

## Medición y modelación de la evapotranspiración y componentes del rendimiento en cultivos anuales y perennes en el noroeste de México

### Descripción del problema:

La agricultura es el principal usuario del agua y se requiere conocer con precisión los requerimientos de agua de los cultivos. La determinación de las exigencias de agua de los principales cultivos del noroeste de México, contribuye al ahorro de agua. Considerando la superficie bajo riego en la región de 1.6 millones de ha., cada centímetro de agua ahorrado, significa un ahorro de 160 millones de metros cúbicos. Así cualquier ahorro de agua en esta magnitud, puede proporcionar agua potable a la ciudad más grande del noroeste de México. Por otro lado, el aplicar agua de riego a los cultivos a tiempo y en la cantidad necesaria también tiene efectos en el rendimiento. Por lo consiguiente, mediante modelación se puede optimizar el recurso agua y nutrientes para obtener la mejor ganancia por metro cúbico aplicada de agua en la agricultura. La formación de recursos humanos con el manejo de las técnicas y metodologías propuestas, contribuirá de manera significativa, ya que estos serán los científicos que dirigirán la política del agua en la región, en el sector privado o público.

### ¿Por qué se hace esta propuesta?:

En la gestión de recursos hídricos uno de los problemas más urgentes a atender, es la competencia por agua entre usuarios urbanos, industriales, agropecuarios y ecológicos (Ferreres and Sorinano, 2007; Bittelli, 2010). La disponibilidad de agua de riego, es otro factor que limita el crecimiento de la producción de alimentos, especialmente en las zonas áridas y semiáridas, donde el agua es escasa y en gran medida disminuirá aún más consecuencia del cambio climático (Martínez et al., 2014). A nivel global entre el 80 a 90% de agua es consumida por la agricultura, con una eficiencia de uso de alrededor del 50% a nivel parcelario (Hamdy *et al.*, 2003). México ocupa el sexto y octavo lugar en infraestructura para riego y en extracción de agua para uso agrícola a nivel global, respectivamente. Esta infraestructura se encuentra en 6.5 millones de hectáreas de los 20 millones cultivadas anualmente, y el 54% se encuentra en 85 distritos de riego. A nivel nacional la agricultura usa el 76% del agua total concesionada (63.3 km<sup>3</sup>), de la cual un tercio es agua subterránea, pero en algunas regiones alcanza el 100% (Costa de Hermosillo y Caborca en Sonora) (CONAGUA, 2013). En el noroeste de México (Baja California, Sinaloa y Sonora) son entidades con una importante vocación agrícola, y tienen una superficie bajo riego de 1.6 millones de hectáreas (~ 25% nacional) y consumen alrededor del 22% del volumen nacional concesionada y usan entre el 85 y 94% en agua concesionada en la agricultura. En estas entidades existen valles agrícolas o regiones que son líderes a nivel nacional en producción, y contribuye con el 18% de la producción nacional anual, tal es el caso de tomate (Sinaloa), trigo (Valle del Yaqui), maíz (Valle de Culiacán), Nopal (Costa de Hermosillo), forrajes y hortaliza (Baja California), (SIAP, 2015). Estos altos rendimientos conllevan a un importante consumo de agua y agroquímicos para obtener altos rendimientos, ya que el agua tiene un bajo valor en el costo de la producción. Matson et al. (1998) observó en el Valle del Yaqui una importante área de emisión a la atmósfera de óxido nítrico por exceso en la aplicación de productos nitrogenados, por otro lado Pérez et al. (2011) y García de la Parra (2012) mencionan la presencia de pesticidas en cultivos y sedimentos en los principales estados con actividad agrícola, siendo Sinaloa el mayor consumidor con el 30%.

Por lo anterior, se considera necesario retomar la problemática de uso de agua en la agricultura en el noroeste de México, con el fin de mejorar la eficiencia de uso (medición del riego y evapotranspiración, rendimiento), lo cual es posible, mediante la creación de una **red temática** entre CA y GI que proporcione evidencia de la cantidad de agua aplicado a los cultivos y la formación de recursos humanos de alta especialización en el manejo de nuevas tecnologías (covarianza de vórtices, modelos de cultivos y percepción remota), y que se transforme en una herramienta de aplicación ordinaria en los productos de los valles agrícolas, el conocer la demanda de agua del cultivo y su rendimiento.

### ¿Cuál es la necesidad que se pretende resolver?:

Como se mencionó previamente, la agricultura es el principal usuario del agua, con una baja eficiencia de aplicación, de este recurso escaso en el noroeste de México y en la mayor parte del País. El conocimiento correcto de las necesidades de agua del cultivo (Por que, cuando, cuanto y como regar: para lograr mejores cosecha), Palacios (2002), sigue siendo un tema vigente. En este sentido, se desarrollara la siguiente sección sobre los cultivos y las metodologías existentes para la medición de la aplicación del agua de riego, del consumo de agua de los cultivos y como esto impacta al rendimiento.

### Cultivos perennes.

El tipo de cultivo perenne cambia entre los valles agrícolas (ver Cuadro siguiente). En el se observa que en Sinaloa, el mango y la caña de azúcar son los principales cultivos, en Baja California lo son los forrajes (alfalfa),

mientras que en Sonora, existen varios cultivos, tales como la uva de mesa, nogal pecanero, esparrago y alfalfa. En el mismo cuadro se observa que Sonora duplica la superficie de perennes (87,657 ha) a los otros estados (Baja California, 41,761 a; Sinaloa, 40,598 ha). Considerando que la importancia del agua que consumen y los jornales que producen, se describirán en este orden: Esparrago, Nogal, Alfalfa y Vid.

**Esparrago (*Asparagus officinalis* L.).**

El esparrago, es un cultivo importante en el norte de Sonora y Baja California. En Sonora su superficie superior a las 12,000 ha, y en Baja California 2,461 ha. Requiere importantes láminas de riego anuales (1,890 mm, Fimbres, 2001; 5,750 mm, Navarro et al., 2005; 1,140-1,890 mm, Fimbres y Lizárraga, 2009; 1910mm, Fimbres et al., 2011), para densidades entre las 20,000 y 40,000 plantas/ha, con riego por cinta superficial o enterrada. La cantidad y calidad de los turiones está en función de la altura de la planta y su follaje del año previo, por lo que requiere altas cantidades de agua, para su desarrollo y almacenamiento de reservas. Es un cultivo altamente rentable (10 t/ha, 37,000 \$/t), genera alrededor de 280 jornales por hectárea en la región de Caborca (Navarro y López, 2002), es tolerante a la salinidad, tiene un sistema radicular profundo y extenso que puede alcanzar hasta 1.5m de profundidad y extenderse hasta 3.0m en la etapa adulta y una vida productiva de 10 a 15 años (Walter, 2014). En trabajos previos mencionados, generalmente usan coeficiente de cultivo (Kc) de 1.0 de enero a febrero, y de marzo a octubre de 0.6 a 1.0.

Principales cultivos Perennes en el noroeste de México (SIAP, 2015)

Sinaloa	Baja California		Sonora		
Cultivo	Superficie (ha)	Cultivo	Superficie (ha)	Cultivo	Superficie (ha)
Mango	15,734	Alfalfa verde	27,871	Alfalfa verde	27,631
Naranja	1,490	Aceituna	3,411	Dátil	907
Alfalfa verde	2,790	Dátil	445	Esparrago	12,445
Caña de azúcar	11,492	Esparrago	2,461	Naranja	6,199
Pastos	5,495	Nopal	590	Nogal pecanero	12,164
Otros perennes	3,598	Otras perennes	2,035	Otras perennes	3,514
		Pastos	1,321	Pastos	4,701
		Uva	3,628	Uva	20,096
Total	40,598	Total	41,761	Total	87,657

Lo anterior muestra que a pesar de la importancia del esparrago en la región, no existen trabajos de investigación que muestren la demanda real del cultivo y el comportamiento de la humedad del suelo para obtener un mejor desarrollo y rendimiento, reduciendo sus requerimientos de agua, sin impactar su rendimiento.

**Nogal pecanero (*Carya Illinoensis* [Wangenh] K. Koch).**

El nogal, es otro importante cultivo perenne en Sonora y cuenta actualmente una superficie de 12,164 hectáreas, principalmente en la Costa de Hermosillo. Donde se observa como la superficie en Sonora casi sea cuadruplicado (3575 ha, 2004), mientras que en otros estados, como Coahuila y Nuevo León, se mantiene sin cambios. Esta especie perenne inicia su producción alrededor del sexto año de plantación, es una especie longeva (plantaciones + 50 años en Sonora) y cuenta con varios marcos o sistemas de plantación, de 6 x 6 m, 8 x 10 m, etc. Actualmente más del 95 de la superficie cuenta con sistemas de riego presurizado y requiere anualmente un manejo importante del follaje para asegurar un adecuada penetración de la radiación dentro del dosel.

Superficie cultivada de nogal pecanero en México (SIAP, 2015).

Estado	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Coahuila	11,904	11,921	12,054	14,184	14,361	15,323	15,497	15,935	16,196	16,356
Chihuahua	42,685	44,656	47,103	48,535	51,381	52,832	54,757	60,250	64,049	66,301
Durango	3,886	4,026	3,791	4,291	4,744	4,650	5,085	5,968	6,154	6,084
Nuevo León	4,261	3,989	4,098	3,989	3,890	3,904	4,214	4,218	4,182	4,202
Sonora	3,575	5,376	6,335	7,360	7,958	8,603	8,860	9,078	10,560	12,164
Otros	2,042	2,218	2,316	2,240	2,093	2,220	2,310	2,622	2,726	2,904
<b>TOTAL</b>	<b>68,353</b>	<b>72,185</b>	<b>75,697</b>	<b>80,599</b>	<b>84,429</b>	<b>87,532</b>	<b>90,725</b>	<b>98,071</b>	<b>103,866</b>	<b>108,011</b>

Dado el incremento en la superficie, esto implica que las extracciones de agua para cultivos perennes se han incrementado considerablemente, aunque no el volumen concesionado. Este cultivo tiene un alto consumo de agua (Wang et al., 2007; Rodríguez et al., 2010) y generan una importante mano de obra de 70 jornales por hectárea (Retes et al., 2014) y una rentabilidad alta, donde el costo del agua representa el 5% (López et al., 2011). Sammis et al. (2004) y Rodríguez et al. (2010 y 2012) realizaron mediciones de riego y consumo de agua usando la técnica de covarianza de vórtices, en huertas adultas, observando ambos que la demanda de agua del nogal vario entre 1300 y 1450 mm/año y las aplicaciones de agua entre 1450 y 2000 mm/año. Estas investigaciones muestran un alto consumo de agua, una importante lamina de riego. Por lo que se requiere estudiar de manera precisa las componentes de la ecuación de balance de agua en nogal y encontrar, que cantidad de agua aplicada es percolada o utilizada por las malezas.

#### **Alfalfa (*Medicago sativa* L.).**

La alfalfa, es otro importante cultivo perenne en Baja California y Sonora, con una superficie de 27,871 y 27631 ha, respectivamente. Es un importante forraje en Baja California para la industria lechera y en Sonora para el ganado en la estación de estiaje. Rodríguez et al. (2015), realizo en Sonora mediciones de consumo de agua mediante la técnica de covarianza de vórtices y riego mediante un pivote central en alfalfa entre abril y octubre 2012, contabilizando por evapotranspiración 667 mm, con entradas por riego y lluvia de 1,045 mm, mientras que, Benli et al. (2006) reporto evapotranspiraciones para tres años consecutivos de 1,473, 1557, y 1160 mm; y entradas por riego y precipitación de 1689, 1889 y 1181mm respectivamente. Por otro lado, Estrada et al. (2008) reportaron aplicaciones de 1,330 y 1,462 mm en riego subsuperficial y pivote central en la parte norte de México. Los resultados anteriores muestran que la alfalfa tiene un alto consumo de agua y requiere ser de manera correcta determinada, para así, minimizar las perdidas por percolación principalmente.

#### **Uva (*Vitis vinifera* L.).**

La uva, es un importante cultivo perennes, principalmente en Sonora, ya que cuenta con una superficie de 20,096 ha, mientras que en Baja California, solo que cultivan 3,628 ha (SIAP, 2015). En Sonora, la mayor superficie está dedicada a uva de mesa, mientras que en Baja California a vinos. Al igual que el nogal, la vid cuenta con sistemas de riego presurizado, lo que facilita la fertigación. Actualmente el sistema plantación es a 1 o 2 m entre plantas y ~ 4.0 m entre líneas, la conducción de la vid se realiza mayor el sistema en pérgola, que permite mayor paso de luz dentro del viñedo y mayor producción, y el sistema en T (Márquez et al., 2004). La uva de mesa genera alrededor de 150 jornales por hectárea y su producción genera una importante derrame económica en la región, con una rentabilidad del agua de 6.3 pesos por m<sup>3</sup> de agua. (Vázquez, 2011). El uso del agua en vid, ha sido un tema discutido al igual que en nogal por los productores y su técnicos. Estudios realizado en California, Costa de Hermosillo y Chile han mostrado que la evapotranspiración de la vid usando la técnica de covarianza de vórtices y lisimetría, varía entre 700 a 800 mm/año (Williams et al., 2003; Rodríguez et al., 2010; Williams et al., 2010; Villagrana et al., 2014). Sin Embargo Williams et al (2010), recomienda aplicar entre 400 y 800 mm entre la brotación y la cosecha para obtener buenos resultados en rendimiento y calidad de fruto, valores superiores a los observados por Rodríguez et al (2010) de ~300 m. Otro aspecto relevante con respecto al uso de agua en vid, generalmente los productores usan coeficiente de cultivo (Kc) para regar y estos también presentan un importante variación (Williams et al., 2003, Kc, 0.8 a 1.2; Rodríguez et al., 2010, Kc 0.5 a 0.6; Villagrana et al., 2014, Kc, 0.8 a 1.2). Lo anterior, obliga investigar nuevamente la vid y preguntar si el agua aplicada, está siendo usada por la planta, esta percolando o está siendo utilizada por las malezas.

#### **Cultivos Anuales.**

Los cultivos anuales en el noroeste de México, presentan importantes superficies sembradas, unos con poca generación de jornales (granos) y las hortalizas, con una importante generación de jornales por año, pero una considerable menor superficie. El siguiente cuadro nos muestra los cultivos por estado, observándose que en Sinaloa, el maíz (363,485 ha) es el principal cereal y el chile (12,654 ha) la principal hortaliza; en Baja California, el trigo (81,924 ha) es el principal cereal y la cebolla (6,369 ha) es la principal hortaliza; y en Sonora el trigo (305,835 ha) es el principal cereal y la sandía (7,032 ha) es la principal hortaliza. En esta sección se describirán brevemente el maíz, chile y la sandía, como cultivos que se pretende estudiar por su importancia en el consumo de agua y la generación de empleos.

Principales cultivos anuales en el noroeste de México (SIAP, 2015).

Sinaloa		Baja California		Sonora	
Cultivo	Superficie (ha)	Cultivo	Superficie (ha)	Cultivo	Superficie (ha)
Chile verde	12,654	Algodón hueso	29,429	Algodón hueso	7,168
Frijol	117,700	Avena forrajera	2,098	Avena forrajera	5,868
Garbanzo grano	50,466	Cebolla	6,369	Calabaza	5,372
Maíz grano	363,485	Fresa	2,273	Cártamo	35,052
Otras anuales	25,125	Otras anuales	16,307	Frijol	6,602
Papa	11,667	Sorgo forrajero	4,440	Garbanzo grano	17,931
Sorgo grano	149,976	Tomate rojo	2,023	Maíz grano	19,522
Tomate rojo	15,307	Trigo grano	81,924	Otras anuales	28,064
Tomate verde	8,624			Papa	11,718
Trigo grano	62,542			Rye grass	7,821
				Sandía	7,023
				Sorgo forrajero	9,487
				Sorgo grano	10,042
				Soya	6,797
				Trigo grano	305,835
Total	817,547	Total	144,862	Total	484,301

**Sandia** (*Citrullus Lanatus*).

La sandía es una hortaliza de importancia en zonas áridas y semiáridas en el mundo (Erdem y Yuksel, 2003; Shukla *et al.*, 2014). De acuerdo con los datos disponibles en el 2014 en México se cosecharon 35,405 ha de sandía (65%, bajo riego), con una producción de 946, 458 t y un rendimiento de 27 t.ha<sup>-1</sup>. Los principales Estados productores fueron Chihuahua, Jalisco y Sonora, mismos que acumulan alrededor del 50% de la producción nacional. Sonora durante los últimos 10 años ha duplicado su superficie 3,245 a 7,032 ha, ocupando actualmente el primer lugar a nivel nacional (SIAP, 2015). Dada las características del cultivo, su plantación y cosecha manual, genera alrededor de 117 jornales por año en sus dos ciclo de O-I y P-V (Espinoza *et al.*, 2006). Generalmente en sistemas de riego presurizado, se establece la plantación en camas separada a 2m y una calle por cada 9, para facilitar la cosecha, con densidad entre las 10,000 y 15,000 plantas/ha. Su ciclo de trasplante a cosecha varía entre los 85 y 95 días. Experimentos con lisimetría para determinar la evapotranspiración mencionan rangos de 250 mm a 350 mm (Erden *et al.*, 2005; Bastos *et al.*, 2012; Shukla *et al.*, 2014). Sin embargo, Román *et al.* (2015), usa la técnica de covarianza de vórtices, cuantifico una lámina evapotranspirada de 180 mm, con una lámina de riego de 205 mm y una lluvia acumulada de 87 mm durante el ciclo del cultivo. En cuanto al coeficiente de cultivo (Kc), se observa una variación entre los autores, Román *et al.* (2015), Kc semanal máximo de 0.73; mientras que, Shukla *et al.*, (2014), Miranda *et al.* (2004) y Bastos *et al.* (2012), estimaron un Kc en su etapa intermedia de 1.01, 1.15 y 1.30 respectivamente. Las diferencias entre los diversos autores en lo relativo al uso del agua y al Kc; donde el Kc, que es utilizado para decidir la cantidad de agua aplicar en los riegos, hacen necesarios realizar nuevas mediciones para determinar con mayor precisión, la demanda de agua del cultivo y minimizar las pérdidas por percolación y reducir la presencia de enfermedades por la alta humedad en el suelo.

**Chiles** (*Capsicum sp.*).

Las Solanáceas, es una familia de plantas que contiene un grupo importantes de especies cultivadas (pepino, papa, tomate, chiles (*Capsicum sp*) entre otras (Albert and Chang, 2014). Dentro de los chiles, el género *Capsicum*, es una de las primeras plantas domesticadas en américa, consumida en casi todo el mundo como hortaliza y condimento, y caracterizado por su pungencia (Pacheco *et al.*, 2012). Cuenta con alrededor de 30 sp entre cultivadas y silvestre, con diferentes formas biológicas; entre las primeras *Capsicum annuum* L., *Capsicum chinense* Jacq., *Capsicum frutescens* L., *Capsicum baccatum* L. y *Capsicum pubescens* Ruiz and Pav., (Aminul *et al.*, 2015); entre las segunda, se encuentra el chiltepín (*Capsicum annuum var. glabriusculum*), (Hernández *et al.*, 1999). En Sinaloa los chiles ocupan una importante superficie (12,654 ha), entre ellos el chile bell (*Capsicum annuum* L.) es un cultivo relevante en muchas partes del mundo, dado su importancia económica y social. Se han desarrollado múltiples trabajos de investigación analizando la respuesta del cultivo a diferentes factores agronómicos y ambientales, como la evaluación de la producción y calidad de chile bell en función del régimen y

tipo de riego, el uso de acolchados y malla sombra para evaluar el intercambio de CO<sub>2</sub>, y la determinación de coeficientes de cultivo bajo diferentes tipos de riego (Sezen *et al.*, 2007; Zermeño *et al.*, 2011; Díaz, 2013; Shukla *et al.*, 2014). En Sinaloa, la producción de chile bell se destina principalmente al mercado internacional (85%), mientras que el 15% restante se destina para consumo nacional (INIFAP, 2011). En el Valle de Culiacán, el cultivo de chile bell es una de las principales hortalizas cultivadas, durante los ciclos agrícolas 2008-2009, 2009-2010 y 2011-2012 la superficie promedio sembrada fue de 2,694 hectáreas, con una producción promedio de 185,215 t/ha y un valor de la producción de ~929 millones de pesos (CONAGUA, 2010; CONAGUA, 2011; CONAGUA, 2013). Generalmente se siembra a doble hilera y estacones para detener la planta y una separación entre surcos de 2m. Algunas estimaciones y mediciones de ET oscilan entre los 260 y 370 mm durante el ciclo (Miranda *et al.* 2006; Rodríguez *et al.*, 2011; López *et al.*, 2015) y aplicaciones de riego entre los 300 y 400 mm (Rodríguez *et al.*, 2011; López *et al.*, 2015). En lo relativo al Kc se observación con frecuencia valores mayores a 1.0 (Miranda *et al.* 2006; Rodríguez *et al.*, 2011; López *et al.*, 2015), durante la etapa intermedia. Dada la importancia de este cultivo, se considera necesarios realizar o continuar haciendo mediciones con la técnica de covarianza de vórtices, para obtener una mejor cuantificación y reducir el contenido de agua en el suelo.

### **Maíz (*Zea mays* L.).**

El cuadro anterior muestra la importancia de este cereal en Sinaloa, con una superficie sembrada bajo riego de 363,485 ha, y rendimiento 10.6 t/ha, siendo el líder a nivel en producción y rendimiento durante el 2014, (SIAP, 2015). La densidad de siembra y la altura de planta, es variable y distancia entre surcos, dependiendo de la variedad. Mediciones realizadas sobre consumo de agua por el maíz indican variaciones entre los 400 y 550 mm (Suyker and Verma 2009; Ertek y Kara, 2013; Benjamin *et al.*, 2015), con láminas de riego entre los 550 y 600 mm (Suyker and Verma 2009; Ertek y Kara, 2013; Benjamin *et al.*, 2015). Benjamin *et al.* (2015) observaron que tratamientos con reducción de láminas de riego, reducía el rendimiento en los años siguientes por abatimiento de la humedad de suelo en capa profundas. También se observó que existen diferencias en lo concerniente el coeficiente de cultivo (Kc), que es usado para definir la lámina de riego, y varia de 1.03 (Suyker y Verma, 2007) a 1.46 (Li *et al.*, 2008), donde el segundo fue debido a una alta densidad de plantación (374,000 p/ha). Otro aspecto importante relacionado con el rendimiento es la fecha de siembra, Ramírez *et al.* (2010), encontró variaciones de 11.4 a 8.6 t/ha entre el primer y último periodo para siembra respectivamente, para una misma densidad. Lo anterior, permite observar que no existen mediciones reales sobre el consumo de agua de maíz en los valles del noroeste de México, sobretodo usando la técnica de covarianza de vórtices, volumen o laminas aplicadas a los cultivos, lo cual plantea un reto, el conocer la demanda real del maíz, agua percola, agua por drenaje superficial.

### **Sensores remotos y modelos de cultivos.**

Los sensores remotos y los modelos de cultivos son una herramienta muy importante para el monitoreo del crecimiento de cultivos y evaluar el rendimiento (Viña *et al.*, 2004). Los primeros modelos fueron creados para determinados cultivos, tales como: CERES-trigo por Ritchie y Otter (1985), AFRCWHEAT por Weir *et al.* (1984) y CERES-maíz por Jones y Kiniry (1986); y modelos genéricos (STICS, DSSAT y APSIM) para varios cultivos o plantas que permite realizar simulaciones multianuales (Brisson *et al.*, 1998; McCown *et al.*, 1996; Rodríguez *et al.*, 2004; Flores *et al.*, 2013; Jegu *et al.*, 2015). Muchos de los modelos antes mencionados hacen un especial énfasis en el agua del suelo, balance de nitrógeno o carbono, ya que fueron diseñados para una aplicación particular bajo específicas condiciones climáticas (Boote *et al.*, 1996). Uno de estos avances importantes en la creación de los modelos de crecimiento de cultivos (MD) son: Su diseño modular, la integración de varios tipos de cultivos dentro de éstos y la interacción con sensores remotos (Jones *et al.*, 2001; Keating *et al.*, 2003; Jones *et al.*, 2003; Hadria *et al.*, 2010). Los sensores remotos han sido utilizados en diferentes partes del mundo para estimar fenología, evapotranspiración, rendimiento, etc. Estas estimaciones pueden ser basadas en índices de vegetación (IV) usando simple regresión contra mediciones de área foliar (IAF) o fracción de radiación fotosintéticamente activa (FPAR), de la plataformas disponibles AVHRR, SPOT, LANDSAT, MODIS, Vegetation, PROBA-V, (Lobell *et al.*, 2003; Zhang *et al.* 2003; Er-Raki *et al.*, 2013; Johnson *et al.*, 2014; Sakamoto *et al.*, 2014). En este sentido se considera que es posible aplicar modelos de cultivos y sensores remotos para los principales cultivos anuales en los valles agrícola en el noroeste de México para determinar el consumo de agua de los cultivos y su rendimiento.

Considerando que el estrés hídrico en cultivo (exceso o deficiencia) afecta el desarrollo y rendimiento de los cultivos y la política de subsidios al agua de riego no han resultado la eficiencia de uso. Se plantea lo siguiente.

1. Determinación de las demandas de agua (Evapotranspiración, mayormente) de los cultivos anuales (chile, maíz, sandía) y perennes (esparrago, vid, nogal, alfalfa) usando equipo de covarianza de vórtices (Eddy Covariance, en inglés), Scintilometría.

2. En algunos cultivos perennes (vid y nogal), se pretende determinar la transpiración mediante la técnica del pulso de calor (sapflow), adicional a la evapotranspiración, para diferenciar la pérdida de agua por efecto de la malezas.
3. Modelación de la productividad del agua y rendimiento de cultivos en dos sentidos: modelos basados en percepción remota (Índices de vegetación) y modelos de productividad del agua (AQUACROP) y de cultivos (STICS).
4. Balance de masa a través de la instalación de medidores de humedad en suelo y tensiómetros.
5. Medición del agua del agua de riego en cultivos por gravedad mediante estructuras.

#### **Motivación para atenderlo ¿Existe o existió otro proyecto que se ocupe(ó) de un problema similar?:**

Varios investigadores de CA y el GI, han participado en proyectos sobre uso y manejo de agua en la agricultura. En el 1998-2000, participaron con una propuesta para evaluar vegetación natural y áreas agrícolas financiada por CONACYT; 2002-2004 SUDMET project en la región mediterránea, financiado por la Unión Europea; posteriormente en 2006 al 2008 participan en una propuesta internacional apoyada por la Unión Europea, en varios países a través de PLEIADES. Durante el 2005-2006, se trabajo con fondos de Fundación Produce Sonora en cultivos perennes en la Costa de Hermosillo. En esta década, se han buscado otros CA en Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS) y la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), trabajando sobre el escaso recurso agua en regiones con problemática similar y actualmente se tienen estudiantes de posgrado atacando este tópico. Actual se cuenta con una propuesta aprobada en Infraestructura por CONACYT y se ha iniciado una colaboración con investigadores CESBIO que participan en una propuesta en la región mediterránea para hacer estudios integrales a escala local y regional en Europa "MISTRALS (Mediterranean Integrated Studies at Regional And Local Scales)", e investigadores de la Faculty of Sciences Semlalia Marrakech (FSSM), Cadi Ayyad University, Marrakech (Morocco) y del National Institute of Agronomic Research (INRA), Morocco.

#### **Beneficiarios: ¿A quién beneficiará los resultados de éste posible proyecto?**

La escasez de agua en las zonas áridas es una necesidad urgente a atender desde el sector gubernamental, productores, instituciones académicas e investigación, y la sociedad. La planeación hidroagrícola se realiza anualmente entre productores y gobierno en base a los volúmenes disponibles en los cuerpos de agua y volumen autorizado en los acuíferos, el tener información sobre las demandas reales de agua de los cultivos, va a contribuir a reducir el volumen de agua aplicada y menor cantidad de agroquímicos a la superficie. Entonces al tener y aplicar esta información se reduce el volumen de agua, los agroquímicos y la contaminación de los acuíferos y cuerpos de agua costeros.

#### **Metodología:**

##### **¿Qué "rutas" piensan seguir en su investigación?**

Actualmente los Cuerpos Académicos (CA) y Grupo de Investigación (GI) participantes en esta propuesta han colaborado previamente en formación de recursos humanos de posgrado, y proyectos financiados por CONACYT y la Unión Europea (UE). Actualmente el CA líder de la iniciativa cuenta con una propuesta aprobada en infraestructura por CONACYT, en la cual se propuso adquirir dos equipos de mediciones de covarianza de vórtices y un Scintilómetro Laser de superficie (SLS) para determinación de evapotranspiración en cultivos anuales y perennes.

1. Reunión de CA y GI participantes e investigadores visitantes.
2. Reunión con las asociaciones de productores de los valles agrícolas de BC, SIN y SON.
3. Planeación de los cultivos a estudiar por valle en cada ciclo agrícola.
4. Reclutamiento de nuevos estudiantes de posgrado (en proceso por la UAS, ITSON, UABC).
5. La presencia de investigadores de IRD-CESBIO-Universidad Paul Sabatier, Cadi Ayyad University en Marruecos y del National Institute of Agronomic Research (INRA), Morocco, cuales proporcionaran capacitación a estudiantes sobre sensores remotos y evapotranspiración, y modelos de cultivos.
6. Taller de capacitación sobre Scintilometría y Covarianza de Vórtices a estudiante en proceso, nuevos estudiantes e investigadores participantes.
7. Instrumentación de los sitios y cultivos a estudiar.
8. Seguimiento de los experimentos (fenología, colecta y procesamiento de datos, procesamiento de imágenes satelitales).
9. Ponencias en congresos, Presentación de tesis de estudiantes y publicaciones de artículos en revistas indizadas.

**Enunciar claramente las etapas principales o relevantes por las que prevé pasará el proyecto (metas), indicando el momento en el que se estiman ocurrirá su satisfacción a corto, mediano y largo plazo?**

Año I. Reuniones, capacitación, instalación de equipo y convenios de colaboración interinstitucional.

Meta: Instalar en cultivos anuales los equipos de covarianza de vórtices y scintilometría, y capacitación de estudiantes en el manejo del equipo y procesamiento de datos.

a) Actividades.

1. Reunión de CA y GI participantes.: Se realizara inicialmente un video conferencia para afinar los detalles de una reunión física entre CA y GI, en la que se afinaran detalles sobre la participación institucional, contacto con productores, equipo disponible, medio de transporte, laboratorios, etc.
2. Reunión con las asociaciones de productores de los valles agrícolas de BC, SIN y SON: Cada CA tendrá la responsabilidad de hacer los contactos con las asociaciones agrícolas de su valle y auscultar entre los productores los sitios de interés para la experimentación, previa a la reunión de los CA y GI con las asociaciones. En esta reunión se abordara las necesidades y apoyos que se requiere para la realización de los proyectos, principalmente la seguridad de los estudiantes, investigadores y el equipo a instalar en los predios.
3. Planeación de los cultivos a estudiar por valle en cada ciclo agrícola: Después de la reunión con los productores, se decidirá que cultivo y ciclo se estudiara por valle, considerando la disponibilidad de estudiantes y el grado pretendido por este. Ejemplo, Valle de Culiacán, estudiante de Maestría, " Medición de la evapotranspiración y su coeficiente de cultivo en maíz para grano en riego presurizado usando la técnica de covarianza de vórtices", en dos ciclo otoño invierno (O-I).
4. Reclutamiento de nuevos estudiantes de posgrado (en proceso por la UAS, ITSON, UABC): En institución con posgrado se reclutaran estudiantes para analizar la productividad del agua en cultivos, la ganancia de carbono por agroecosistema, así como las emisiones de gases de efecto de invernadero en etapas posteriores.
5. Taller de capacitación sobre Scintilometría y Covarianza de Vórtices a estudiante en proceso, nuevos estudiantes e investigadores participantes: Investigadores del ITSON, UNISON y CESBIO (Francia), serán responsables de implementar un taller, en el cual se estudiaran las bases teóricas de la Covarianza de Vórtices y Scintilometría, para posteriormente realizar instrumentación sobre una superficie agrícola, donde los participantes aprenderán la instrumentación, instalación, colecta, procesamiento de datos y el análisis de resultados.
6. Instrumentación de los sitios y cultivos a estudiar: En cada valle y cultivo se instalaran equipos de correlación turbulenta y Scintilometría, perfil de humedad y tensión de agua en el suelo. Además se realizaran mediciones fisiotecnicas en cada cultivo (fenología, área foliar, etc.). Para todos los sitios se obtendrá información satelital libre a una resolución espacial entre 100 a 300m, como reflectancia o productos (<http://www.vito-eodata.be>).
7. Seguimiento de los experimentos (fenología, colecta y procesamiento de datos, procesamiento de imágenes satelitales): En etapas iniciales el responsable técnico en compañía de estudiantes de las instituciones participantes, darán mantenimiento a los sensores en los sitios, colectaran los datos, realizaran las mediciones programadas semanalmente o quincenalmente, de acuerdo al tipo de cultivos. Posteriormente en laboratorio revisaran los datos, procesaran los que sean necesarios de acuerdo a los protocolos (EddyPro para datos turbulentos, WinLas para datos de Scintilómetro, llenado de datos faltantes o posprocesamiento en línea para datos que no cumplan los criterios de la turbulencia mínima Burba (2013), [http://www.bgcjena.mpg.de/~MDI/work/eddyproc/output/20141205021959/results\\_ext.php](http://www.bgcjena.mpg.de/~MDI/work/eddyproc/output/20141205021959/results_ext.php)). Hará un informe de resultados y se realizaran modificaciones necesarias en caso de problema en la calidad de datos.
8. Ponencias en congresos, Presentación de tesis de estudiantes y publicaciones de artículos en revistas indizadas: Cada CA y GI será responsable de acuerdo a los reglamentos de sus programas de posgrado y los compromisos acordados en el punto 1 y 4.

b) Experimentos.

Anuales y Perennes. Instalación y operación de un sistema de covarianza de vórtices y Scintilómetro, y equipo meteorológico en aire y en suelo.

<b>Año 1</b>	<b>Equipo</b>	<b>Cultivo</b>	<b>sitio</b>	<b>Fecha</b>
1	EC y LAS 1	Maíz (O-I)	V. Culiacán	Nov/15- May/16
	EC y LAS 1	Hortaliza	V. Culiacán	May/16-Nov/16
	EC y LAS 2	Sandia (O-I)	C. Hermosillo	Ago/15-Nov/15
	EC y LAS 2	VID	C. Hermosillo	Nov/15-Nov/16
	Sapflow	VID	C. Hermosillo	Nov/15-Nov/16

2	EC y LAS 1	Maíz (O-I)	V. Culiacán	Nov/16- May/17
	EC y LAS 2	Nogal	C. Hermosillo	May/17-Dic/18
	Sapflow	Nogal	C. Hermosillo	May/17-Dic/18
3	EC y LAS 1	Esparrago	V. Caborca	May/17- Dic/18
	EC y LAS 2	Alfalfa	V. Mexicali	Ene/19- Dic/19

Año II. Instalación de equipo, capacitación y Modelación.

Meta: Lograr la capacitación de estudiantes en modelación de uso de agua y rendimientos en cultivos usando sensores remotos y modelos de cultivos; la graduación de estudiantes de posgrado en proceso.

- a) Actividades.
  1. Instalación de equipo de acuerdo al programa.
  2. Cursos de Sistemas de Información Geográfica (GIS), básico o intermedio de acuerdo a las necesidades de los estudiantes de posgrado.
  3. Asistencia para capacitación en modelos de cultivos y sensores remotos, el Dr. R. Hadria de INRA y el Dr. S. Er-Raki de la Universidad de Cadi Ayyad Marruecos.
  4. Instalación y operación de los modelos con datos del año previo (datos meteorológicos y micrometeorológicos, imágenes de satélite), por estudiantes de posgrado.
  5. Reunión de evaluación de avances del proyecto e informe a PRODEP
  6. Reclutamiento de nuevos estudiantes de posgrado (UAS, ITSON, UABC): En institución con posgrado se reclutarán estudiantes para analizar la productividad del agua en cultivos, la ganancia de carbono por agroecosistema, así como las emisiones de gases de efecto de invernadero en etapas posteriores.
  7. Taller de capacitación sobre Scintilometría y Covarianza de Vórtices a nuevos estudiantes e investigadores participantes: Investigadores del ITSON, UNISON, UAS, serán responsables de implementar un taller, en el cual se estudiarán las bases teóricas de la correlación turbulenta y Scintilometría, para posteriormente realizar instrumentación sobre una superficie agrícola, donde los participantes aprenderán la instrumentación, instalación, colecta, procesamiento de datos y el análisis de resultados.
  8. Seguimiento de los experimentos (fenología, colecta y procesamiento de datos, procesamiento de imágenes satelitales): En etapas iniciales el responsable técnico en compañía con estudiantes de las instituciones participantes, darán mantenimiento a los sensores en los sitios, colectarán los datos, realizarán las mediciones programadas semanalmente o quincenalmente, de acuerdo al tipo de cultivos. Posteriormente en laboratorio revisarán los datos, procesarán los que sean necesarios de acuerdo a los protocolos (EddyPro para datos turbulentos, WinLas para datos de Scintilómetro, llenado de datos faltantes o posprocesamiento en línea para datos que no cumplan los criterios de la turbulencia mínima Burba (2013), [http://www.bgcjena.mpg.de/~MDIwork/eddyproc/output/20141205021959/results\\_ext.php](http://www.bgcjena.mpg.de/~MDIwork/eddyproc/output/20141205021959/results_ext.php)). Hará un informe de resultados y se realizarán modificaciones necesarias en caso de problema en la calidad de datos.
  9. Estancias de estudiantes de posgrado en el extranjero de preferencia.
  10. Ponencias en congresos, Presentación de tesis de estudiantes y publicaciones de artículos en revistas indizadas: Cada CA y GI será responsable de acuerdo a los reglamentos de sus programas de posgrado y los compromisos acordados.
  11. Búsqueda de fondos (CONACYT: Ciencia Básica, fondos sectoriales) para la continuación de las investigaciones y la formación de recursos humanos.
- b) Experimentos.
 

Anuales y Perennes. Instalación y operación de un sistema de covarianza de vórtices y Scintilómetro, y equipo meteorológico en aire y en suelo.

Año III. Instalación de equipo, capacitación, modelación, crecimiento del grupo de investigación y análisis de un programa de posgrado interinstitucional.

Meta: Lograr la aprobación de fondos de fondos para la continuación de la investigación y la formación de recursos humanos. La capacitación de estudiantes en modelación de uso de agua y rendimientos en cultivos usando sensores remotos y modelos de cultivos. La graduación de un estudiante de posgrado en proceso.

- a) Actividades.



1. Instalación de equipo de acuerdo al programa.
  2. Instalación y operación de los modelos con datos del año previo (datos meteorológicos y micrometeorológicos, imágenes de satélite), por estudiantes de posgrado.
  3. Reunión de evaluación de avances del proyecto e informe a PRODEP
  4. Reclutamiento de nuevos estudiantes de posgrado (UAS, ITSON, UABC): En institución con posgrado se reclutaran estudiantes para analizar la productividad del agua en cultivos, la ganancia de carbono por agroecosistema, así como las emisiones de gases de efecto de invernadero en etapas posteriores.
  5. Taller de capacitación sobre Scintilometría y Covarianza de Vórtices a nuevos estudiantes e investigadores participantes: Investigadores del ITSON, UNISON y CESBIO (Francia), serán responsables de implementar un taller, en el cual se estudiarán las bases teóricas de la correlación turbulenta y Scintilometría, para posteriormente realizar instrumentación sobre una superficie agrícola, donde los participantes aprenderán la instrumentación, instalación, colecta, procesamiento de datos y el análisis de resultados.
  6. Seguimiento de los experimentos (fenología, colecta y procesamiento de datos, procesamiento de imágenes satelitales): En etapas iniciales el responsable técnico en compañía con estudiantes de las instituciones participantes, darán mantenimiento a los sensores en los sitios, colectaran los datos, realizarán las mediciones programadas semanalmente o quincenalmente, de acuerdo al tipo de cultivos. Posteriormente en laboratorio revisaran los datos, procesaran los que sean necesarios de acuerdo a los protocolos (EddyPro para datos turbulentos, WinLas para datos de Scintilómetro, llenado de datos faltantes o posprocesamiento en línea para datos que no cumplan los criterios de la turbulencia mínima Burba (2013), [http://www.bgcjena.mpg.de/~MDIwork/eddyproc/output/20141205021959/results\\_ext.php](http://www.bgcjena.mpg.de/~MDIwork/eddyproc/output/20141205021959/results_ext.php)). Hará un informe de resultados y se realizarán modificaciones necesarias en caso de problema en la calidad de datos.
  7. Estancia de estudiantes de posgrado, de preferencia en el extranjero.
  8. Ponencias en congresos, Presentación de tesis de estudiantes y publicaciones de artículos en revistas indizadas: Cada CA y GI será responsable de acuerdo a los reglamentos de sus programas de posgrado y los compromisos acordados.
  9. Reuniones para evaluar la posibilidad de un programa de posgrado interinstitucional.
- b) Experimentos.
  - c) Anuales y Perennes. Instalación y operación de un sistema de covarianza de vórtices y Scintilómetro, y equipo meteorológico en aire y en suelo.

### **Instrumentación y mediciones en campo.**

1. Instrumentación micrometeorológica. Consiste en la instalación de un equipo covarianza de vórtices (un anemómetro sónico, un analizador de gases infrarrojo (CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O), para medir flujos de calor sensible y calor latente en el aire), placas de flujo de calor en el suelo y radiómetro neto, para medir el calor del suelo y el flujo de radiación en la superficie, conectado y controlado por un adquisidor de datos (CR1000, CR3000, CR5000, [www.Campbellsci.com](http://www.Campbellsci.com)), (Ver Rodríguez et al., 2010, para mayor información). Todos los sistemas son alimentados con corriente directa a 12V, usando paneles solares, baterías de ciclo profundo para almacenamiento de energía.
2. Instrumentación meteorológica y del suelo. Se instalara en el mismo sitio un medidor de temperatura y humedad del aire, un medidor mecánico de velocidad y dirección de viento, tensiómetros y reflectómetros para determinar la tensión y humedad del agua en suelo a dos profundidades mínimamente: todo estos sensores serán conectados y controlados al mismo adquisidor de datos (1) o en otro para minimizar las pérdidas de datos por problemas de voltaje.
3. Mediciones fisiotécnicas, se realizarán de acuerdo a los protocolos establecidos por Duchemin 2007, durante el experimento en PLEIADES, sección México (2007-2008) y Duchemin et al (2015).
3. Scintilometría. Se instalarán scintilómetro de la marca Scintec, modelo 450 o 900 en los sitios de estudio, considerando las observaciones con respecto a las características de la superficie Hartogensis et al (2003) y el procesamiento de datos, Van Kesteren et al (2015).
4. Información satelital. Durante el 2014 la Agencia Espacial Europea (ESA) puso en operación un microsateélite el cual estará en funcionamiento hasta el 2018 (<http://proba-v.vgt.vito.be>). El cual proporciona imágenes satélites en espectro visible, infrarrojo cercano y medio a una frecuencia temporal menor a una semana y resolución espacial entre 100 y 300m, así como productos, tales como índices de vegetación (Dierckx and Benhadj, 2013; Dierckx et al., 2014; Sterckx et al., 2014). Esta resolución espacial y temporal es similar o menor a la de MODIS, lo que permite un buen monitoreo de la vegetación y su potencial para el cálculo de ET.

## ¿Qué técnicas o herramientas se piensa utilizar en dicho proyecto?

### **Proyecto: Medición y modelación de la evapotranspiración en cultivos anuales y perennes en el noroeste de México**

#### **Objetivo general:**

Desarrollar el monitoreo a largo plazo, de la estructura de la comunidad de manglar y su caracterización ambiental, en los estados de Baja California, Baja California Sur y Sonora.

Desarrollar una red de cuerpos académicos (CA) y grupos de investigación (GI) en agua, energía y medio ambiente que permita incrementar el flujo de investigadores y estudiantes entre las instituciones participantes

Determinar la demanda hídrica de los principales cultivos en los valles agrícolas en Sonora, Sinaloa y Baja California en México.

#### **Objetivos específicos**

1. Calcular de evapotranspiración y coeficiente de cultivo en maíz, chile, trigo, sandía, nogal y vid en los Valles agrícolas.
2. Monitoreo de la humedad de suelo en los valles agrícolas.
3. Validar las diversas metodologías basadas en sensores remotos para el cálculo de ET usando imágenes satelitales PROBA-V
4. Proponer una lámina de riego en los cultivos anuales y perennes, que contribuya a incrementar la productividad del agua.
5. Determinar evaporación de cuerpos de agua usando técnicas de covarianza de vórtices y Scintilometría.
6. Formar de recursos humanos con alta especialización en equipo micrometeorológico y sensores remotos para manejo del agua en la agricultura bajo riego.

#### **Cuerpos académicos PROMEP, participantes:**

#### **Cuerpos académicos EXTERNOS AL PROMEP, participantes:**

#### **referencias**

Martinez-Alvarez, V., P.A.Garcia Bastidas, B. Martin-Gorriz and M. Soto-Garcia. 2014. Adaptive strategies of on-farm water management under watersupply constraints in south-eastern Spain. *Agricultural Water Management* 136: 59–67.

CONAGUA. 2013. Estadísticas del agua en México. Comisión Nacional del AGUA-SEMARNAT, México DF. 176 pp.

Bittelli, M. 2010. Measuring Soil Water Potential for Water Management in Agriculture: A Review. *Sustainability*, 2: 1226-1251.

Hamdy, A., Ragab, R and Scarascia-Mugnozza, E. 2003. Coping with water scarcity: water saving and increasing water productivity. *Irrig. Drain*, 1: 3–20.

Hartogensis, O. K., Watts, C. J., Rodriguez, J. C., and De Bruin, H. A. R. 2003. Derivation of an effective height fot scintillometers: La Poza experiment in northwest Mexico. *J. Hydrometeor.* 4: 915-928.

Fereres, E and Soriano, M. A. 2007. Deficit Irrigation for Reducing Agricultural Water Use. *Journal of Experimental Botany*. 58: 147-159.

Duchemin, B., R. Fieuzal, M. A. Rivera, J. Ezzahar, L. Jarlan, J. C. Rodriguez, O. Hagolle and C. Watts. 2015. Impact of Sowing Date on Yield and Water Use Efficiency of Wheat Analyzed through Spatial Modeling and FORMOSAT-2 Images. *Remote Sensing* ( 7), 5951-5979.

Rodriguez, J.C., J. Grageda, C.J. Watts, A. J. Garatuza-Payan, Castellanos-Villegas, J. Rodriguez-Casas, J. Saiz, V. Olavarrieta, 2010, water use by perennial crops on the lower Sonora watershed, *Journal of Arid Environment* 74:603-610.

SIAP. 2015. <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado>. consultado en Julio del 2015.

Sterckx, S., I. Benhadj, G. Duhoux, S. Livens, W. Dierckx, E. Goor, S. Adriaensen, W. Heyns, K. Van Hoof, G. Strackx, K. Nackaerts, I. Reusen, T. Van Achteren, J. Dries, T. Van Roey, K. Mellab, R. Duca and J. Zender. 2014. The PROBA-V mission: image processing and calibration, *International Journal of Remote Sensing*, 35(7): 2565-2588.

Dierckx, W., S. Sterckx, I. Benhadj, S. Livens, G. Duhoux, T. Van Achteren, M. Francois, K. Mellab and G. Saint. 2014. PROBA-V mission for global vegetation monitoring: standard products and image quality. *International Journal of Remote Sensing*, 35(7): 2589-2614.

Dierckx, W., and I. Benhadj. 2013. Proba-V Belgian Mission Satellite Global Products for Vegetation Monitoring. *Geoinfor Geostat: An Overview S1*.

Perez-Olvera, Ma. A., H. Navarro-Garza and E. Miranda-Cruz, 2011. Use of pesticides for vegetable crops in Mexico. En Stoytcheva M. 2011. Pesticides in the modern world- pesticides use and management. In Tech, 520 pp.

Garcia-de la Parra, L. Ma., L. J. Cervantes-Mojica , C. Gonzalez-Valdivia , F. J. Martinez-Cordero, G. Aguilar-Zarate, P. Bastidas-Bastidas, M. Betancourt-Lozano. 2012. Distribution of Pesticides and PCBs in Sediments of Agricultural Drains in the Culiacan Valley, Sinaloa, Mexico. *Arch Environ Contam Toxicol*, 63:323–336.

Matson P. A., R. Naylor and I. Ortiz-Monasterio .1998. Integration of Environmental, Agronomic, and Economic Aspects of Fertilizer Management, *Science* 280(3):112-115.

Palacios-Velez, E. 2002. Por que, cuando, cuanto y como regar? Para lograr mejores cosechas. Editorial Trillas.

Fimbres-Fontes, A., A Rivas-Dominguez y J.A.C. Navarro-Ainza. 2011. Efecto de la fertilización nitrogenada y potásica en cultivo de espárrago (*Asparagus officinalis* .L), en la región de Caborca, Sonora. *BIOTecnia*, 13(2):35-40.

Navarro-Ainza, J.A.C., A. Fimbres-Fontes, y A.López-Carvajal. 2005. Productividad del espárrago en condiciones de riego y fertilización nitrogenada *Terra Latinoamericana*, 23(1):121-127.

Walter, S. 2014. Asparagus production in New Mexico. NM State University, Guide H-227. 4p.

Fimbres-Fontes, A. 2001. Optimización del riego con cinta superficial y enterrada en espárrago. *Terra*, 19:191-195.

Fimbres-Fontes, A., y J. Lizarraga-Navarrete. 2009. Consumo de agua y nitrógeno en espárrago (*Asparagus officinalis* L.) de baja población de plantas con cintas de riego. *Revista agraria-nueva-epoca*, 6:10-13.

Van Kesteren, B., F. Beyrich, O. K. Hartogensis and M. Braam. 2015. Long-Term evaluation of the Scintec Boundary-Layer Scintillometer and Wageningen Large-Aperture Scintillometer: Implications for Scintillometer users. *Boundary Layer Meteorology*, 156:303-323.

Retes-López, R., A.R. Nasaimea Palafox, S. Moreno Medina, F. G. Denogean Ballesteros, M. Martín Rivera. 2014. Analisis de rentabilidad del cultivo de nogal pecanero en la Costa de Hermosillo. *Revista Mexicana de Agronegocios*, vol. XVIII, (34): 872-882.

Valdés, A., L. Robles Hernández, E. Villalobos Pérez, y A. Rodríguez Andujo. 2011. Rentabilidad del nogal pecanero bajo sistemas de producción de mediana tecnología en Delicias, Chihuahua. *Revista Mexicana de Agronegocios*, vol. XV, (29)720-732.

- Rodríguez, J.C., Grageda, J., Watts, C.J., Garatuza-Payán, J., Castellanos-Villegas, A., Rodríguez-Casas, J., Sáiz-Hernández, J., Olavarrieta, V., 2010. Water Use by Perennial Crops in the Lower Sonora Watershed. *Journal of Arid Environments*, **74**: 603-610.
- Rodríguez, J.C. 2012. Uso del agua en cultivos perennes: Nogal. XIII Simposio Internacional de nogal Pecanero. 13 sep. 2012, Hermosillo, Sonora, Mexico.
- Sammis, T.W., Mexal, J.G., Miller, D., 2004. Evapotranspiration of Flood-Irrigated Pecans. *Agricultural Water Management*, **69**: 179-190.
- Wang, J., Sammis, T.W., Andales, A.A., Simmons, L.J., Gutschick, V.P., Miller, D.R., 2007. Crop Coefficients of Open-Canopy Pecan Orchards. *Agricultural Water Management*, **88**: 253-262.
- Cruz Bautista F., J.C. Rodríguez, C.Watts, J. López Elías, M. A. Huez López, J. Garatuza Payan, E.Yopez Gonzalez. 2012. Evaluación técnica de un sistema de riego por pivote central en cultivo de alfalfa. Congreso Internacional En Ciencia Agrícolas. Mexicali BC.
- Vázquez Villanueva N. 2011. Asociación Agrícola de Productores de Uva de Mesa. Modelo de la Agricultura Moderna en México en el Siglo XXI. IICA-COFUPRO. 92pp.
- Márquez J.A., G. Osorio, G. Martínez, J.H. Núñez, A.A. Fu, J. Grageda, B. Valdez, J.L. Miranda y J. Avila, 2004, Vid de mesa: establecimiento y manejo en la Costa de Hermosillo y Pesqueira, Folleto Técnico 27, INIFAP-CIRNO-CECH, Hermosillo, México.
- Villagra, P., V. García de Cortázar, R. Ferreyra, C. Aspillaga, C. Zúñiga, S. Ortega-Farías, and G. Sellés. 2014. Estimation of water requirements and Kc values of 'Thompson Seedless' table grapes grown in the overhead trellis system, using the Eddy covariance method. *Chilean journal of Agricultural Research*, **74**(2): 213-218.
- Williams, L. E., D. W. Grimes, C. J. Phene. 2010. The effects of applied water at various fractions of measured evapotranspiration on reproductive growth and water productivity of Thompson Seedless grapevines. *Irrig Sci*. **28**:233-243.
- Williams, L.E., C.J. Phene, D.W. Grimes, and T.J. Trout. 2003. Water use of mature Thomson seedless grapevines in California. *Irrig Sci*, **22**:11-18.
- Espinoza Arellano, J.J., C. Orona Castillo, J.G. Narro Reyes, M.J. León Robles. 2006. Aspectos sobre la producción, organización de productores y comercializadores del cultivo de la sandía en la Comarca Lagunera. *Revista Mexicana de Agronegocios*, vol. X, **19**:1-13.
- Bastos, A. E., Silva, R. C., Rodrigues, N. B. H., Andrade JR, S. A y Ibiapina, M. L. M. 2012. Evapotranspiration and crop coefficient of drip irrigated watermelon in Piauí Coastline, Brazil. *Eng. Agric.*, Jaboticabal. **32**(3): 582-590.
- Erdem, Y and Nedim, Y. A. 2003. Yield response of watermelon to irrigation shortage. *Scientia Horticulturae* **98**: 365–383
- Erdem, Y., Erdem, T., Orta, H. A and Okursoy, H. 2005. Irrigation Scheduling for Watermelon with Crop Water Stress Index (CWSI). *Central European Agriculture*. Vol. **6**: 449-460.
- Miranda, F. R., Goncalves, O. J. J.G and Souza, F. 2004. Evapotranspiração máxima e coeficiente de cultivo para a cultura da melancia. *Revista Ciencia Agronômica*. **35**: 36-43.
- Shukla, S., Shrestha, K. N., Jaber, H. F., Srivastava, S., Obreza, A. T and Boman, J. B. 2014. Evapotranspiration and crop coefficient for watermelon grown under plastic mulched conditions in sub-tropical Florida. *Agricultural Water Management*, **132**: 1– 9.
- Roman-Roman, L., J. C. Rodríguez, C. Watts, J. E. López Avendaño, A. Ochoa Meza, T. Díaz Valdes, C. Lizárraga Celaya. 2015. Medición de la evapotranspiración en sandía (*Citrullus Lanatus*) en la Costa de Hermosillo, México. *Terra Latinoamericana* (en revisión).

- Miranda, F. R., R. S. Gondim and C. A. G. Costa. 2006. Evapotranspiration and crop coefficients for tabasco pepper (*Capsicum frutescens*, L.). *Agricultural Water Management*. 82: 237-246.
- Rodríguez, J. C., C. Watts, J. Garatuza-Payán, M. A. Rivera, C. Lizárraga-Celaya, J. López-Elias, A. Ochoa-Meza, S. F. Moreno-Salazar y M. E. Rentería-Martínez. 2011. Evapotranspiración y coeficiente de cultivo en chile banana (*Capsicum annuum* L.) en el Valle del Yaqui, México. *Revista Biotecnia*. XIII: 28-35.
- Díaz- Pérez, J.C. 2013. Bell Pepper (*Capsicum annum* L.) crops as affected by shade level: Microenvironment, plant growth, leaf gas exchange, and leaf mineral nutrient concentration. *HortScience*. 48: 175-182.
- Sezen, S. M., A. Yazar, S. Eker. 2007. Effect of drip irrigation regime on yield and quality of field grown bell pepper. In: Lamaddalena N. (Ed.), Bogliotti C. (Ed.), Todorovic M. (Ed.), Scardigno A. (Ed.). *Water saving in Mediterranean agriculture and future research needs*. CIHEAM.1: 261-276.
- Shukla, S., N. K. Shrestha, F. H. Jaber, S. Srivastava, T. A. Obreza and B. J. Boman. 2014. Evapotranspiration and crop coefficient for watermelon grown under plastic mulched conditions in sub-tropical Florida. *Agricultural Water Management*. 132: 1-9
- Zermeño-González, A., J. Munguía-López, J. A. Gil-Marín, L. Ibarra-Jiménez, R. Quezada-Martín, M. Cadena Zapata, M. A. García-Delgado y M. Cantú-Sifuentes. 2011. Intercambio de dióxido de carbono en chile morrón cultivado en acolchado plástico. *Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Terra Latinoamericana*. 29: 411-419.
- Pacheco, A., S. Hernandez, V. Rocha, A. Gonzalez and K. Oyama. 2012. Genetic diversity and structure of papper (*Capsicum annuum* L. from northwestern Mexico analyzed by microsatellite markers. *Crop Science*, 52:231-241.
- Aminul Islam, Md., S. SudarSundar, P. Sinha, M. Singh Negi, B. Neog and S. Bhushan Tripathi. 2015. Variability in capsaicinoid content in different landraces of *Capsicum* cultivated in north-eastern India. *Scientia Horticulturae*, 183:66-71.
- Albert, V. A. and T. Chang. 2014. Evolution of a hot genome. *PNAS*, 111(14): 5069-5070.
- Li, S., S. Kang, F. Li, L. Zhang. Evapotranspiration and crop coefficient of spring maize with plastic mulch using eddy covariance in northwest China. *Agricultural water management* 95(1):2 14 – 1 22 2
- Suyker, A. E. and S. B. Verma. 2009. Evapotranspiration of irrigated and rainfed maize-soybeans cropping systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(3-4):443-452.
- Ertek, A and B. Kara. 2013. Yield and quality of sweet corn under deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 129:138-144.
- Benjamin, J.G., D.C. Nielsen, M.F. Vigil, M.M. Mikha, F. Calderon. 2015. Cumulative deficit irrigation effects on corn biomass and grain yield under two tillage systems, *Agricultural Water Management* 159: 107–114.
- Ramírez Díaz, J. L., J.J. Wong Pérez, J.A. Ruiz Corral y M. Chuela Bonaparte. 2010. Cambio de fecha de siembre del maíz en Culiacan, Sinaloa, Mexico. *Rev. Fitotec. Mex.* Vol. 33(1): 61 – 68.
- Hadria R., Olioso A., Duchemin B., Ruget F., Weiss M., Rivalland V., Guérif M., Lahrouni A., Lecharpentier P., Baret F., Launay M., (2010). Utilisation conjointe du modèle STICS et de données de télédétection optique pour la détermination des pratiques culturales (semis, apports d'azote) en région méditerranéenne. *Revue Télédétection*, 9 (2), 82-96.
- Rodriguez J–C., Duchemin B., Hadria R., Watts C., Garatuza J., Chehbouni A., Khabba S., Boulet G., Palacios E., Lahrouni A., (2004). Wheat yield estimation using remote sensing and the STICS model in the semi-arid valley of Yaqui, Mexico. *Agronomie* 24, 295–304.

Er-Raki, S., Rodriguez, J.C., Garatuza, J.P., Watts, C., Chehbouni, G. 2013. Determination of crop evapotranspiration of table grapes in a semi-arid region of Northwest Mexico using multi-spectral vegetation index. *Agricultural Water Management*.122: 12–19.

Johnson, D. M. 2014. An assessment of pre- and within-season remotely sensed variables for forecasting corn and soybean yields in the United States. *Remote Sensing of Environment* 141: 116–128.

Sakamoto, T., A. A. Gitelson, T. J. Arkebauer. 2014. Near real-time prediction of U.S. corn yields based on time-series MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 147: 219-231.

Jego, G., E. Pattey, S. M. Mesbah, J. Liu, I. Duchesne. 2015. Impact of the spatial resolution of climatic data and soil physical properties on regional corn yield predictions using the STICS crop model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 41:11–22.

Flores-Gallardo, H., W. Ojeda-Bustamante, H.Flores-Magdaleno, E. Sifuentes-Ibarra, E.Mejía-Saénz. 2013. Simulación del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo AQUACROP. *Agrociencia*, 47(4):347-359.

Viña A., A.A. Gitelson, D.C. Rundquist, G. Keydan, B. Leavitt, y J. Schepers, 2004, Monitoring Maize (*Zea mays* L. phenology with remote sensing, *Agron. J.*, 96:1139-1147.

Ritchie J.T. y S. Otter, 1985, Description and performance of CERES-Wheat: a user-oriented wheat yield model en: *ARS wheat field project, ARS-38, Springfield Mi.* 159-175.

Jones C.A. y J.R. Kiniry, 1986, *CERES-Maize: a simulation model of maize growth and development.* Texas A&M University Press, College station, Texas.

Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoullaud B., Gate P., Devienne-Baret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J.M., Meynard J.M., Delécolle R., 1998, STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterisation applied to wheat and corn, *Agronomie* 18: 311-346.

McCown R.L., G.L. Hammer, N.G. Hargreaves, D.P. Holzworth D.M. Freebairn, 1996, APSIM: A novel Software system for model development. *Model testing and simulation in agricultural system research, Agric. Syst.* 50:225-271.

Boote K., J.W. Jones, y N.B. Pickering, 1996, Potential uses and limitations of crop models, *Agron. J.*, 88:704-716.

Jones J.W., B.A. Keating y C.H. Porter, 2001, Approaches to modular model development, *Agric. Syst.*, 70:421-443.

Keating B.A., P.S. Carberry, G.L. Hammer, M.E. Probert, M.J. Robertson, D. Holzworth, N.I. Huth, J.N.G. Hargreaves, H. Meinke, Z. Hochman, G. McLean, K. Verburg, V. Snow, J.P. Dimes, M. Silburn, E. Wang, S. Brown, K.L. Bristow, S. Asseng, S. Chapman, R.L. McCown, D.M. Freebairn y C.J. Smith, 2003, An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation, *Europ. J. Agronomy* 18:267-288.

Lobell D.B., G.P. Asner, J.I. Ortiz-Monasterio, T.L. Benning. 2003. Remote sensing of regional crop production in the Yaqui Valley, Mexico: estimates and uncertainties, *Agric. Ecosyst. Environ.* 94:205-220.

1. Capacitar al menos a un estudiante de posgrado y un investigador en la instrumentación y operación en sitios y cultivos de interés.
2. Capacitar a un estudiante de posgrado en el procesamiento de datos micrometeorológicos para la obtención de evapotranspiración en los diferentes cultivos y el análisis de resultado.
3. Obtener la evapotranspiración y el coeficiente de cultivo de diversas superficies cultivadas y su difusión entre las asociaciones de productores.

Duración. nov 2015 a octubre 2017

## Infraestructura

Equipos de correlación de vórtices y Scintilometría

Año 1.

1. Trabajo de campo.

Sitio Costa de Hermosillo

Cultivo: Sandía

Duración de ciclo 90 a 100 días

Visitas 10 visitas + una visita de instalación y retiro

Monto visita 1000, monto instalación y retiro 2000.

Monto final 14,000

2. herramientas y accesorios

Cables, torres, base, tensores, etc.

Monto: 10,000

3. baterías (2)

Monto: 4000

1. Trabajo de campo.

Sitio Valle de Culiacan

Cultivo: Maiz

Duración de ciclo 180 a 190 días

Visitas 25 visitas + una visita de instalación y retiro

Monto visita 1000, monto instalación y retiro 2000.

Monto final 29,000

2. herramientas y accesorios

Cables, torres, base, tensores, etc.

Monto: 10,000

3. baterías (2)

Monto: 4000