla.

Recientemente se ha usado en mayor proporción el riego por aspersión para la cebolla, ya que reduce la muerte de plántulas en etapa crítica, y a su vez, éstas crecen mejor, debido al aumento de humedad relativa en el aire, lo que disminuye la presión del vapor en el ambiente (Osuna, 2006; Osuna *et al.*, 2007).

Para el cultivo de la cebolla también se utiliza el fertirriego por goteo, el que tiene por ventaja la reducción en riesgos de salinización, la reducción en el consumo de energía, el mejoramiento en la aplicación de agroquímicos, menor fluctuación en la concentración de nutrimentos en el suelo a lo largo de la vida del cultivo, por último, la facilidad para adaptarse a los diferentes requerimientos y las condiciones climatológicas.

Con el método anterior se ha llegado a un ahorro de agua de 25% y de energía en un 15%. La superficie cultivada se incrementó un 18%, así como también la producción ha aumentado un 30% y el volumen de productos agrícolas de exportación en 28% (Contijoch, 1998).

En el caso de la cebolla, Clinton *et al.* (2000) señalan que al utilizar el riego por gravedad es complicado hacer óptimo el rendimiento de la cebolla; lo anterior, debido a la poca eficiencia de la aplicación y al nivel bajo de uniformidad de distribución de la humedad.

Además, con el riego por gravedad se dificulta evitar amplias oscilaciones en el potencial de agua del suelo, ya que, con periodos largos de mucha humedad, causa estrés a la planta y genera el ataque de enfermedades en su raíz y partes aéreas.

Al utilizar el sistema de riego por gravedad en surcos, generalmente el momento de riego se basa en el agua disponible total del suelo, siendo ésta la que se encuentra entre la capacidad del campo y el punto de marchitamiento permanente (Hillel, 1980; 2003).

Una planta eficiente en el aspecto del uso del agua para su producción es el maíz, ya que se necesitan alrededor de 350 litros de agua para producir un kg

de materia seca. Lo que ocasiona que los requerimientos de riego de acuerdo con los valores teóricos totales se sitúen en torno a 5500-8000 m³/ha según las zonas, la climatología y el tipo de riego (Villaú, s/f).

Las necesidades de agua mencionadas se encuentran directamente relacionadas con la morfología de la planta, que posee un sistema radicular fasciculado, que, dependiendo de la naturaleza del suelo, podrá crecer de forma adecuada hasta 90-100 cm, lo que hace que requiera una recarga del perfil del suelo constantemente al inicio del ciclo de riego.

Para el caso del maíz, cuando se cultiva de manera intensiva, se vuelve en el momento de la floración sumamente frágil a algún déficit de agua, provocando que el rendimiento del maíz pueda disminuir. Aún más, bajo condiciones del clima variable, los rendimientos altos y estables se alcanzan solo por medio de un riego eficiente.

Al utilizar el riego por goteo se puede aumentar la productividad del cultivo de maíz, siempre y cuando se obtenga como resultado un mayor rendimiento y una menor utilización de agua y fertilizantes (NaanDanjain Irrigation 2011). Al utilizar el riego por goteo se llega a mejorar el rendimiento entre un 10-20% a causa de la uniformidad y a la fertilización eficiente.

Otro caso sujeto a variación en su producción es el de la manzana. Según el INEGI (2005) el 95% de su producción se da bajo condiciones de riego, casi siempre, mediante la extracción del agua por bombeo, en donde, la eficacia de todo el proceso puede ser igual o menor al 65%, llagando a emplear hasta 1.6 m³ de agua por kg de manzana producida.

Algunas de las técnicas que se utilizan para reducir las pérdidas del agua por evaporación en la producción agrícola son el uso de acolchonado con plástico, cubiertas orgánicas al emplear pajas de diversas fuentes (Parra *et al.*, 2002a e Ibáñez, et al., 2000) y la utilización de riego por goteo subsuperficial junto al tronco del árbol, entre algunas otras.

A pesar de las estrategias descritas, es necesario evaluar en campo los factores que inciden en la cantidad de agua usada y en la productividad del cultivo, debido a que cada huerto puede variar en cuanto al tipo y profundidad de suelo y porta injerto utilizado (Atkinson *et al.*, 1999).

Un método de riego para la manzana es el uso del déficit de riego controlado (DRC); dicho método fue propuesto por primera vez por Chalmers *et al.* (1981). Éste consiste en reducir la cantidad de agua aplicada al árbol en una etapa vegetativa específica, donde no se afecte la producción o la calidad del fruto (Naor *et al.*, 1999). Al momento en que el brote de un manzano tiene un crecimiento acelerado y disminuye su tasa de crecimiento, el fruto que ha crecido de manera lenta en el periodo aumenta su tasa de crecimiento rápidamente. A consecuencia de lo anterior, un DRC al inicio de la temporada reduce el crecimiento del brote sin afectar el crecimiento del fruto.

Algunos investigadores (Kilili *et al.*, 1996; Mpelasoka *et al.*, 2001 y Leib *et al.*, 2006) indican que el DRC disminuye el tamaño del fruto y el rendimiento, pero mejora su calidad al incrementar la concentración de sólidos solubles, la materia seca y la firmeza. Después de analizar lo anterior es preciso mantener un estricto control sobre las pérdidas de agua por evaporación en el huerto, lo que es un aspecto a investigar aún deficiente en el país.

El siguiente cultivo de relevancia es el de la nuez, que es una actividad de alto crecimiento en México, sobre todo en los estados del norte, debido a su clima, edafología y al hecho de tener la frontera con Estados Unidos de América, que mejora su mercado. El origen del nogal fue en el sureste de Estados Unidos de América y del norte de México (Gray, 1973); el cultivo encuentra condiciones favorables en el noreste y parte central de México (Herera y Clevenger, 1996), rara vez crece en terrenos planos con un sistema de drenado inadecuado (Eliosa-Martínez, 2012).

Es importante para la supervivencia, crecimiento y una producción redituable y de mejor calidad en el nogal, el riego que se dé a la planta. Un programa de riego

adecuado se requiere para que los árboles jóvenes puedan alcanzar el tamaño ideal para comercializar su producción; éste no solo asegura la disponibilidad del agua para los árboles, sino que eficientiza el manejo del agua, para prever la aparición de sobre riegos o encharcamientos.

En México los cultivos de nogal dependen casi el 100% de agua subterránea. Sea cual sea el tipo de riego que se utilice, se requiere comprender que es necesaria la presencia del agua para aliviar el estrés en el árbol; lo anterior se logra según la sensibilidad del riego, al considerar diversos aspectos que interfieren en el mismo, como el suelo, el clima y el mismo árbol (Godoy, 1994).

El consumo de agua en el nogal varía en función de la edad del árbol y de los meses del año. Por lo que, durante el primer año y para los meses de junio, julio y agosto se da un consumo de agua más alto en comparación de otros meses, siendo de 9.5 a 10.7 litros/día/árbol, mientras que en el segundo año radica en los meses de junio y julio, donde se aumenta hasta el rango de entre 39 y 44 litros/día/árbol.

De los distintos tipos de riego que existen, algunos son utilizados para los nogales, su eficacia puede variar de acuerdo a los factores anteriormente mencionados, es decir, varios tipos de riego, se consideran óptimos según el contexto de las plantas. En el caso del micro aspersión o aspersión se debe considerar un volumen de entre 30 y 120 cm del estrato del suelo más un volumen extra que depende de la eficiencia del sistema de riego.

Al momento de utilizar un sistema de riego superficial, se debe aplicar el riego en un área de 4 m² en el primer año. Lo anterior se logra al construir topes alrededor del árbol con una distancia de 2 m entre cada tope. El riego se aplica al momento en que el estrato de suelo de 0 a 90 cm tenga una humedad inferior al 50%. Al segundo año se debe aplicar en un área de 12 m² igualando el método de topes, con un espacio entre ellos de 4 m. Del tercer año en adelante el riego se basará en el diámetro del tronco o de la copa del árbol, número de árboles por hectárea y tipo de suelo (Godoy, 1994).

Otro de los cultivos del estado de Chihuahua es la uva. Es una de las plantas que se cultiva desde épocas remotas, tiene varios usos como el consumo fresco, en la industria de confituras, jugos y vinos. De acuerdo con las escrituras egipcias, el cultivo de la uva se remota a unos cinco mil años antes de nuestra era (De la Fe et. al., 2001).

Para la producción de la uva es necesario tomar en cuenta distintas condiciones edáficas y climatológicas, ya que tiene una alta resistencia a las heladas invernales. Sin embargo, el crecimiento de la planta radica en contar con una temperatura que se encuentre entre los 15 y 25°C para su desarrollo ideal; así mismo, la planta crece de una mejor manera en los suelos franco-arenosos con materia orgánica y suficientemente drenados, de igual manera la planta arbustiva o vid (SAGARPA, 2017).

La calidad de un viñedo se centra en la contención de la radiación solar y el conjunto de la vegetación, de esta manera se logra maximizar la captación solar y colabora en el reparto homogéneo en el conjunto de la vegetación. Lo que se da a conocer como manejo de la vegetación, mismo que va desde el diseño del sistema de conducción y las intervenciones posteriores. Además de eso, como en los otros cultivos, los aspectos de mayor relevancia son el tipo de suelo y las técnicas de cultivo, además de la elección del porta injerto, densidad de plantación, tipo de conducción, sistema de poda, operaciones en verde, fertilización y riego (Martínez de Toda, 2008).

La uva se adapta bien a los climas secos y por esta razón el riego aun es algo que se discute en cuanto a su aplicación; solo es utilizado en ciertos países. El requerimiento de agua de la uva por lo general está entre los 500 mm anuales y se podría regar con menos de 300 mm anuales. Este intervalo depende del clima de la zona y el tipo de suelo. La necesidad hídrica de la uva hace que el riego tenga ventajas y desventajas, las cuales dependen de su aplicación. Si el riego se aplica adecuadamente puede haber mayor intensidad en el crecimiento, aumento de la actividad fotosintética, acumulación de reservas, adelanto en la formación de la cepa, aumento del peso de cosecha, producción seguida en la

acumulación de azúcares y cuando el riego es aplicado de forma inadecuada se producen excesos de vigor con riesgo de corrimiento, disminución de la fertilidad y alargamiento del ciclo vegetativo, incremento en la presión de enfermedades fúngicas y que la uva sea más ácida al presentar menos concentración de azúcar. Por estas razones se recomienda que el tipo de riego sea deficitario para poder controlar el crecimiento vegetativo, es decir, riego variado para mantener la planta en esfuerzo y mejorar la eficiencia del uso del agua, la calidad del fruto y tener un vid equilibrado donde se mantenga controlado y moderado el crecimiento de las uvas (Sotes, 2011).

Otro cultivo más del estado de Chihuahua es el durazno, del cual en México no se tiene un registro de sus inicios, pero algunos estudios reportan que en la década de los 50's existían 4,616 hectáreas, de las cuales el estado de Chihuahua contaba con 790 de éstas (Nava, 2005).

El cultivo del durazno prefiere suelos frescos, profundos y arenosos para evitar los encharcamientos de agua, y suelo con profundidad entre 1-1.5 m o mayores. El clima en el que se desarrolla mejor es en zonas templadas, ya que no es muy resistente al frío dado que muere en temperaturas menores a los -20 grados Celsius; la temperatura óptima para su crecimiento está entre 21°C y 27°C (Nava, 2005).

El riego, además de asegurar y regular la productividad, también ayuda en la calidad de los frutos. El durazno tiene una necesidad hídrica anual de 60-100 hectolitros (hl) para producir 20 kg de materia seca, por lo tanto, una hectárea de melocotonero en su periodo vegetativo consume de 2,500 a 4,000 m³ y la profundidad a la cual debe de estar húmedo el suelo es de 80 cm (Nava, 2005).

Los sistemas de riego por surcos y micro aspersion puede adaptarse a cualquier tipo de terreno y utilizan entre 10,000 y 12,000 m³/ha, sin embargo, incrementa la incidencia de enfermedades criptogámicas (Una enfermedad criptogámica es un padecimiento de las plantas causada por un hongo u otro organismo filamentoso parásito (Verdu, 1986)). Por lo anterior el método más usado es el sistema de riego por goteo con un caudal aproximado de 2-3 l/hora (Nava, 2005).

Por último, pero no menos importante está el algodón. Ésta planta es típica de las zonas cálidas donde su temperatura óptima es de 20° C para su germinación, de 20°C a 30° C para floración, y entre 27° C y 30° C para su maduración; aunado a esto, el suelo donde se desarrolla mejor tiende a ser profundo y permeable (arcilloso). Esta planta ocupa riego durante todo su desarrollo (SAGARPA, 2017).

El riego para el algodón comienza una vez que el suelo está a 40 – 50% de humedad a una profundidad de 90 cm y el rango de necesidad hídrica está entre 360 y 900 mm anuales. Los tres métodos más usados son por surcos, por goteo y aspersores; los más eficientes son por goteo y por aspersión. Una de las ventajas del sistema por goteo es el ahorro de agua y tiene un mejor rendimiento. Lo usual es un lateral para dos hileras de algodón, separando las hileras de 75 a 100 cm, el intervalo de riego deberá ser cada 2 a 4 días dependiendo de la edafología, suelo, clima, precipitación y todos los factores a considerar en el riego. El riego por aspersión conlleva intervalos más largos y un mayor volumen de agua en cada riego con necesidades estacionales entre 400-500 mm (NaanDanJain, 2014).

Como se mencionó, en cuanto al tipo de riego, el más recomendado para los principales cultivos del estado de Chihuahua y el más eficiente, es el sistema de riego por goteo con un rendimiento del 90 al 95%, mientras que por otros métodos como el de la microaspersión se tiene el 85% (Lotta et al., 2015) y el de los surcos se tiene entre un 60-65% (Walker, 1987).

Por consiguiente, el sistema adecuado para los principales cultivos del estado de Chihuahua es el sistema de riego por goteo, el cual se puede adaptar a la superficie a cultivar.

Algunas de las principales ventajas del sistema de riego por goteo es el ahorro de agua, la igualdad al aplicarse agua en todos los terrenos, ya sean regulares o irregulares, el posible aumento en la superficie a regar, menor presencia de

malezas, ahorro en trabajos extras como quitar malezas, preparación para el riego o la construcción de surcos o caminos para conducir el agua, ahorro de mano de obra, debido a que solo se necesita un solo operador en algunos casos, fertirriego y la posible automatización del sistema.

Asimismo, al igual que todos los sistemas de riego, tiene sus desventajas, como el costo elevado al adquirir un sistema de riego por goteo, la dependencia a la electricidad y el consumo de ésta, la necesidad de un sistema de filtrado, el mantenimiento que se le tiene que dar, la mano de obra especializada, el costo del diseño y la tarea de reparar algunas mangueras por daños de trabajos manuales.

Sin embargo, si el sistema de riego por goteo puede funcionar a la par con un sistema de energía solar fotovoltaica, puede reducir sus desventajas, principalmente en todas las componentes que requieren de electricidad, ya que su costo sería mucho más bajo.

IV.2 Sistema de riego para los principales cultivos del estado de Chihuahua

El origen del riego es un factor relevante en el desarrollo de la sociedad ya que la disponibilidad del agua siempre ha sido importante para el sustento de ésta. Cuando el hombre comenzó a dominar la conducción del agua fue cuando se inició la agricultura de regadío y se construyeron los primeros poblados. Esto lo llevó a una vida con menos riesgos que la de un cazador sin tener que moverse de un sitio a otro, ya que podía disponer de alimentos en el mismo lugar, lo cual generó un cambio fuerte en sus costumbres, debido a que no se tenía que mover de un lugar a otro para conseguir el alimento.

Existen dos tipos principales de riego: el riego por superficie y el riego presurizado; el primero tiene la ventaja de tener bajos costos de inversión y no requiere consumo de energía, la desventaja es que posee muchas pérdidas por infiltración. El riego superficial se puede dividir en tres: por surco, por melga y por tendido.

En cuanto al riego superficial por surco, el agua es transportada por pequeños canales de un sitio más alto a uno más bajo y se adapta a cultivos sembrados en línea y frutales; la eficiencia de este método puede ser poca e incluso menor del 40% del agua servida.

En el riego superficial por melga el agua es transportada por un espacio en forma de franjas que está dentro de dos bordos construidos para este fin, de un punto alto a otro más bajo. Este método es bastante útil para regar pasturas, cereales y en algunos casos frutales; una desventaja es que se utiliza una gran cantidad de agua y necesita un suelo bien nivelado ya que mucha del agua se infiltra y si no está bien nivelado generaría estancamientos.

El riego superficial por tendido es una de las formas más antiguas de riego. Tiene una gran desventaja ya que debido a que el transporte del agua por lote es muy desigual, provoca que en algunos lugares existan excesos y en otros, falte el agua. Por esta razón se tiene que seguir las curvas de nivel del terreno o tener un desnivel bajo.

En el segundo tipo el riego presurizado, existen, también tres subtipos: goteo, micro aspersion y aspersion. En todos los sistemas de presión el agua es transportada por tuberías con presión, lo que esto hace que el agua llegue directamente a la planta. Gracias a estos métodos se evitan perdidas por infiltración, en la conducción y distribución, por ende, se debe de contar con la información sobre el número de láminas de riego que necesita cada cultivo.

El riego presurizado por aspersion es el método en el cual el agua es aplicada sobre el cultivo en forma de lluvia, debido a que el agua transportada por tuberías llega al aspersor y éste rompe el flujo en muchas gotas. Unas de las desventajas de este método es que no puede ser utilizado cuando existe mucho viento ya que puede generar pérdidas; también se debe de conocer las necesidades del cultivo para que el agua no se acumule y se pierda por evaporación y por último, tiene una necesidad alta de energía eléctrica por su elevada necesidad de presión para su correcto funcionamiento.

El riego presurizado por micro aspersión es un método en el cual el agua es aplicada al suelo en gotas pequeñas y no requiere de mucha presión; este método se recomienda en cultivos frutales, viveros o algunas hortalizas, tiene un área de esparcimiento de 3 a 4 metros. El riego por aspersión tiene la desventaja en cuanto a la pérdida por evaporación o por vientos fuertes.

Las ventajas del riego por aspersión respecto al riego por superficie pueden ser la adaptabilidad ya que por aspersión se puede acomodar a caudales pequeños pero continuos, a suelos con mucha infiltración y baja retención, a terrenos con una topografía difícil de manejar con un buen diseño previo; el ahorro en mano de obra, ya que algunos sistemas por aspersión pueden automatizarse en su movimiento lo cual hace que baje la cantidad de mano de obra necesaria para operarlo; también en usos especiales como humidificar el ambiente, refrigerar las plantas en climas calientes, riego anti helada, riego de apoyo y lavado de sales en suelos salinos (Pereira et al., 2010).

También tiene ventajas económicas, ya que un sistema por aspersión con un buen diseño y estudio no perderá agua por evaporación, arrastre por el viento, escorrentía y percolación. Lo cual se genera en un sistema por superficie donde el suelo sea muy permeable, sea muy árido el clima o existan vientos fuertes (Pereira et al., 2010).

Algunas de sus limitaciones son los costos elevados de inversión, gasto por la energía para el bombeo, depósitos para cuando son riegos periódicos, no se adapta a los suelos con tasas bajas de infiltración y producen escorrentía, son difíciles de dimensionar en terrenos irregulares y arrastre por el viento. Estas limitaciones no se encuentran en el riego por goteo; solamente la del costo elevado (Pereira et al., 2010).

El riego presurizado por goteo consiste en aplicar el agua por medio de gotas perenes cerca de la planta del cultivo. En este método se forma un ensanchamiento húmedo debajo de cada gota donde el cultivo desarrolla mayor cantidad de raíces; cabe mencionar que el agua es transportada por presión,

pero la gota no tiene presión ya que los sistemas están diseñados para ir perdiendo presión (Demin, 2014).

Las ventajas que se pueden obtener de un sistema de riego por goteo son varias como aplicar el agua de forma eficiente y oportuna en ciertas zonas, se adapta a cualquier suelo o condición topográfica, ideal para el estado de Chihuahua, que cuenta con terrenos muy variados. Este sistema permite fertilizar y controlar plagas al mismo tiempo que se riega, lo que permite un ahorro en tiempo, no se desarrollan malezas, plagas o enfermedades, permite aplicar agua y fertilizante cuando el cultivo lo requiere, favoreciendo al crecimiento y producción. Se considera una eficiencia entre 90 y 95% que no da otro tipo de riego y no se ve afectado por los vientos (Núñez, 2015).

Las desventajas de un sistema de riego por goteo son el alto costo de inversión inicial, lo cual lo hace poco atractivo para los que comienzan con poca área de cultivo y también la facilidad con la que los orificios de las mangueras se tapan por la salinidad del agua. Se requiere de un buen sistema de filtrado y el costo en energía eléctrica, así como no está en función de la gravedad.

En consecuencia, este sistema cuenta con muchas ventajas y muy pocas desventajas, así que podría considerarse como el sistema más óptimo para los cultivos en el estado de Chihuahua. Por lo que se recomienda usar en zonas áridas ya que cuenta con muy poca pérdida de agua por evaporación. La escritora Cinthya Ruiz Granados del periódico La República, de Colombia en su artículo “Riego por goteo permite ahorros de un 40% en el consumo de agua” como su nombre lo indica, menciona que con un sistema de riego por goteo se puede considerar hasta un 40% en ahorro hídrico.

En la **Figura 20** se presentan los tipos de riego anteriormente mencionados.

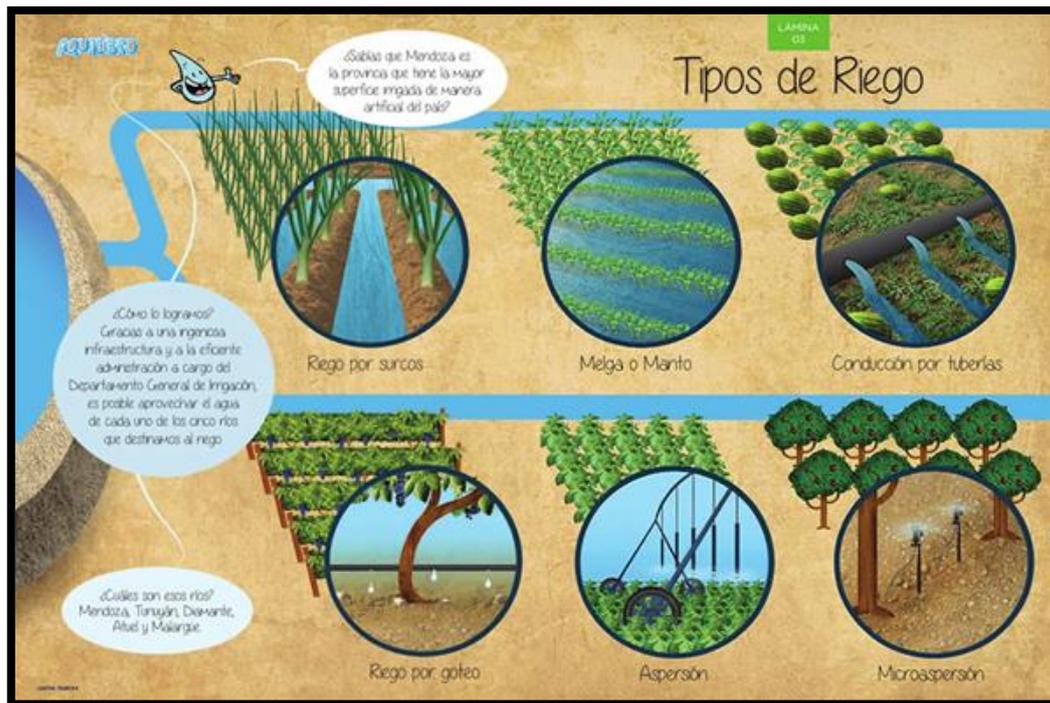


Figura 20. Tipos de riego (<https://www.tiposde.com/riego.html>)

Después de analizar todos los tipos de riego, se concluye en este apartado también, que la mejor opción es un sistema de riego por goteo, por su adaptabilidad y manejo del agua. Los elementos necesarios para la implementación de este sistema son:

Componentes de un sistema de riego por goteo

- Fuente de energía
- Cabezal de control
- Red de tuberías
- Goteros o emisores
- Dispositivos de medida, control y protección (Mendoza, 2013)

Fuente de energía

Los sistemas de riego por goteo, necesitan una fuente de energía para la circulación del agua, las pérdidas de energía en el filtrado, tuberías y accesorios y para que los emisores tengan la presión necesaria. La energía se puede obtener de dos maneras, por equipos de bombeo o por energía generada por la

diferencia de niveles en el sitio donde se encuentra el agua hasta el sitio del cultivo. Los equipos de bombeo son energizados ya sea por motores de combustión o motores eléctricos (Mendoza, 2013).

Cabezal de control

El cabezal de control es el conjunto de elementos del sistema de riego por goteo donde se filtra, se trata, se mide, se inyecta el fertilizante y se suministra el agua al sistema; cuando es necesaria una bomba para suministrar agua se considera parte del cabezal.

En la **Figura 21** se observa la conformación de un cabezal para el control de un sistema de riego por goteo (Mendoza, 2013).

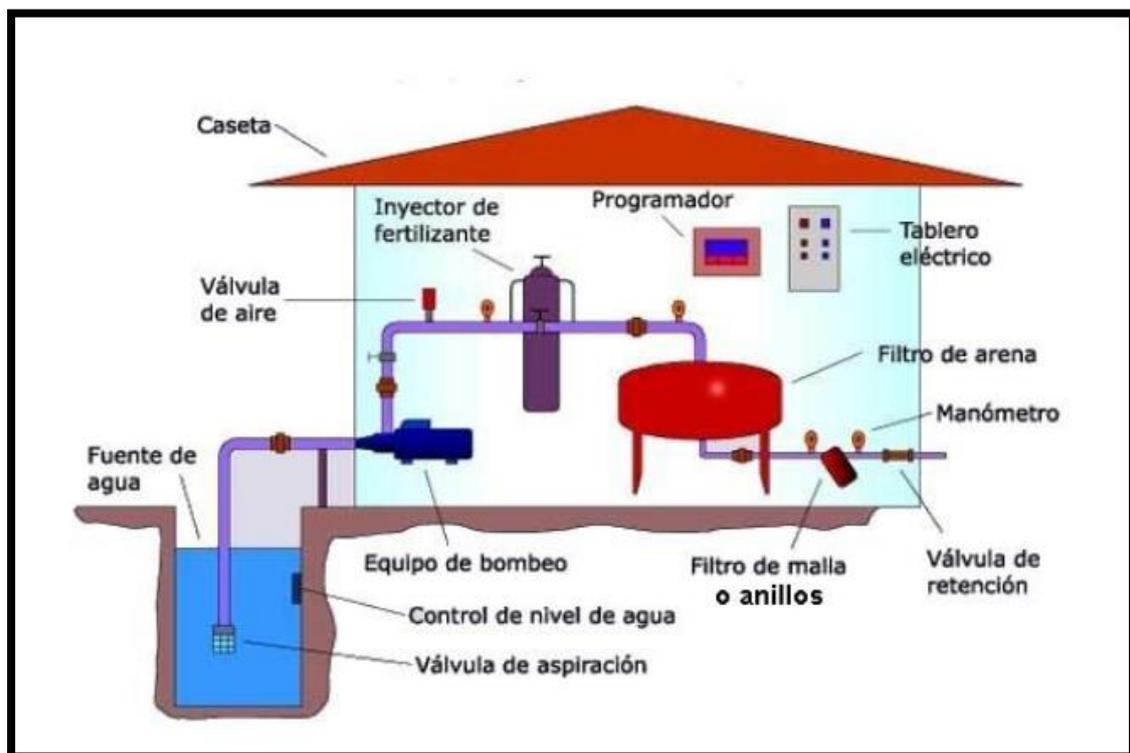


Figura 21. Cabezal de control riego por goteo (Mendoza, 2013).

Red de tuberías

La red de tuberías o red de distribución son todas las tuberías que contiene un sistema de riego por goteo, los accesorios de las tuberías necesarios para adaptar el sistema al suelo y a las necesidades desde el cabezal hasta el cultivo a regar. Existen diferentes formas para llamar a los ramales principales y

secundarios; la principal, múltiple o manifold y laterales o porta goteros, ya sean principales o secundarios. Los múltiples son los que se conectan con los laterales, estos últimos son las que distribuyen el agua por medio de emisores u orificios de 2 a 3 mm. Los materiales pueden ser de PVC (cloruro de polivinilo) o PE (polietileno) cambiando de diámetro dependiendo del ramal que sea y las necesidades del cultivo (Mendoza, 2013).

Goteros o emisores

Los goteros o emisores son el último elemento en la distribución del agua por los cuales se distribuye al suelo. La función de estos elementos es la de controlar la presión que viene de los laterales para que gota salga sin presión. Existen diferentes tipos de goteros, entre los que se tienen: en la línea, los cuales se colocan directamente en la línea a través de un corte; sobre la línea, los cuales se instalan con un equipo especial y pueden colocarse en diferentes tipos de tubería; por último, en integración, los cuales están termo soldados en el interior de la tubería (Mendoza, 2013).

Dispositivos de medida, control y protección

Para finalizar, los dispositivos de medida, control y protección son aparatos o accesorios que tienen la función de medir las características del agua o la presión en cualquier punto del sistema y son parte importante de estos sistemas. Un ejemplo sería el medidor de caudal, el cual mide el volumen de agua que pasa de un punto a otro que puede servir para detectar fugas o roturas. Los medidores de presión detectan las diferencias entre presiones para poder saber si existe una sobrepresión en algún punto del sistema y pueda ocasionar alguna rotura. Para concluir, los elementos de protección cuidan el sistema de todo lo que detecten como sobrepresiones y depresiones de nivel de agua por medio de válvulas de aire (Mendoza, 2013).

IV.3 Sistema de control de humedad

Como se sabe, en la actualidad reducir el consumo hídrico para las diferentes actividades es un tema de relevancia para todos, por lo tanto, el monitorear la

humedad del suelo y la eficientización del riego en la agricultura es una actividad que se debe de poner en práctica.

Monitorear el contenido de agua en el suelo puede ayudar a los agricultores de diferentes formas como: conservar el agua, mayor rendimiento en la producción, reducir impactos ambientales, disminuir costos, mejor la programación en los riegos, que puede incluir: determinar cuánta agua se utilizará y cuando utilizarla, al tener riego en exceso los fertilizantes se mueven por debajo de la zona donde puedan alcanzarla las raíces y al tener un riego insuficiente la producción no tendrá el rendimiento requerido.

Para poder hacer más eficiente el riego se necesita conocer algunos conceptos básicos sobre la capacidad de almacenamiento del agua en el suelo tales como la capacidad de campo, donde el suelo ha sufrido un riego pesado y la velocidad de drenaje cambia de rápida a lenta, lo que puede ocurrir después de dos o tres días de riego. El punto de marchitez permanente, el cual es el contenido de agua en el suelo donde las plantas se marchitan y no se pueden recuperar. El agua disponible para la planta, que se refiere al contenido de agua que permanece entre las dos últimas capas. Esta capa depende del tipo de suelo, densidad y estructura del suelo. Por último, el déficit permitido en el manejo del riego (DPM) es el contenido de agua en el suelo donde la planta sufre estrés por no recibir agua y por ende la producción tiene un rendimiento bajo.

Un criterio que se utiliza en el riego presurizado es el de la tensión de la humedad del suelo, la cual tiende a medirse por medio de sensores o tensiómetros y su unidad son los centibars. Por ejemplo, para el maíz se recomienda de 50-80 centibars, la cebolla 45-65 centibars, los cítricos de 50-70 centibars, etc. También se debe de considerar la profundidad de la raíz para determinar la disponibilidad de agua en el suelo que tendrá la planta (Enciso et al., s/f).

Para la medición de la humedad del suelo existen dos métodos: el directo y el indirecto. El método directo es de forma manual y requiere tiempo, instalaciones especiales, equipo, especialistas y puede afectar el área de cultivo incesantemente. Los métodos indirectos se miden en sitio y se utilizan equipos

especiales (Florentino, 2006). Los métodos indirectos son rápidos y precisos, pero se requiere equipos especiales y costosos en campo para interpretar, extraer y almacenar datos, lo cual hace complicado el registro y observación de los cambios de humedad en el suelo tanto para este método como el directo.

Las nuevas tecnologías implementadas para darle apoyo a estos problemas son las de las redes inalámbricas de sensores (RIS o WSN siglas en inglés). Una RIS se forma con varios nodos con diferentes sensores acoplados, separados en un área general a monitorear. Cada nodo sensor con ayuda del sensor acoplado mide las variables de forma continua, procesa la información y la transmite de forma inalámbrica a los demás sensores nodo, hacia un nodo coordinador conectado a un servidor para registrar la información de la RIS (Flores-Medina et al., 2015).

Por lo tanto, los sistemas RIS son una manera viable de tener un monitoreo continuo sin la necesidad de mantenimiento o de trabajar en sitio ya que se puede monitorear desde una oficina, y el costo es más bajo. Los componentes se adecuan según las necesidades del lugar y pueden ser alimentados con energías renovables.

Convirtiéndolos en un sistema autónomo y sustentable, otra variable más que se puede agregar a estos nodos sensores es la habilidad de controlar ciertos aparatos como poder abrir y cerrar válvulas de riego, encender ventiladores, extractores, aparatos electrónicos, etc., convirtiéndolo no solo en una manera de extraer y guardar datos sino en un sistema de control de riego (Flores-Medina et al., 2015).

Algunos lugares donde se ha utilizado el sistema RIS son España y Estados Unidos de América; este sistema ha probado ser eficiente y confiable mientras los parámetros de los sensores sean los adecuados. En la **Figura 22** se observa un prototipo creado para Torreón, Coahuila con el fin de monitorear la humedad del suelo en un invernadero (Flores-Medina et al., 2015)

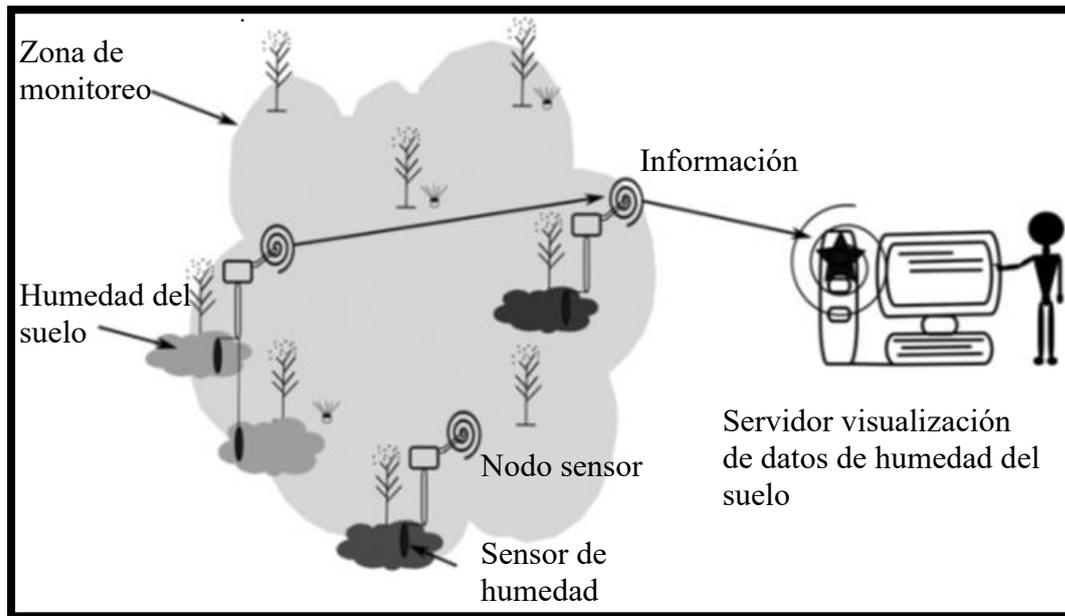


Figura 22. Modelo conceptual para medir la humedad el suelo basado en un sistema RIS (Flores-Medina et al., 2015).

Con respecto al sistema más adecuado para esta investigación es un sistema tipo RIS el cual puede controlarse desde los datos continuos de humedad del suelo, mandar señales inalámbricas hacia un servidor, el control de válvulas o motores y el envío de datos por medio de internet hacia una computadora. Estas ventajas permiten llevar un control de salida del agua, así como de humedad en el suelo constantemente sin tener que estar en sitio, haciendo de éste un sistema muy eficiente para cualquier usuario.

IV.4 Configuraciones del Estado de Chihuahua

En la **Figura 23** se presenta la configuración de la profundidad al nivel estático del agua subterránea para el estado de Chihuahua. En estas configuraciones se pueden observar profundidades desde 0.5 hasta 200 m. Las zonas de mayor profundidad se localizan en la porción centro del Estado, las cuales requieren de un consumo más alto de energía eléctrica.

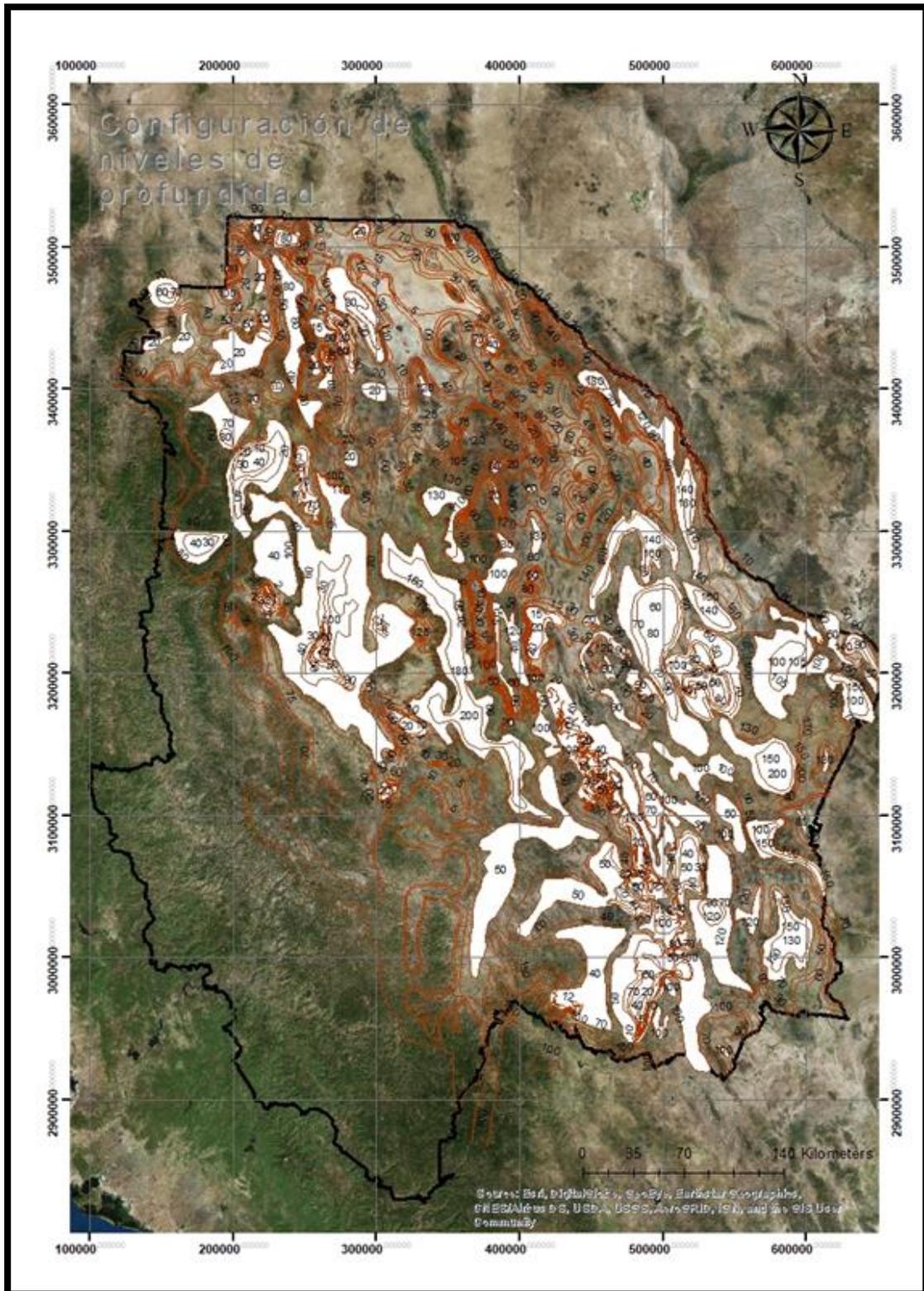


Figura 23. Configuraciones de niveles estáticos del agua en el estado de Chihuahua.

IV.5 Gasto en energía eléctrica de los principales cultivos del estado de Chihuahua

Según el estudio del uso del agua en Chihuahua de la SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación) del 2017 y con registro de la PEUA (Programa Especial de Energía Eléctrica para el Campo en uso Agrícola) del 2016, el estado de Chihuahua cuenta con un conjunto de 1'788,602 caballos de fuerza (hp) y un total de 17,892 servicios o pozos. Por lo que al transformar los caballos de fuerza en kilowatts resulta que 1 hp es igual a 0.746 kWh, por lo tanto el sector agrícola en Chihuahua consume 1,334,297.09 kWh o 1,334.29 Mega watts (mWh) aproximadamente por hora de operación de todas las bombas.

Para cubrir las necesidades eléctricas para toda la zona agrícola se necesitarían 3'606,209 módulos de 370 w, los cuales pueden ser de diferentes marcas y contar con la certificación Tier 1 (bloomberg, define los fabricantes solares Tier 1 como "los que han proporcionado productos a cinco proyectos diferentes que se han financiado sin recurso por cinco bancos establecidos en los últimos dos años"), lo que se traduce en solvencia económica y estabilidad.

En la **Figura 24** se observa la distribución de los pozos en el estado de Chihuahua.

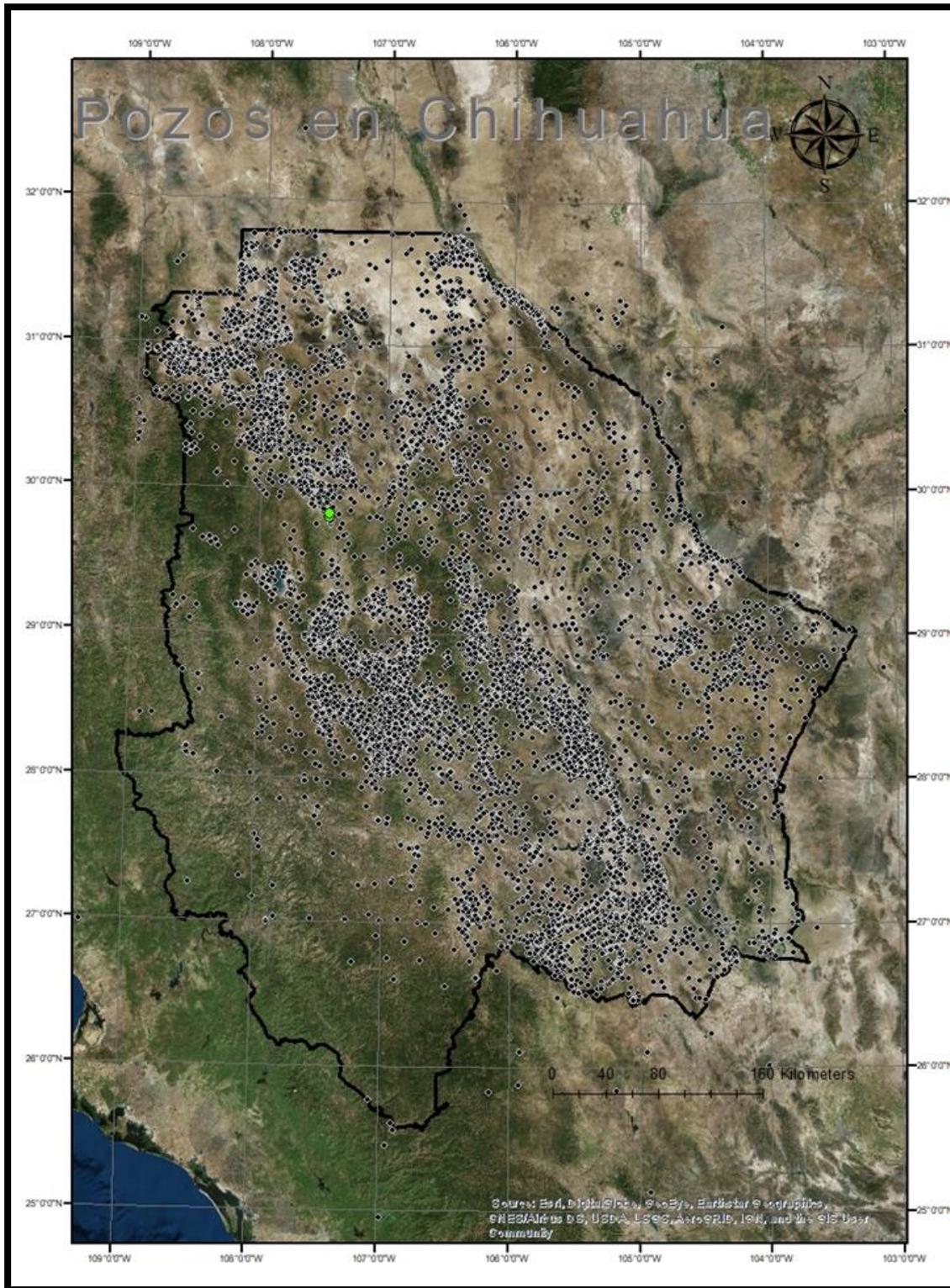


Figura 24. Pozos distribuidos en el estado de Chihuahua (INEGI, 2018).

IV.6 Diseñar un sistema de energía solar fotovoltaica, equivalente al consumo de energía eléctrica agrícola

Para el diseño de un sistema solar fotovoltaico que pueda suplir las necesidades de energía eléctrica consumida por la industria agrícola en el estado de Chihuahua, se pueden considerar tres alternativas:

- a) Establecimiento de una sola granja solar**
- b) Establecimiento de una granja solar por distrito de riego y**
- c) Establecimiento de los sistemas de energía solar fotovoltaica por pozo**

a) Establecimiento de una sola granja solar

En esta alternativa se consideraron diferentes aspectos de la zona tales como: temperatura, clima, la calidad de los materiales a utilizar, uso de suelo y radiación.

La temperatura y el clima son importantes para una óptima generación de un sistema de energía solar fotovoltaica. Debido a que un clima muy árido con temperaturas altas puede hacer que los componentes electrónicos de un módulo solar se sobrecalienten y no proporcionen el 100% de su rendimiento, por esto, es importante localizar un clima templado con temperatura constante no muy alta.

El uso del suelo también es importante, puesto que no se puede instalar un sistema de energía solar fotovoltaica en zonas donde abundan los árboles, tales como en bosques o selvas. Esto, debido a que generan mucha humedad y sombra, provocando que los paneles no funcionan adecuadamente, por lo que, se busca zonas abiertas sin sombra.

Sin embargo, el aspecto más importante a considerar para el establecimiento de una granja solar es la radiación. La radiación solar es toda la energía que se propaga en forma de onda a través del espacio. Con el dato de radiación solar se cuantifican los kWh/m² que se pueden generar en cualquier zona del estado

de Chihuahua y para cada una de las estaciones del año (INEGI, 2017 y CONABIO, 2017).

En la **Figura 25** se muestra la distribución de la radiación solar promedio para cada una de las estaciones del año (primavera, verano, otoño e invierno) y para todo el estado de Chihuahua; en total resultaron 73 zonas. También, en la **Tabla 3** se observan los valores de radiación solar para cada una de las estaciones del año, donde se puede constatar que el estado de Chihuahua cuenta con buena radiación solar.

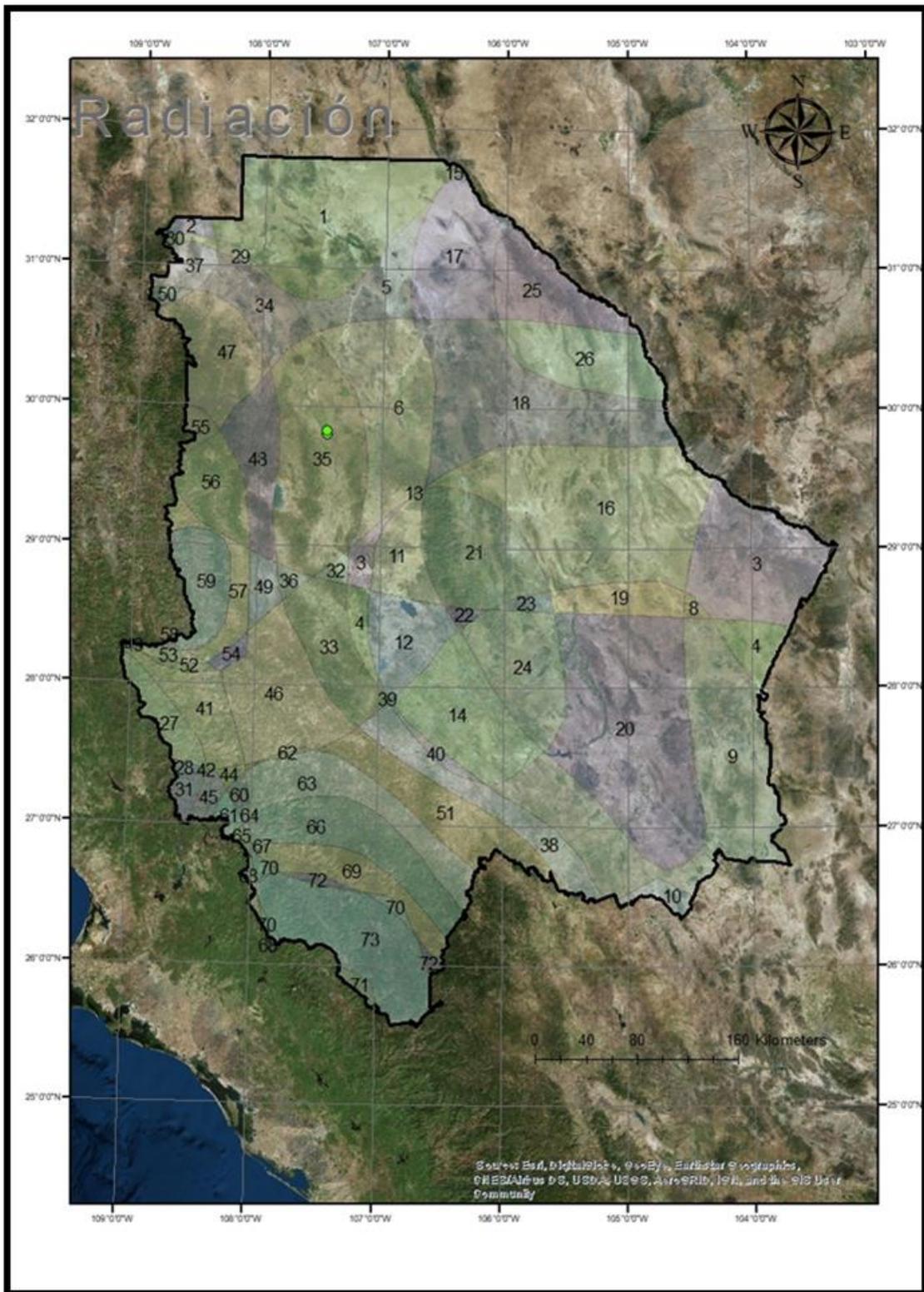


Figura 25. Radiación solar en el estado de Chihuahua (CONABIO, 2017).

Tabla 3. Valores de radiación solar de las 73 zonas distribuidas en el estado de Chihuahua

ZONA	ÁREA (km ²)	PERÍMETRO (km)	KWh/m ² (Horas pico)			
			PRIMAVERA	VERANO	OTOÑO	INVIERNO
1	13784.32	518.03	5.69	6.25	3.47	3.75
2	512.51	118.82	5.69	6.25	3.33	3.75
3	9434.70	611.29	5.69	5.97	4.03	3.75
4	2774.00	408.89	5.69	5.97	4.03	4.03
5	3719.03	402.22	5.69	5.97	3.47	3.75
6	9288.72	483.82	5.69	5.97	3.75	3.75
7	63.94	45.66	5.69	5.97	3.75	3.75
8	271.59	73.88	5.69	5.97	4.31	3.75
9	16759.68	1032.50	5.69	5.97	4.31	4.03
10	796.88	173.83	5.69	5.97	4.58	4.03
11	2883.35	252.68	5.69	6.11	4.03	3.75
12	3819.56	253.33	5.69	6.11	4.03	4.03
13	1.83	13.75	5.69	6.11	3.75	3.75
14	7050.97	352.72	5.69	6.11	4.31	4.03
15	90.52	49.82	5.97	6.25	3.47	3.75
16	17211.20	615.06	5.97	5.97	4.03	3.75
17	6502.03	342.28	5.97	5.97	3.47	3.75
18	12964.03	619.29	5.97	5.97	3.75	3.75
19	2543.29	250.67	5.97	5.97	4.31	3.75
20	17836.51	574.11	5.97	5.97	4.31	4.03
21	7002.01	322.92	5.97	6.11	4.03	3.75
22	327.16	91.94	5.97	6.11	4.03	4.03
23	497.09	115.37	5.97	6.11	4.31	3.75
24	5835.95	314.37	5.97	6.11	4.31	4.03
25	4634.18	351.80	6.11	5.97	3.47	3.75
26	5451.75	348.06	6.11	5.97	3.75	3.75
27	1996.85	267.39	5.42	6.25	4.03	4.03
28	186.68	66.81	5.42	6.25	4.03	4.31
29	340.55	133.98	5.42	6.25	3.47	3.75
30	286.60	110.41	5.42	6.25	3.33	3.75
31	693.79	121.76	5.42	6.25	4.31	4.31
32	380.26	92.01	5.42	5.97	4.03	3.75
33	4676.51	310.95	5.42	5.97	4.03	4.03
34	3310.00	280.80	5.42	5.97	3.47	3.75

Continuación Tabla 3

ZONA	ÁREA (km ²)	PERÍMETRO (km)	KWh/m ² (Horas pico)			
			PRIMAVERA	VERANO	OTOÑO	INVIERNO
35	11175.91	453.21	5.42	5.97	3.75	3.75
36	392.21	91.20	5.42	5.97	3.75	4.03
37	1274.63	185.21	5.42	5.97	3.33	3.75
38	4613.84	527.16	5.42	5.97	4.31	4.03
39	1.40	8.47	5.42	6.11	4.03	4.03
40	553.80	205.11	5.42	6.11	4.31	4.03
41	3411.91	324.40	5.14	6.25	4.03	4.03
42	5.45	12.00	5.14	6.25	4.03	4.31
43	19.79	39.60	5.14	6.25	3.75	4.03
44	254.25	74.28	5.14	6.25	4.31	4.03
45	672.17	132.92	5.14	6.25	4.31	4.31
46	7395.30	375.14	5.14	5.97	4.03	4.03
47	5210.53	341.26	5.14	5.97	3.47	3.75
48	3934.02	341.05	5.14	5.97	3.75	3.75
49	1115.92	157.58	5.14	5.97	3.75	4.03
50	356.61	87.30	5.14	5.97	3.33	3.75
51	5695.35	617.58	5.14	5.97	4.31	4.03
52	291.14	128.57	4.86	6.25	4.03	4.03
53	431.79	128.73	4.86	6.25	3.75	4.03
54	379.04	94.97	4.86	5.97	4.03	4.03
55	642.47	139.71	4.86	5.97	3.47	3.75
56	3406.37	255.12	4.86	5.97	3.75	3.75
57	2192.45	426.31	4.86	5.97	3.75	4.03
58	72.02	46.39	4.72	6.25	3.75	4.03
59	3309.85	303.10	4.72	5.97	3.75	4.03
60	392.43	94.32	4.86	6.25	4.31	4.03
61	447.23	127.06	4.86	6.25	4.31	4.31
62	119.51	85.31	4.86	5.97	4.03	4.03
63	5750.38	527.15	4.86	5.97	4.31	4.03
64	23.16	26.47	4.58	6.25	4.31	4.03
65	165.52	76.04	4.58	6.25	4.31	4.31

Continuación Tabla 3

ZONA	ÁREA (km ²)	PERÍMETRO (km)	KWh/m ² (Horas pico)			
			PRIMAVERA	VERANO	OTOÑO	INVIERNO
66	6108.68	456.78	4.58	5.97	4.31	4.03
67	35.87	35.09	4.58	5.97	4.31	4.31
68	269.10	181.30	4.58	6.25	4.31	4.31
69	3517.54	404.61	4.58	5.97	4.31	4.03
70	675.78	293.04	4.58	5.97	4.31	4.31
71	386.26	124.74	4.17	6.25	4.31	4.31
72	435.31	212.91	4.17	5.97	4.31	4.03
73	8131.09	473.96	4.17	5.97	4.31	4.31

En la tabla anterior se puede observar la radiación solar en kWh/m² de cada estación del año y para cada uno de las zonas divididas de la **Figura 25**.

En la **Figura 25 y Tabla 3** se muestra también que la estación de verano en todas las zonas es la que genera más radiación y la estación de invierno es la que menos genera; esto se debe a la posición del sol en cada una de las estaciones. La posición del sol y el ángulo del horizonte forman parte importante de la radiación. En el estado de Chihuahua se cuenta con buena radiación todo el año, pero puede ser más eficiente si en invierno, donde es menor la radiación, los módulos solares se disponen en un ángulo de 27 grados respecto al horizonte, esto, debido a la posición del sol.

En la **Figura 26** se muestra la trayectoria del sol a lo largo del año, en la latitud de 33° Sur, correspondiente a Sídney, Australia, la cual es muy similar a la presentada en el estado de Chihuahua (Tlazen et al., 2008).

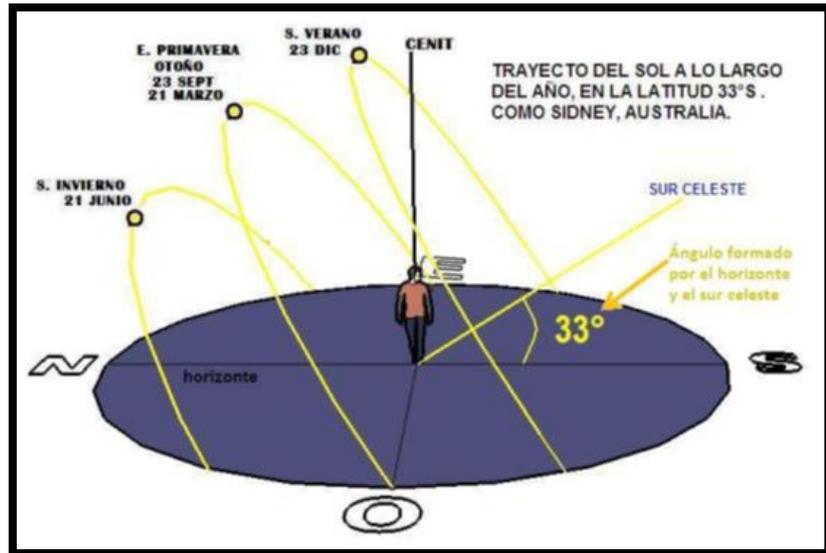


Figura 26. Trayectoria del sol a lo largo del año para Sídney Australia, la cual es parecida a la presentada en el estado de Chihuahua.

El promedio anual de la radiación solar se presenta en la **Tabla 4**, cuyos valores van desde los 4.51 hasta los 5.1 kWh/m². El valor de 4.51 kWh/m² se observa en la zona 55, localizada hacia el noroeste del estado de Chihuahua, entre los límites del estado de Sonora y Chihuahua (**Figura 25**). El valor de 5.1 kWh/m² se presenta en la porción centro sur del estado de Chihuahua, correspondiendo a la zona 24 (**Figura 25**).

Tabla 4. Valores promedio de la radiación solar en el estado de Chihuahua

ZONA	ÁREA (km ²)	RADIACIÓN SOLAR PROMEDIO ANUAL (kWh/m ²)
1	13784.32	4.79
2	512.51	4.76
3	9434.70	4.86
4	2774.00	4.93
5	3719.03	4.72
6	9288.72	4.79
7	63.94	4.79
8	271.59	4.93
9	16759.68	5.00
10	796.88	5.07
11	2883.35	4.90
12	3819.56	4.97
13	1.83	4.83
14	7050.97	5.03
15	90.52	4.86
16	17211.20	4.93
17	6502.03	4.79
18	12964.03	4.86
19	2543.29	5.00
20	17836.51	5.07
21	7002.01	4.97
22	327.16	5.03
23	497.09	5.03
24	5835.95	5.10
25	4634.18	4.83
26	5451.75	4.90
27	1996.85	4.93
28	186.68	5.00
29	340.55	4.72
30	286.60	4.69
31	693.79	5.07
32	380.26	4.79
33	4676.51	4.86
34	3310.00	4.65

Continuación Tabla 4

ZONA	ÁREA (km ²)	RADIACIÓN SOLAR PROMEDIO ANUAL (kWh/m ²)
35	11175.91	4.72
36	392.21	4.79
37	1274.63	4.62
38	4613.84	4.93
39	1.40	4.90
40	553.80	4.97
41	3411.91	4.86
42	5.45	4.93
43	19.79	4.79
44	254.25	4.93
45	672.17	5.00
46	7395.30	4.79
47	5210.53	4.58
48	3934.02	4.65
49	1115.92	4.72
50	356.61	4.55
51	5695.35	4.86
52	291.14	4.79
53	431.79	4.72
54	379.04	4.72
55	642.47	4.51
56	3406.37	4.58
57	2192.45	4.65
58	72.02	4.69
59	3309.85	4.62
60	392.43	4.86
61	447.23	4.93
62	119.51	4.72
63	5750.38	4.79
64	23.16	4.79
65	165.52	4.86

Continuación Tabla 4

ZONA	ÁREA (km ²)	RADIACIÓN SOLAR PROMEDIO ANUAL (kWh/m ²)
66	6108.68	4.72
67	35.87	4.79
68	269.10	4.86
69	3517.54	4.72
70	675.78	4.79
71	386.26	4.76
72	435.31	4.62
73	8131.09	4.69

En la **Tabla 4**, se puede observar que, las mejores zonas para la planta solar fotovoltaica serían los números 9, 10, 14, 19, 20, 22, 23, 24, 28,31 y 45, cuya radiación solar va de los 5 a los 5.1 kWh/m² y de entre ellos, las zonas con los números 20, 22, 23 y 24 se podían seleccionar como las mejores zonas para la instalación de una granja solar. Estas cuatro zonas forman un triángulo localizado en la porción centro-sureste del estado de Chihuahua (**Figura 25**). Además, en estas zonas la radiación solar es más fuerte, tienen poblaciones cercanas y la red de alta tensión de CFE pasa por las carreteras que transitan por esa zona, lo que permitiría inyectar la energía eléctrica generada a su red.

En la **Figura 27** se muestran las zonas que presentan las mayores radiaciones solares, las cuales van desde 5 hasta 5.1 kWh/m², así como también, las principales poblaciones y la topografía a cada 250 m. Todas ellas, se consideraron en la localización de las zonas más prometedoras para la instalación de la granja solar, la cual deberá cubrir el requerimiento energético que demanda la actividad agrícola del estado de Chihuahua.

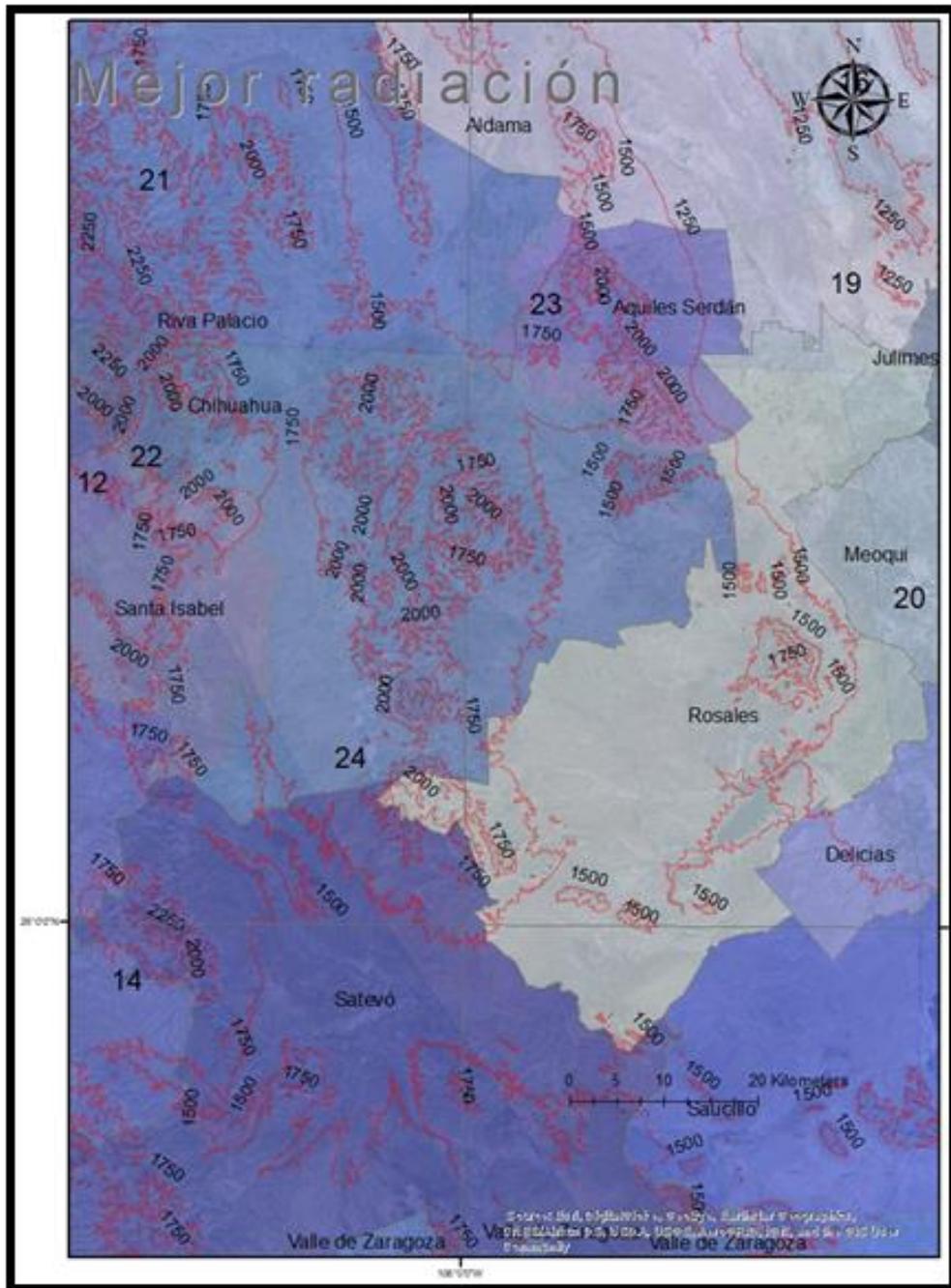


Figura 27. Zonas con mejor radiación, localidades y topografía.

Una vez determinada la mejor zona para la instalación de la granja solar fotovoltaica se realizaron los cálculos para determinar la cantidad de elementos que conforman un sistema solar fotovoltaico (paneles solares, inversor de corriente, estructura, etc.). Por lo que, para dicha instalación se requieren los componentes de la **Tabla 5**.

Tabla 5. Componentes, unidades y cantidades indispensables para la instalación de una granja solar

Concepto	Cantidad	Unidad
Gasto Chihuahua aproximado	1,334,297.09	kwh
Núm. Pozos	17,892.00	pza.
Núm. paneles 370w	3,606,209.00	pza.
Inversores de 5Mwh	267.00	pza.
Tamaño de sistema	1,334.30	Mwh
Tamaño estimado para el sistema solar	14,424,836.00	m2
	14.42	km2
Precio aproximado por kilowatt cfe	2.70	pesos
Apoyo para los agricultores	2.43	pesos
Precio aproximado del sistema por watt	0.90	dólares
Ahorro en pesos aproximado	540,390,321.45	pesos mensual
Costo del sistema	1,200,867,381.00	dólares
	24,617,781,310.50	pesos a 20.5 el dólar
Recuperación de la inversión	45.56	meses
	3.80	años
Vida útil del sistema	25.00	años
Garantía sobre defecto de fabrica	10.00	años

Por lo que el tamaño de la planta solar fotovoltaico que cubriría el consumo de energía eléctrica de todos los pozos del estado de Chihuahua sería de 1,334.30 Mw/h. Esta sería equiparable a las mayores plantas solares fotovoltaicas del mundo, donde, tan solo China, que es el líder mundial en este ámbito, cuenta entre sus principales planas con dos, una de 1500 Mw, localizada en el desierto de Tengger, en Zhongwei, provincia de Ningxia y otra de 1,000 Mw ubicada en Datong. También, resalta la planta de 1,000 Mw, localizada en India en Panyam Mandal, en el distrito de Kurnool, en Andhra Pradesh (Jose A. Roca, 2018. Periódico de la Energía).

Al analizar estos datos, se puede concluir que con la construcción de una granja solar fotovoltaica, aunque su costo parezca elevado, sus beneficios son los siguientes: recuperación de la inversión en menos de 4 años y sobre todo el daño que se deja de hacer al ecosistema al no generar gases de efecto invernadero. Por lo tanto, esta investigación podría ser el inicio de una justificación para la implementación de una planta solar fotovoltaica.

En la **Figura 28** se muestran cuatro zonas (0, 1, 2 y 3) donde se puede aprovechar al máximo la radiación solar en el estado de Chihuahua. Cada una de ellas cuenta con un área de 16 km², por lo que en cualesquiera de ellas se podría instalar la planta solar fotovoltaica, que requiere una superficie de alrededor de 14.42 km².

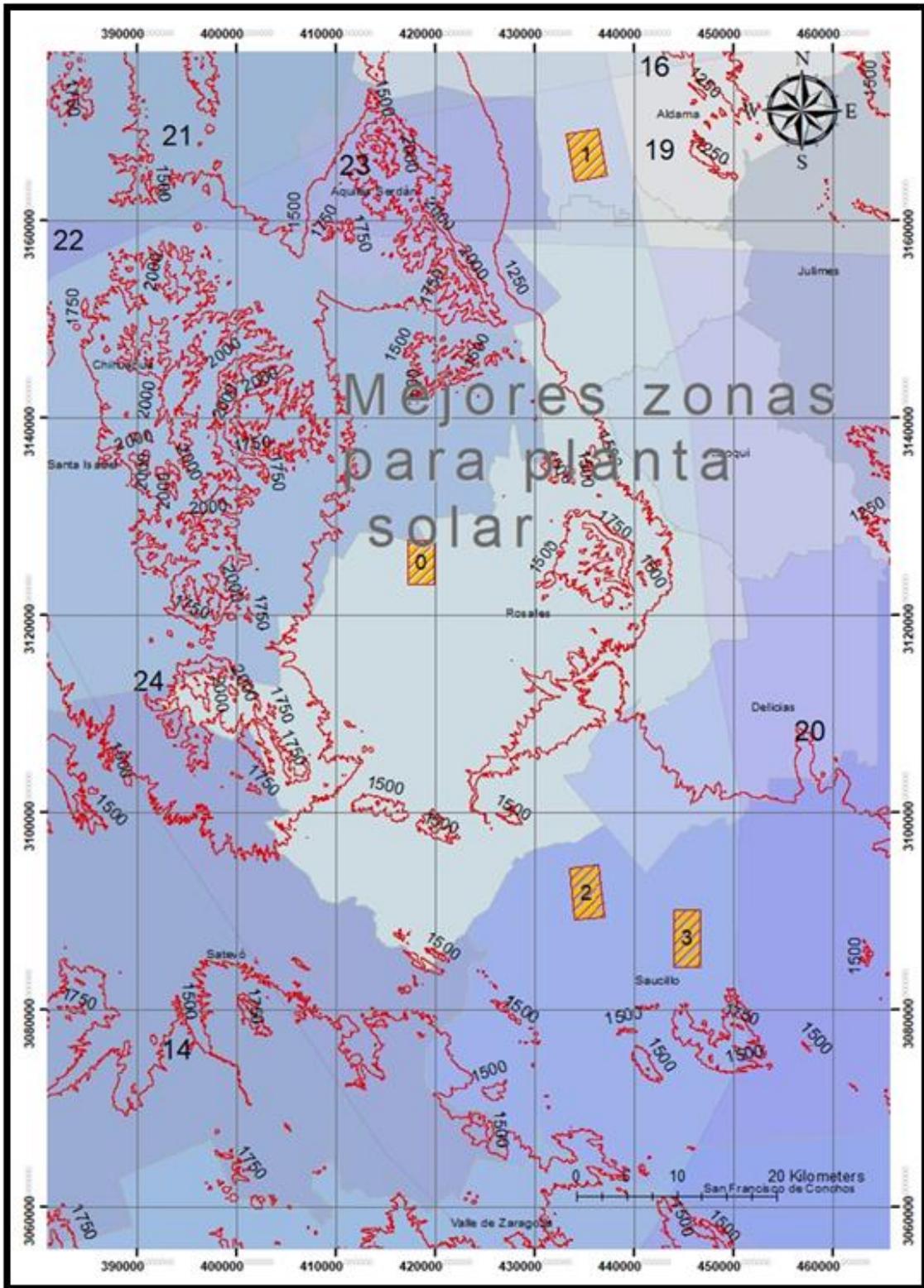


Figura 28. Zonas donde se podría instalar la planta solar fotovoltaica.

b) Establecimiento de una granja solar por distrito de riego

La segunda opción para cubrir las necesidades de energía eléctrica de la actividad agrícola sería por distrito de riego. El ejemplo que en esta tesis se consideró, fue el distrito de riego 42, el cual abarca parte de los municipios de Galeana, Buenaventura e Ignacio Zaragoza. Para este distrito de riego se contó con el consumo o gasto de energía eléctrica de la mayoría de los pozos desde el año de 2011 hasta el 2017. Con dicha información se calculó el promedio de los gastos mensuales y anuales de cada uno de los pozos, así como también, se determinó el tamaño del sistema solar fotovoltaico. Esto se observa en la **Tabla 6**.

En la **Tabla 6**, a comparación de la **Tabla 5**, se muestra un sistema de menor tamaño donde se cumplen las necesidades eléctricas de un distrito de riego. Como se observa, la recuperación de la inversión necesitaría más años, esto por la cantidad de aparatos electrónicos a utilizar ya que por ser menor cantidad no se obtendría el mismo precio con los proveedores.

Lo anterior podría considerarse como una desventaja, el instalar los sistemas por cada distrito de riego. Otra desventaja es que, se tendría que obtener y pagar los permisos correspondientes para la instalación del sistema solar fotovoltaico por cada uno de los distritos de riego que superen el gasto de 500 kWh, los cuales tienen una duración aproximada de un año en su trámite y el costo varía según el tamaño del sistema, en comparación con un sistema completo en el que solo se necesitaría un permiso para todos los distritos de riego.

Por otro lado, la ventaja de instalar los sistemas por cada distrito de riego, sería que estaría cercano al área donde se suministraría la energía, lo cual permitiría que el mantenimiento del sistema pudiera ser organizado por los integrantes del propio distrito de riego.

Tabla 6. Componentes, unidades y cantidades indispensables para la instalación de una granja solar para el distrito de riego 42.

Concepto	Cantidad	Unidad
Gasto Distrito de riego 42 aproximado kWh	8,086.65	kWh
Núm. Pozos	84.00	Pza.
Núm. paneles 370w	21,856.00	Pza.
Inversores de 75kWh	108.00	Pza.
Tamaño de sistema	8.09	Mwh
Tamaño estimado para el sistema solar	98,352.00	m ²
	10.00	Hectáreas
Precio aproximado por kilowatt CFE	2.70	pesos
Apoyo para los agricultores	2.43	pesos
Precio aproximado del sistema por watt	1.05	dólares
Ahorro en pesos aproximado	\$3,275,093.25	pesos mensual
Costo del sistema	\$8,490,982.50	dólares
	\$174,065,141.25	pesos a 20.5 el dólar
Recuperación de la inversión	53.15	meses
	4.43	años
Vida útil del sistema	25.00	años
Garantía sobre defecto de fabrica	10.00	años

c) Establecimiento de los sistemas de energía solar fotovoltaica por pozo

La tercera opción sería la instalación de los sistemas de energía solar fotovoltaica por pozo. En el **anexo 1** se incluye una tabla de los pozos del distrito de riego 42, donde cada uno cuenta con su gasto mensual y el promedio anual para el periodo de 2011 a 2017.

En este tamaño de sistema no existe la desventaja de los gastos por permiso a menos que el sistema supere los 500 kWh, que en el caso del distrito de riego 42 ninguno supera este límite. La principal desventaja de este sistema es el costo ya que, al hacerlo individual, aumenta el precio del proveedor al considerarse una compra menor que los demás tipos de sistemas. Otra de las desventajas es que cada propietario de un pozo necesitaría designar algún espacio en su terreno para el sistema solar fotovoltaico, lo cual les podría afectar al momento de cultivar y, por último, el mantenimiento sería un costo individual.

La ventaja de estos sistemas individuales es el control que tendría cada propietario del sistema, ya que se podría monitorear individualmente el funcionamiento de los paneles solares; otra ventaja como se comentó es la facilidad del permiso con CFE, y por último, que cada propietario podría buscar el financiamiento para su sistema solar. Esto facilitaría la administración de su granja ya que las últimas dos opciones son en grupo y se tendrían que poner de acuerdo todos.

En resumen, en cada una de las tres opciones proporcionadas para cumplir con las necesidades eléctricas del gasto demandado por la agricultura del estado de Chihuahua o de algún distrito de riego, existen desventajas y ventajas. Lo ideal es que la granja total pudiera ser construida por el gobierno, debido principalmente, a que éste subsidia el 90% del gasto eléctrico. Una vez cumplido el plazo de 3.8 o 4.4 años, el gobierno ya no gastaría en el subsidio para la extracción de agua, en por lo menos 10 años más.

VI.7. Diseño del sistema de riego por goteo con sensores de humedad alimentado por energía solar fotovoltaica y monitoreo remoto

En la **Figura 29** se muestra el diseño de un sistema de riego por goteo con sensores de humedad, alimentado por energía solar fotovoltaica. Éste empieza por el diseño del sistema solar fotovoltaico, el cual depende de las necesidades eléctricas de todo el sistema, siendo la de mayor consumo la bomba y el cabezal del sistema de riego por goteo, los cuales son representados en la figura por el símbolo de bomba solar.

También se considera el cuarto de control, los sensores de humedad y los nodos para el envío de datos. Una vez teniendo todo eso, se diseña el sistema solar fotovoltaico, el cual puede ser aislado, es decir, donde no existe red eléctrica, como en el caso del dibujo. En este caso los paneles solares se conectan al controlador de carga y este distribuye a las baterías y al inversor de corriente el cual manda energía alterna a la bomba y todos los demás aparatos electrónicos.

Sin embargo, también puede estar interconectado a una red existente de CFE. En este caso solo se realizaría la conexión entre paneles solares al inversor de corriente y de éste hacia los diferentes aparatos electrónicos.

La energía eléctrica generada en el sistema solar fotovoltaico distribuye la energía al sistema de riego por goteo. Como se comentó anteriormente, es el sistema de riego recomendado para zonas áridas como es el caso del estado de Chihuahua y con diferentes relieves.

Este sistema está compuesto por el cabezal del sistema seguido de sus rutas principales y secundarias las cuales son las que alimentan a los cultivos con agua; también la energía se distribuye a los sensores de humedad los cuales son instalados en diferentes puntos del cultivo y están conectados a los nodos los cuales también reciben energía del sistema solar fotovoltaico.

Los nodos envían información en tiempo real de la humedad del suelo hacia un computador, el cual contiene un software conectado a la bomba para encenderla según los parámetros establecidos para cada cultivo. También, recolecta información del comportamiento del sistema de riego y el gasto de agua y energía eléctrica. Este computador guarda y manda la información del comportamiento de todo el sistema hacia cualquier computador y así se podría controlar de manera remota todo el sistema.

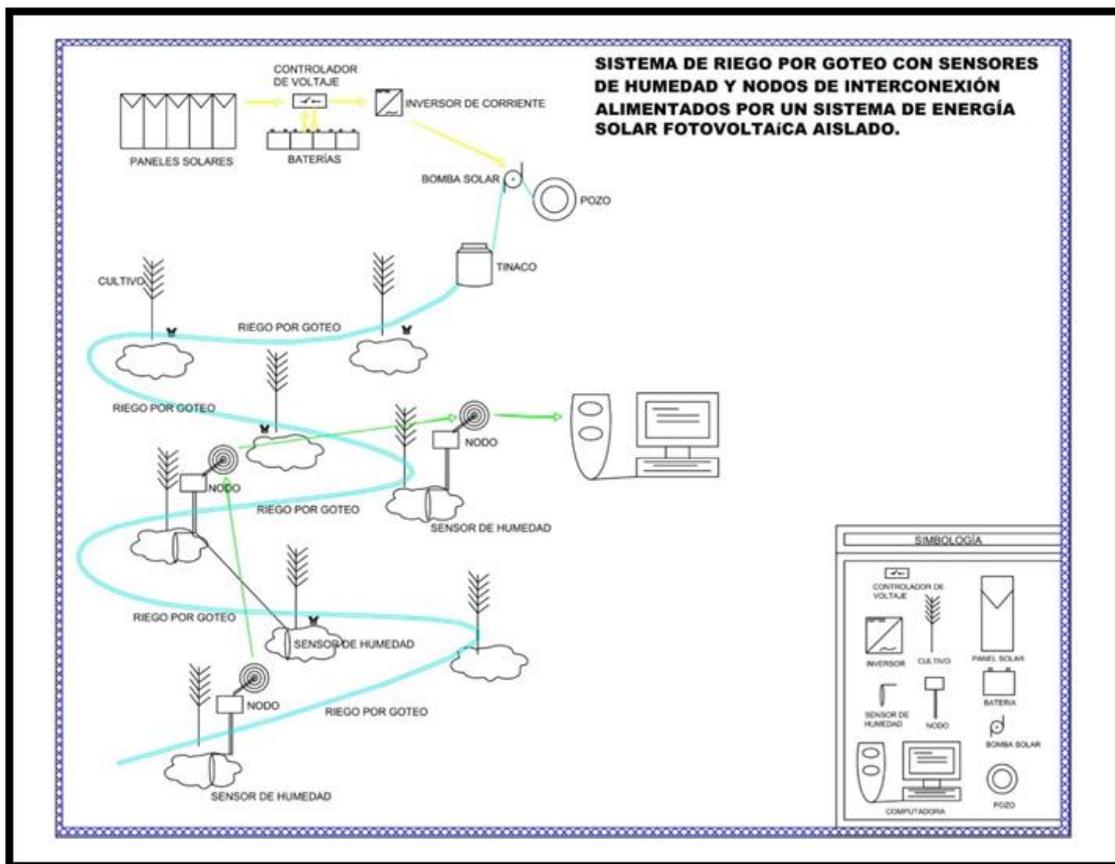


Figura 29. Diseño de un sistema de riego por goteo con sensores de humedad, alimentado por energía solar fotovoltaica.

IV.8 Cuantificación del ahorro de energía eléctrica y recurso hídrico, así como el impacto ambiental por el uso de energías renovables

En la **Tabla 7** se observa que el gasto energético y de agua son cantidades importantes para el estado de Chihuahua. Sin embargo, en función del sistema de riego se puede ahorrar hasta un 40%, por lo tanto, utilizando los datos del año

2016, del estudio “Requerimiento hidráulico para agricultura en Chihuahua” de la SAGARPA, se puede cuantificar el ahorro de agua.

En la **Tabla 7** no se incluye el ahorro al utilizar sensores de humedad, ya que las referencias que se usaron no presentan un dato exacto, solo mencionan que se puede tener un ahorro considerable dependiendo del cultivo y de la zona donde se instalen.

Tabla 7. Ahorro económico por la energía eléctrica y ahorro de agua, así como disminución de gases contaminantes

Concepto	Año 2016	Unidades
Gasto energético aproximado de Chihuahua	1,334,297.09	kwh
Gasto de recurso hídrico en Chihuahua aproximado.	2,782.56	Mm3
CO₂ que se deja de emitir por kilowatt-hora	715.00	g
Ahorro económico en energía eléctrica aproximado.	\$540,390,321.45	Pesos mensuales
	\$6,484,683,857.40	Anuales
Ahorro del recurso hídrico con sistema de riego por goteo hasta un 40%.	1,113.02	Mm3
CO₂ que se deja de emitir gracias al uso de energías solares.	954.02	Ton/hr
CO₂ que se deja de emitir anualmente	1,717,240.35	Ton

En cuanto a la energía eléctrica, como se vio en el apartado de diseño de sistema solar fotovoltaico, el margen de ahorro económico que generaría al tener una planta solar es considerable y más importante el impacto ambiental que se evita, si se considera que 715 gramos de gases contaminantes a la atmósfera se dejan de emitir por cada kilowatt-hora (Arrastría, 2017), lo cual equivale a 1'717,240.35 toneladas por año que no afectarían a la atmósfera.

El estudio de la página web *invictus* hace una comparación en cuanto a la cantidad de árboles que se deben de plantar de acuerdo a la emisión de carbono. Teniendo en cuenta que cada 25 kg que no se emiten de gases contaminantes es igual a 1 árbol plantado, en este caso, con la cantidad de toneladas anuales que no se emiten sería igual a 68,689,614.00 de árboles plantados anualmente (“¿A cuántos árboles cortados equivale tu consumo de luz anual?”, 2017).

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

V.1 Conclusiones

La presente tesis tuvo como objetivo principal presentar una alternativa para conservar el agua y mejorar el medio ambiente a través del riego de cultivos, implementando el uso de sensores de humedad y energía solar fotovoltaica. Lo anterior se llevó a cabo a través de la simulación de la construcción de un sistema de riego óptimo que incluye: sensores de humedad, aparatos electrónicos para mandar y almacenar la información; en consecuencia, se puede lograr un ahorro para el gasto de agua y energía, por lo tanto, se puede contribuir a la conservación del medio ambiente.

Al ser la falta de agua uno de los principales problemas del estado de Chihuahua, se estudiaron a detalle los diferentes tipos de riego, se llegó a la conclusión de que un sistema de riego por goteo es el adecuado para el área, ya que se puede acoplar a terrenos irregulares y a los climas áridos. Ante este escenario, se observó y concluyó que el sistema de control de humedad óptimo para el estado de Chihuahua es el llamado sistema RIS.

En el mapa digital elaborado para conocer las curvas de nivel de las profundidades al nivel estático de las zonas del estado de Chihuahua se puede concluir que todo el centro y la porción este del estado tiene profundidades altas donde se necesitaría de bombas más grandes para extraer el agua subterránea por ende un gasto mayor en energía eléctrica y quema de combustibles fósiles.

La información sobre el consumo de energía eléctrica en el riego mecánico para los cultivos del estado de Chihuahua presenta para el año 2016 un promedio de caballos de fuerza de 1,788,602, que corresponden a 17,892 pozos. Por lo que, se concluyó que, la cantidad de energía utilizada en los diferentes servicios nos da la oportunidad de generar un ahorro considerable si se cambiara a energía renovable, ya que sería de gran ayuda al medio ambiente y generaría un ahorro económico al Estado.

Para el diseño del sistema de energía solar fotovoltaica que cubra las necesidades eléctricas de los diferentes servicios se consideraron tres opciones: una granja solar por el total de gasto, una granja solar por distrito y un sistema de paneles solares fotovoltaicos individual para cada servicio. Para cada opción se presentaron sus ventajas y desventajas, tanto económicas como administrativas. Se llegó a la conclusión de que lo más adecuado para cubrir las necesidades eléctricas de los distintos servicios es una granja solar por el total del gasto eléctrico en algunas de las zonas marcadas en esta tesis; de esta manera se conectaría toda esa energía a la red de CFE y se distribuiría por toda la red hacia sus diferentes destinos.

Para cuantificar el ahorro de recursos tanto hídricos como energéticos se tomaron en cuenta los datos de la SAGARPA, de todos los servicios, los cuales generan una extracción del agua subterránea de 2,782.56 hm³/año. Por lo que, debido al sistema propuesto, se ahorraría un 40% del total sin considerar el uso de sensores de humedad, ya que no se cuenta con un dato exacto de su ahorro. En conclusión, el porcentaje de ahorro de agua sería un gran beneficio hacia el Estado, ya que dicho recurso escasea; por esto la cantidad de ahorro generada con el sistema de riego propuesto se vuelve una opción viable, más aún al considerar que se adapta a terrenos irregulares y se recomienda en climas áridos como los del Estado.

Así mismo, el ahorro energético generado con el sistema propuesto puede beneficiar al medio ambiente, al dejar de emitir 1, 717,240.35 toneladas de gases tóxicos por año que producen los combustibles fósiles al quemarse, igualmente se beneficia a la economía del Estado ya que se subsidia en un 90% el gasto eléctrico de los agricultores y ese ingreso podría ser utilizado para otras obras.

En conclusión, el sistema propuesto en esta investigación, se adapta a las condiciones en las que se encuentra el estado; tanto en clima, topografía y usos de suelo, cuenta con la radiación necesaria para que un sistema de energía solar fotovoltaica sea la energía renovable óptima a utilizar. Con el problema actual de agua en el Estado se deben considerar diferentes opciones en cuanto al manejo y control de su uso; es por esto que la propuesta de un sistema donde se ahorre

y se controle el uso del agua es necesario para los posibles planes a futuro del Estado. Además, agregándole el beneficio al medio ambiente con el uso de energías renovables se vuelve un sistema completo para todos los ámbitos.

V.2 Recomendaciones

Es importante ampliar la investigación que pueda incluir el ahorro del agua al utilizar sensores de humedad. Se requerirá de un estudio más a detalle sobre el sistema propuesto, una vez instalado y varias pruebas de manejo para confirmar el funcionamiento en conjunto, el control y el ahorro del agua, así como también el ahorro económico tanto en energía eléctrica como en recurso hídrico.

Es uno de los primeros estudios realizados en el estado de Chihuahua, donde se utiliza la energía renovable en conjunto con el ahorro de agua. Por lo que de implementarse, puede llegar a ser una solución para la sobreexplotación de los acuíferos y el impacto ambiental por la quema de combustibles fósiles en la agricultura.

VI. REFERENCIA

2007. Cubierta con polipropileno y fertilización potásica en fertirriego: Implicaciones en crecimiento, rendimiento y nutrición del jitomate. *TERRA Latinoamericana* 25:69-76.

Aparicio, M, F. J. 2005. Fundamentos de hidrología de superficie. Editorial LIMUSA. México, D. F. Pp. 303

Atkinson, C. J., M. Policarpo, A. D. Webster, and A. M. Kuden. 1999. Drought tolerance of apple rootstocks: production and partitioning of dry matter. *Plant Soil* 206: 223-235.

Ávila M. M. R., J. J. Salmerón Z. 1999. Adopción de variedades de avena y su impacto en el Estado de Chihuahua. Folleto Científico No. 5. CESICH-CIRNOC-INIFAP-SAGAR. Ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua, México. 38 p.

Carabias, J., 2005. Agua "Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México", Medio ambiente y sociedad-- 1a ed. -- México, D.F.

Chalmers, D. J., P. D. Mitchell, and L. Van Heek, 1981. Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density and summer pruning. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 106: 307-312.

Chávez, J., Gómez, S., 1999, Guía para producir forraje de avena y cebada bajo riego en la costa de Ensenada, Instituto Naciy Pecuarias Onal de Investigaciones Forestales, Agrícolas Centstero de Investigación Regional del Noroecampo Experimental Costa de Ensenada.

CONACYT. 2014. Algodón, Recuperado el 11 de Septiembre de 2018 de <https://www.conacyt.gob.mx/cibiogem/index.php/algodon>

Contijoch, E.M. 1998. Resultados del Programa de Ferti-irrigación y Perspectivas a Corto Plazo. Memorias del III Simposio Internacional de Ferti-irrigación. León Guanajuato. Pp. 203-216

Cultivos Tropicales, vol. 22, núm. 4, Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas La Habana, Cuba pp. 43-49

De la Fe, C., Hernández, O., Palacios, J., Palacios, J. A. y González, E. 2001. Desarrollo del cultivo de la vid en el sector campesino-cooperativo del occidente de Cuba, Cultivos Tropicales, vol. 22, núm. 4, Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. La Habana, Cuba. Pp. 43-49

Delgadillo, O.; 2000, "Algunos apuntes conceptuales sobre los métodos y tipo de riego campesino y su relación con el diseño de sistemas de riego", Ponencia presentada en el Seminario Internacional CORA, Centro A.G.U.A.

Demin, E. 2004. 2 Aportes para el mejoramiento del manejo de los sistemas de riego Pablo, Métodos de riego: fundamentos, usos y adaptaciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Pp. 978-987-521-512

Dunne, T. and B. L. Leopold. 1978. Water in environmental planning. W. H. Freeman and company. New York. USA. Pp. 818

Edward, C. M. 2010. Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego. ¿Cuándo? Arizona Cooperative Extension. University of Arizona. 8 p.

Eliosa-Martínez, J. A. 2012 Migración internacional. Estrategia de sobrevivencia e identidad campesina en San Felipe Teotlacingo, Puebla, México. Rev. Agr. Soc. Des. 9(1):71-84.

Enciso, J. M., Porter, D., Péries, X. 2007. Uso de Sensores de Humedad del Suelo para Eficientar el Riego. Cooperativa de Texas Extensión. Universidad de Texas. 14 p.

Florentino, A. 2006. Métodos para medir el contenido de agua en el suelo. *Venesuelos*, 14, 48-70.

Flores, M., Flores, F., Velasco, V., González, G., Jurado, F. 2015. Monitoreo de humedad en suelo a través de red inalámbrica de sensores. *Tecnología y Ciencias del Agua*. Pp. 75-88.

Gobierno Federal, 2009, "Monitoreo agroeconómico 2009 del Estado de Chihuahua", SAGARPA.

Godoy, A., 1994 Manejo del agua en diferentes etapas fenológicas del nogal. *Memorias del xii conferencias internacionales sobre el cultivo del nogal*. Delicias, Chihuahua. Pag 128-137

Gray, O. S. 1973. Consider pollen when planting. *The Pecan quarterly*. 7(3). Pp. 24-25.

Gutiérrez C., J., S. Beltrán L., J. G. Medina T. y J. A. Díaz G. 1990. Efecto de tres tipos de vegetación sobre la infiltración y la producción de sedimentos en el rancho los Ángeles, Coahuila, México. *Monografía Técnico-Científica*. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila. México. 6: 36-50.

Herrera, E. y Clevenger, T. 1996. Importancia Económica de la Industria Nogalera en EUA. Guía Z-501, Nuevo México, EE.UU. Servicio Cooperativo de Extensión Agrícola. NMSU. 2-5 pp

Hillel, D. 1971. *Soil and water: Physical principles and processes*. Academic Press. New York. USA. Pp. 275

Hillel, D. 2003. *Introduction to Environmental Soil Physics*. Academic Press, San Diego, CA. 494 p.

Ibáñez M., A., A. E. Becerril R., A. Castillo M., R. A. Parra Q. y C. López C. 2000. Efecto de cubiertas, riego y fertilización foliar en el desarrollo radical del manzano. *Terra* 18: 225-237.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2005. Anuario estadístico, Chihuahua. Agricultura. Aguascalientes, Aguascalientes. México.

INEGI, 1999. Estudio Hidrogeológico de Chihuahua

Infografía ¿Cómo se Utiliza el Agua Dulce en México y en el Mundo?, (2 Febrero, 2015), recuperado de, https://www.trotamundosweb.com/infografias/agua_dulce_en_mexico/

Kilili, A. W., M. H. Behnoudian, and T.M. Mills. 1996. Composition and quality of Braeburn apples under reduced irrigation. *Sci. Hort.* 67: 1-11.

Kouro, S. 2001. Automatización Industrial: Sensores De Humedad, universidad técnica Federico Santa María departamento de electrónica

Lawande, K.E. 2001. Onion. In: Handbook of herbs and spices. K.V. Peter (Ed.). Woodhead Publishing. England. pp. 238-249

Leib, B. G., H. W. Caspari, C. A Redulla, P. K. Andrews, and J. J. Jabro. 2006. Partial rootzone drying and deficit irrigation of Fuji apple in semi-arid climate. *Irrigation Sci.* 24: 85-99.

Lotta, M., Carrion, R., Ciancaglini, N., Olguin, A. 2015. Manual de capacitación riego por goteo. Primera edición especial.

Mendoza, L., Enríquez, X. 2013. Propiedades fisicoquímicas y antioxidantes del chile jalapeño fresco y seco. Universidad Veracruzana Instituto de Ciencias Básicas. Veracruz.

MONITOR AGROECONÓMICO 2009 DEL ESTADO DE CHIHUAHUA, (Abril 2009), recuperado de, <https://docplayer.es/72688839-Monitor-agroeconomico-2009-del-estado-de-chihuahua-abril-2009.html>

Montaño, N., Sandoval, A. 2007. Contaminación atmosférica y salud. Elementos: ciencia y cultura. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México. Pp. 29-33.

NaanDanjain Irrigation. 2011. Maíz (en línea). Consultado 10 de septiembre de 2012. Disponible en http://es.naandanjain.com/uploads/Crop%20Booklets/Spanish/Corn_america_la_tina_2804_11F.pdf

Nadal, A., S/F, estudio temático 1. El maíz en México: Algunas implicaciones del tratado de libre comercio de América del Norte, Secretariado de la CCA.

Naor, A., I. Klein, H. Hupert, Y. Greenblat, M. Peres, and A. Kaufman. 1999. Water stress and crop load interactions in relation to nectarine yield, fruit size distribution and water potentials. J. Am. Soc. Hort. Sci. 124: 189-193.

Nava, A. 2005. Cultivo y manejo del durazno prunus pérsica I. Universidad autónoma agraria Antonio Narro división de agronomía. Buenavista Saltillo.

Nava, A. 2005. Universidad autónoma agraria Antonio Narro división de agronomía cultivo y manejo del durazno prunus pérsica, presentado como requisito parcial para obtener el título de: ingeniero agrónomo en producción Buenavista saltillo, Coahuila, México

Núñez, a. 2015. Manual del cálculo de eficiencia para sistemas de riego, ministerio de agricultura y riego, dirección general de infraestructura agraria y riego – dgjar, Lima, Perú

Orona, I., Sangerman-Jarquín, D., Hernández, M., Vázquez, C.; gallegos, M. 2013. Producción y comercialización de nuez pecanera (*Carya illinoensis* Koch) en el norte de Coahuila, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* Vol.4. México. Pp. 461-476

Osuna, C.F.J., M. Sandoval-Villa, G., Alcántar G., C. Trejo V., Volke H. 2006. Cubierta con polipropileno y potasio en fertirriego:

Osuna, J., Ramírez, S. 2013. Manual para cultivar cebolla con fertirriego y riego por gravedad en el estado de Morelos, Centro de Investigación Regional Pacífico Sur Campo Experimental Zacatepec, Zacatepec, Morelos.

Parra Q., R. A., J. A. Orozco A., M. González P., J. P. Amado A. y P. Ortiz F. 2005. Rendimiento y tamaño del fruto del manzano sometido a estrés hídrico planificado en Chihuahua, México. *Agric. Téc. Méx.* 31: 11-20.

Parra Q., R.A., A. E. Becerril R. Y C. López C. 2002a. Transpiración, resistencia estomática y potenciales hídricos en manzano Golden Delicious injertados sobre portainjertos clonales. *Terra* 20: 113-121.

Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Vol.4 Núm.3 01 de abril - 15 de mayo, 2013 p. 461-476

Roca, J., "Las 20 mayores plantas fotovoltaicas del mundo: China, India y EEUU arrasan", (9 de Noviembre, 2018), recuperado de, <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-fotovoltaicas-del-mundo/>

Ruiz, C. 2018. Riego por goteo permite ahorros de un 40% en el consumo de agua Editorial La República S.A.S. Bogotá

S/A, S/F. Estudio temático 1. El maíz en México: Algunas implicaciones ambientales del Tratado de Libre Comercio de América del Norte, Recuperado el 28 de octubre de 2018 en <http://www3.cec.org/islandora/es/item/2034->

assessing-environmental-effects-north-american-free-trade-agreement-nafta-
es.pdf

Sáez, A. 2010. La agricultura y su evolución a la agroecología, Obra propia Editorial, S.L., valencia, España. Pp. 3-6

SAGARPA, 2017-2030. Planeación agrícola nacional

Servicio Geológico Mexicano. 2016. Panorama minero del estado de chihuahua.

SIACON. SIAP. SAGARPA. 2011. México

Vaquero, Toxqui. S/f. "Agua para la Salud. Pasado, presente y futuro", eds. CSIC. 2012. ISBN: 978-84-00-09572-7.pp: 33-45.

Villaú, M. MANEJO DEL RIEGO EN EL CULTIVO DE MAÍZ Técnico de Desarrollo Agronómico Pioneer Hi-Bred Spain, S.L.

Walker, W.R; SKOGERBOE, G.V. 1987. Surface irrigation. Theory and practice. Prentice hall 386 p.

¿A cuántos árboles cortados equivale tu consumo de luz anual?, (11 Febrero 2017), recuperado de, <https://www.invictus.mx/blog/a-cuantos-arboles-cortados-equivale-tu-consumo-anual-en-tu-recibo-de-luz>

ANEXOS

POZO	CICLO 62											
	ENERO KW	FEBRERO KW	MARZO KW	ABRIL KW	MAYO KW	JUNIO KW	JULIO KW	AGOSTO KW	SEP KW	OCTUBRE KW	NOV KW	DIC KW
38	2.513	1.693	24.161	10.483	23.049	20.391	26.689	18.445	16.620	18.803	4.851	638
49	1.618	2.194	10.367	22.445	92.950	31.801	34.439	23.971	18.544	21.376	5.470	1
19	1.480	5.040	16.387	28.373	39.107	33.552	32.768	27.308	29.893	27.267	10.280	2.832
45	3.808	6.656	16.544	24.528	39.232	32.125	57.696	30.544	34.060	42.512	12.944	3.220
28	845	6.690	10.162	24.339	71.561	29.322	30.252	26.602	24.640	22.948	11.144	1.012
56	529	0	2.148	12.277	10.612	7.079	10.612	4.239	3.720	9.347	6.667	1
58	1.050	1.807	4.286	8.739	18.926	22.344	23.100	23.420	20.977	23.687	3.740	4.601
13	960	2.467	11.632	31.824	44.320	40.107	41.712	38.224	33.947	39.000	35.031	608
33	893	3.640	9.960	23.240	35.347	36.760	37.392	35.173	29.733	31.320	6.413	1.760
47	14.933	14.079	46.029	17.751	22.697	19.245	22.120	21.564	20.395	22.395	19.960	18.398
30	3.400	5.760	14.947	21.880	32.507	29.787	28.256	23.067	28.120	17.673	3.600	314
6	2.949	3.539	13.004	20.600	33.821	33.867	23.411	22.003	25.309	14.479	8.712	2.465
5	2.347	2.922	9.925	14.349	23.033	17.154	18.115	12.753	17.247	16.252	7.340	1.259
2	2.503	6.991	8.075	23.410	36.036	35.617	30.552	24.458	27.297	21.241	17.261	236
46	283	2.542	10.860	13.297	21.202	22.182	25.883	20.405	16.254	16.670	12.325	488
25	640	1.867	9.493	31.627	38.493	37.227	41.872	34.240	37.133	33.173	15.147	5.568
7R	83	591	13.433	27.394	24.780	27.023	29.306	24.583	23.325	18.311	18.145	723
32	869	181	7.230	20.815	26.212	35.777	30.626	21.702	24.214	28.033	11.132	412
24	83	0	3.297	17.738	22.818	33.069	27.070	23.581	20.359	16.951	13.889	1.464
27	510	1.032	6.891	18.289	26.892	25.642	23.450	20.307	23.085	18.555	15.210	439
31	1.670	4.793	16.729	23.660	31.787	23.447	24.378	20.214	24.247	17.522	15.789	2.042
42	627	2.533	7.926	19.631	28.175	21.863	24.581	21.184	18.780	16.077	13.618	782
1	272	1.907	8.452	24.077	26.509	30.617	29.428	26.907	28.662	20.966	7.835	0
2CLR	0	1.027	14.107	21.707	29.533	27.800	24.032	14.827	13.400	12.760	3.947	0
22	1.674	6.576	15.825	25.419	32.604	26.414	32.329	29.310	28.653	29.053	9.897	2.584
65	2.253	3.787	17.760	42.960	56.073	48.240	51.840	45.467	45.853	36.173	17.027	2.992
9	24	2.814	7.551	19.874	21.591	25.231	28.891	24.022	21.857	24.404	2.319	69
55	5.131	7.404	7.500	8.144	10.965	8.427	9.628	8.750	9.847	9.909	8.053	7.461
3C	4.664	3.788	9.544	22.797	27.459	28.449	30.002	26.526	28.205	27.592	10.930	1.913
15	113	797	7.713	21.432	25.933	25.870	27.618	24.989	25.029	30.990	8.674	891
63	1.432	7.567	12.332	28.744	34.415	30.252	35.876	33.295	35.252	32.612	14.259	3.767
52	1.084	2.359	8.941	18.982	21.859	25.271	24.148	25.135	27.403	20.591	7.941	186
26	524	3.039	12.948	25.950	27.652	29.587	31.392	28.889	30.503	21.080	6.095	0
53	994	2.839	15.543	24.551	34.961	25.022	26.036	26.592	20.239	19.665	12.712	20
3	368	480	1.387	1.297	4.132	4.288	4.059	3.283	3.313	1.825	2	2
san jose	913	907	512	1.140	1.966	2.328	4.603	3.279	1.365	1.064	0	135

POZO	CICLO 63											
	ENERO KW	FEBRERO KW	MARZO KW	ABRIL KW	MAYO KW	JUNIO KW	JULIO KW	AGOSTO KW	SEP KW	OCTUBRE KW	NOV KW	DIC KW
1C	702	5,027	11,986	26,692	25,493	28,634	28,998	26,447	27,888	21,483	9,511	1,867
20C	90	8,036	17,500	25,550	30,335	29,031	30,707	25,964	22,465	20,406	11,228	1,302
3C	2,294	3,424	11,239	21,861	19,478	19,648	29,354	20,462	22,748	20,300	11,488	1,994
4C	1,539	2,079	11,711	19,626	20,771	21,291	23,053	18,957	20,300	17,815	7,545	758
16C	66	1,626	4,896	37,287	22,990	23,176	22,999	22,572	22,056	15,345	5,686	404
43C	2,848	7,301	13,196	34,297	37,343	33,770	40,833	37,033	39,843	28,706	15,877	1,667
21C	132	2,877	8,498	19,947	22,899	23,733	24,902	22,225	22,949	15,076	5,242	718
44C	193	3,413	9,453	14,772	16,044	17,810	28,079	22,245	16,130	11,127	11,175	1,500
18C	632	2,119	14,068	22,872	28,457	29,695	32,427	30,512	24,248	22,321	7,687	1,456
35C	751	3,724	15,627	27,659	35,726	36,920	32,786	26,607	42,283	25,251	7,223	5
36C	2,376	5,770	8,238	25,850	27,678	33,401	33,243	32,210	32,967	19,264	10,172	2,233
34R	1,133	3,587	15,853	31,587	36,133	36,987	31,911	30,480	36,227	28,040	14,042	3,200
17	3	2,808	14,396	29,718	31,197	34,461	35,024	32,953	32,176	17,003	7,765	305
48	236	3,126	6,037	17,001	22,773	23,017	23,242	22,731	21,725	17,564	5,757	215
29R	0	0	0	8,180	0	0	0	0	0	6,140	0	0
5M	1,412	6,069	14,923	25,307	30,005	27,565	28,377	21,883	19,853	21,747	13,742	3,055
4M	785	5,634	15,349	30,946	31,833	31,728	31,971	27,275	26,121	14,336	12,023	2,970
51M	370	3,299	14,693	27,540	25,791	27,281	35,945	21,256	23,175	17,214	10,292	6,207
3M	295	7,897	17,375	17,375	32,871	29,222	24,553	19,857	20,292	18,209	8,405	1,449
2M	1,167	4,108	11,779	25,198	28,621	27,944	26,059	24,446	23,938	15,394	9,150	944
1M	68	3,100	17,358	18,864	25,636	26,992	26,995	26,183	44,254	28,992	6,665	0
50C	0	2,349	9,713	24,529	27,280	30,763	31,944	23,166	30,180	19,299	10,866	665
23	484	3,057	8,115	26,630	28,059	25,967	34,680	23,789	26,324	18,930	10,936	1,324
1P	1,300	2,229	9,296	20,776	26,491	25,949	24,291	21,988	14,121	11,793	9,455	380
2P	99	3,001	12,627	21,321	26,571	24,977	24,475	20,517	21,502	13,762	11,280	1,295
3R	210	5,079	19,676	30,166	40,379	31,552	39,933	31,850	35,525	24,827	14,521	578
4P	1,431	2,468	11,011	21,172	29,440	28,437	28,061	24,135	24,182	16,121	7,362	555
5P	1,770	4,650	7,844	20,871	22,150	19,756	19,112	17,689	14,389	9,876	9,279	715
6P	1,039	4,638	19,992	34,147	39,044	46,406	42,954	39,123	38,590	18,828	7,921	1,971
7P	1,573	7,840	17,453	32,267	39,507	37,667	37,488	37,613	27,507	19,853	7,744	0
9P	27	2,228	12,643	29,767	28,358	30,688	26,572	26,483	27,659	16,102	4,497	0
8PR	107	773	21,707	35,213	36,227	43,947	38,048	33,400	28,320	19,667	4,093	0
64	400	5,733	12,992	32,800	36,727	34,947	34,848	32,080	32,027	23,737	7,200	352
39	4,526	4,830	6,139	25,296	23,767	22,280	22,304	20,385	17,048	13,995	5,721	2,593
54	3,874	7,411	12,576	24,454	28,225	27,595	21,621	32,518	26,798	19,696	13,874	6,190
41	2,191	4,145	13,050	32,935	31,767	33,320	36,750	32,615	42,287	23,865	6,869	790
37	105	4,040	12,861	24,008	26,344	30,463	26,364	25,591	24,791	20,797	6,429	325
40	230	2,416	8,881	21,790	26,164	26,453	23,396	22,818	23,595	20,553	6,129	2,804
57	128	1,130	8,766	15,997	15,537	16,420	19,813	17,195	17,069	12,223	3,087	892
62	362	2,294	1,636	17,914	25,805	24,539	26,649	23,822	23,274	18,506	16,491	552
6M	2,007	6,689	12,111	22,411	32,577	25,961	28,811	17,372	23,274	18,506	10,523	830
7M	2,007	1,951	11,288	22,068	29,942	28,550	28,128	25,952	22,312	16,594	14,728	2,885
8M	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3,352	1,380	0
9M	74	1,215	14,513	23,675	28,859	30,562	23,750	14,845	28,607	17,614	5,978	1,319
10M	1,282	3,496	14,925	28,847	33,513	32,541	23,408	27,225	27,902	15,638	12,519	1,999
61	3	7	6,019	23,282	22,799	22,660	22,838	19,827	18,643	16,976	5,859	0
29	653	2,067	9,213	21,840	18,227	17,573	34,416	32,016	31,533	14,373	16,120	448
55	867	4,027	13,047	33,800	32,253	38,351	39,328	40,747	35,000	23,400	10,267	2,384

POZO	Promedio mensual kw	Dias	Promedio x dia kwd	Radiacion promedio (hora)	Promedio diario kwh	Tamaño paneles (w)	Num. Paneles de 370w	Tamaño Inversor central (kw)	Numero de inversor de 60kw	Tamaño de sistema kwh
38	12.952	30	431.73	5	86.35	370	233.36	60	2.00	86
49	20.402	30	680.06	5	136.01	370	367.60	60	3.00	136
19	19.562	30	652.07	5	130.41	370	352.47	60	3.00	130
45	23.378	30	779.27	5	155.85	370	421.23	60	3.00	156
28	19.965	30	665.50	5	133.10	370	359.73	60	3.00	133
56	5.176	30	172.53	5	34.51	370	93.26	60	1.00	35
58	12.056	30	401.88	5	80.38	370	217.23	60	2.00	80
13	24.603	30	820.11	5	164.02	370	443.30	60	3.00	164
33	19.359	30	645.29	5	129.06	370	348.81	60	3.00	129
47	19.975	30	665.83	5	133.17	370	359.91	60	3.00	133
30	16.103	30	536.77	5	107.35	370	290.14	60	2.00	107
6	15.705	30	523.50	5	104.70	370	282.97	60	2.00	105
5	10.977	30	365.90	5	73.18	370	197.78	60	2.00	73
2	17.975	30	599.17	5	119.83	370	323.88	60	2.00	120
46	12.495	30	416.50	5	83.30	370	225.14	60	2.00	83
25	22.039	30	734.63	5	146.93	370	397.10	60	3.00	147
7R	17.308	30	576.94	5	115.39	370	311.86	60	2.00	115
32	15.941	30	531.37	5	106.27	370	287.22	60	2.00	106
24	13.873	30	462.42	5	92.48	370	249.96	60	2.00	92
27	13.872	30	462.38	5	92.48	370	249.94	60	2.00	92
31	15.870	30	528.99	5	105.80	370	285.94	60	2.00	106
42	13.371	30	445.69	5	89.14	370	240.91	60	2.00	89
1	15.818	30	527.27	5	105.45	370	285.01	60	2.00	105
2CLR	13.595	30	453.16	5	90.63	370	244.95	60	2.00	91
22	18.489	30	616.31	5	123.26	370	333.14	60	3.00	123
65	28.499	30	949.98	5	190.00	370	513.50	60	4.00	190
9	13.743	30	458.09	5	91.62	370	247.62	60	2.00	92
55	7.790	30	259.68	5	51.94	370	140.37	60	1.00	52
3C	18.489	30	616.30	5	123.26	370	333.14	60	3.00	123
15	15.389	30	512.98	5	102.60	370	277.29	60	2.00	103
63	20.759	30	691.96	5	138.39	370	374.03	60	3.00	138
52	14.150	30	471.67	5	94.33	370	254.96	60	2.00	94
26	16.745	30	558.17	5	111.63	370	301.71	60	2.00	112
53	16.094	30	536.48	5	107.30	370	289.99	60	2.00	107
3	1.880	30	62.66	5	12.53	370	33.87	60	1.00	13
san jose	1.518	30	50.59	5	10.12	370	27.35	60	1.00	10

POZO	Promedio mensual kw	Dias	Promedio x dia kw/d	Radiacion promedio (hora)	Promedio diario kwh	Tamaño paneles (w)	Num. Paneles de 370w	Tamaño Inversor central (kw)	Numero de Inversor de 60kw	Tamaño de sistema kwh
1C	17,894	30	596,46	5	119,29	370	322,41	60	2,00	119
20C	18,551	30	618,37	5	123,67	370	334,26	60	3,00	124
3C	15,357	30	511,91	5	102,38	370	276,71	60	2,00	102
4C	13,782	30	459,40	5	91,88	370	248,33	60	2,00	92
16C	14,816	30	493,87	5	98,77	370	266,95	60	2,00	99
43C	24,393	30	813,09	5	162,62	370	439,51	60	3,00	163
21C	14,016	30	467,21	5	93,44	370	252,55	60	2,00	93
44C	12,662	30	422,05	5	84,41	370	228,14	60	2,00	84
18C	18,041	30	601,37	5	120,27	370	325,07	60	3,00	120
35C	21,213	30	707,11	5	141,42	370	382,22	60	3,00	141
36C	19,440	30	648,00	5	129,60	370	350,27	60	3,00	130
34R	22,422	30	747,39	5	149,48	370	403,99	60	3,00	149
17	18,294	30	609,81	5	121,96	370	329,63	60	3,00	122
48	12,575	30	419,16	5	83,83	370	226,57	60	2,00	84
29R	1,193	30	39,78	5	7,96	370	21,50	60	1,00	8
5M	17,828	30	594,27	5	118,85	370	321,23	60	2,00	119
4M	19,248	30	641,59	5	128,32	370	346,80	60	3,00	128
51M	17,755	30	591,84	5	118,37	370	319,91	60	2,00	118
3M	15,170	30	505,66	5	101,13	370	273,33	60	2,00	101
2M	16,512	30	550,41	5	110,08	370	297,52	60	2,00	110
1M	18,726	30	624,18	5	124,84	370	337,40	60	3,00	125
50C	17,564	30	585,48	5	117,10	370	316,48	60	2,00	117
23	16,023	30	534,10	5	106,82	370	288,70	60	2,00	107
1P	14,005	30	466,84	5	93,37	370	252,35	60	2,00	93
2P	15,119	30	503,96	5	100,79	370	272,41	60	2,00	101
3R	22,858	30	761,93	5	152,39	370	411,86	60	3,00	152
4P	16,198	30	539,93	5	107,99	370	291,86	60	2,00	108
5P	12,342	30	411,39	5	82,28	370	222,37	60	2,00	82
6P	24,554	30	818,48	5	163,70	370	442,42	60	3,00	164
7P	22,209	30	740,31	5	148,06	370	400,17	60	3,00	148
9P	17,085	30	569,51	5	113,90	370	307,84	60	2,00	114
8PR	21,792	30	726,39	5	145,28	370	392,64	60	3,00	145
64	19,485	30	649,50	5	129,90	370	351,08	60	3,00	130
39	12,992	30	433,08	5	86,62	370	234,10	60	2,00	87
54	17,294	30	576,47	5	115,29	370	311,61	60	2,00	115
41	20,048	30	668,27	5	133,65	370	361,23	60	3,00	134
37	15,552	30	518,40	5	103,68	370	280,22	60	2,00	104
40	14,247	30	474,89	5	94,98	370	256,70	60	2,00	95
57	9,856	30	328,55	5	65,71	370	177,59	60	2,00	66
62	13,723	30	457,43	5	91,49	370	247,26	60	2,00	91
6M	16,772	30	559,06	5	111,81	370	302,20	60	2,00	112
7M	17,200	30	573,34	5	114,67	370	309,92	60	2,00	115
8M	394	30	13,15	5	2,63	370	7,11	60	1,00	3
9M	15,925	30	530,84	5	106,17	370	286,94	60	2,00	106
10M	18,608	30	620,26	5	124,05	370	335,28	60	3,00	124
61	12,228	30	407,60	5	81,52	370	220,32	60	2,00	82
29	15,270	30	509,00	5	101,80	370	275,13	60	2,00	102
55	21,040	30	701,34	5	140,27	370	379,11	60	3,00	140

POZO	Costo por watt (USD)	TOTAL (USD)	Ahorro a 2.7 peso el kwh	Total en pesos 1 dólar= 20.5 peso	Recuperación de la inversión (meses).	Recuperación en años.
38	\$1.15	\$99,296.80	\$38,466.72	\$2,035,584.38	52.92	4.41
49	\$1.15	\$156,414.00	\$60,593.42	\$3,206,486.93	52.92	4.41
19	\$1.15	\$149,975.57	\$58,099.23	\$3,074,499.17	52.92	4.41
45	\$1.15	\$179,231.33	\$69,432.66	\$3,674,242.33	52.92	4.41
28	\$1.15	\$153,064.25	\$59,295.76	\$3,137,817.19	52.92	4.41
56	\$1.15	\$39,682.69	\$15,372.73	\$813,495.07	52.92	4.41
58	\$1.15	\$92,432.60	\$35,807.58	\$1,894,868.23	52.92	4.41
13	\$1.15	\$188,625.95	\$73,072.05	\$3,866,831.95	52.92	4.41
33	\$1.15	\$148,417.82	\$57,495.77	\$3,042,565.32	52.92	4.41
47	\$1.15	\$153,140.21	\$59,325.19	\$3,139,374.35	52.92	4.41
30	\$1.15	\$123,456.69	\$47,826.05	\$2,530,862.09	52.92	4.41
6	\$1.15	\$120,405.30	\$46,643.97	\$2,468,308.75	52.92	4.41
5	\$1.15	\$84,157.31	\$32,601.81	\$1,725,224.95	52.92	4.41
2	\$1.15	\$137,809.43	\$53,386.18	\$2,825,093.40	52.92	4.41
46	\$1.15	\$95,795.90	\$37,110.50	\$1,963,816.04	52.92	4.41
25	\$1.15	\$168,964.49	\$65,455.37	\$3,463,771.99	52.92	4.41
7R	\$1.15	\$132,695.67	\$51,405.15	\$2,720,261.19	52.92	4.41
32	\$1.15	\$122,214.22	\$47,344.72	\$2,505,391.42	52.92	4.41
24	\$1.15	\$106,356.15	\$41,201.45	\$2,180,301.03	52.92	4.41
27	\$1.15	\$106,348.43	\$41,188.46	\$2,180,142.86	52.92	4.41
31	\$1.15	\$121,668.74	\$47,133.41	\$2,494,209.21	52.92	4.41
42	\$1.15	\$102,507.99	\$39,710.70	\$2,101,413.84	52.92	4.41
1	\$1.15	\$121,271.06	\$46,979.35	\$2,486,056.69	52.92	4.41
2CLR	\$1.15	\$104,227.48	\$40,376.82	\$2,136,663.37	52.92	4.41
22	\$1.15	\$141,750.47	\$54,912.90	\$2,905,884.55	52.92	4.41
65	\$1.15	\$218,494.30	\$84,642.79	\$4,479,133.13	52.92	4.41
9	\$1.15	\$105,360.80	\$40,815.86	\$2,159,896.36	52.92	4.41
55	\$1.15	\$59,725.68	\$23,137.21	\$1,224,376.49	52.92	4.41
3C	\$1.15	\$141,750.04	\$54,912.73	\$2,905,875.89	52.92	4.41
15	\$1.15	\$117,985.56	\$45,706.58	\$2,418,703.92	52.92	4.41
63	\$1.15	\$159,151.13	\$61,653.77	\$3,262,598.25	52.92	4.41
52	\$1.15	\$108,484.08	\$42,025.79	\$2,223,923.65	52.92	4.41
26	\$1.15	\$128,378.37	\$49,732.67	\$2,631,756.64	52.92	4.41
53	\$1.15	\$123,389.95	\$47,800.19	\$2,529,493.93	52.92	4.41
3	\$1.15	\$14,412.05	\$5,583.10	\$295,446.94	52.92	4.41
san jose	\$1.15	\$11,635.98	\$4,507.68	\$238,537.53	52.92	4.41

POZO	Costo por watt (USD)	TOTAL (USD)	Ahorro a 2.7 peso el kWh	Total en pesos 1 dólar= 20.5 peso	Recuperación de la inversión (meses).	Recuperación en años.
1C	\$1.15	\$137,186.55	\$53,144.87	\$2,812,324.18	52.92	4.41
20C	\$1.15	\$142,225.59	\$55,096.96	\$2,915,624.59	52.92	4.41
3C	\$1.15	\$117,740.36	\$45,611.59	\$2,413,677.48	52.92	4.41
4C	\$1.15	\$105,662.72	\$40,932.82	\$2,166,085.84	52.92	4.41
16C	\$1.15	\$113,588.95	\$44,003.37	\$2,328,573.48	52.92	4.41
43C	\$1.15	\$187,010.10	\$72,446.09	\$3,833,707.13	52.92	4.41
21C	\$1.15	\$107,459.28	\$41,628.79	\$2,202,915.23	52.92	4.41
44C	\$1.15	\$97,072.56	\$37,605.07	\$1,989,987.58	52.92	4.41
18C	\$1.15	\$136,315.49	\$53,582.22	\$2,835,467.63	52.92	4.41
35C	\$1.15	\$162,636.39	\$63,003.92	\$3,334,045.92	52.92	4.41
36C	\$1.15	\$149,039.94	\$57,736.78	\$3,056,318.69	52.92	4.41
34R	\$1.15	\$171,899.63	\$66,592.42	\$3,523,942.49	52.92	4.41
17	\$1.15	\$140,255.63	\$54,333.89	\$2,875,244.48	52.92	4.41
48	\$1.15	\$96,406.45	\$37,347.02	\$1,976,332.15	52.92	4.41
29R	\$1.15	\$9,148.89	\$3,544.20	\$187,552.22	52.92	4.41
5M	\$1.15	\$136,682.95	\$52,949.79	\$2,802,000.51	52.92	4.41
4M	\$1.15	\$147,564.70	\$57,165.28	\$3,025,076.33	52.92	4.41
51M	\$1.15	\$136,122.43	\$52,732.65	\$2,790,509.88	52.92	4.41
3M	\$1.15	\$116,302.72	\$45,054.66	\$2,384,205.67	52.92	4.41
2M	\$1.15	\$126,593.94	\$49,041.39	\$2,595,175.73	52.92	4.41
1M	\$1.15	\$143,562.40	\$55,614.83	\$2,943,029.22	52.92	4.41
50C	\$1.15	\$134,660.89	\$52,166.46	\$2,760,548.24	52.92	4.41
23	\$1.15	\$122,842.19	\$47,588.00	\$2,518,264.98	52.92	4.41
1P	\$1.15	\$107,372.88	\$41,595.32	\$2,201,144.05	52.92	4.41
2P	\$1.15	\$115,911.61	\$44,903.15	\$2,376,187.99	52.92	4.41
3R	\$1.15	\$175,244.55	\$67,888.21	\$3,592,513.27	52.92	4.41
4P	\$1.15	\$124,184.41	\$48,107.96	\$2,545,780.43	52.92	4.41
5P	\$1.15	\$94,619.13	\$36,654.63	\$1,939,692.06	52.92	4.41
6P	\$1.15	\$188,250.42	\$72,926.58	\$3,859,133.64	52.92	4.41
7P	\$1.15	\$170,271.56	\$65,961.72	\$3,490,566.89	52.92	4.41
9P	\$1.15	\$130,987.00	\$50,743.23	\$2,685,233.54	52.92	4.41
8PR	\$1.15	\$167,070.30	\$64,721.58	\$3,424,941.07	52.92	4.41
64	\$1.15	\$149,385.59	\$57,870.68	\$3,062,404.59	52.92	4.41
39	\$1.15	\$99,608.60	\$38,587.50	\$2,041,976.23	52.92	4.41
54	\$1.15	\$132,588.36	\$51,363.58	\$2,718,061.29	52.92	4.41
41	\$1.15	\$153,701.25	\$59,542.53	\$3,150,875.72	52.92	4.41
37	\$1.15	\$119,231.71	\$46,189.33	\$2,444,249.96	52.92	4.41
40	\$1.15	\$109,225.09	\$42,312.85	\$2,239,114.41	52.92	4.41
57	\$1.15	\$75,565.46	\$29,273.40	\$1,549,091.89	52.92	4.41
62	\$1.15	\$105,208.15	\$40,756.72	\$2,156,767.14	52.92	4.41
6M	\$1.15	\$128,584.71	\$49,812.60	\$2,635,986.45	52.92	4.41
7M	\$1.15	\$131,868.93	\$51,084.88	\$2,703,312.98	52.92	4.41
8M	\$1.15	\$3,023.80	\$1,171.39	\$61,987.84	52.92	4.41
9M	\$1.15	\$122,092.60	\$47,297.61	\$2,502,898.38	52.92	4.41
10M	\$1.15	\$142,660.44	\$55,265.41	\$2,924,539.00	52.92	4.41
61	\$1.15	\$93,747.15	\$36,316.83	\$1,921,816.67	52.92	4.41
29	\$1.15	\$17,069.41	\$45,351.67	\$2,399,922.91	52.92	4.41
55	\$1.15	\$161,309.22	\$62,489.79	\$3,306,839.06	52.92	4.41