



Desarrollo de un Sistema para estimación de Evapotranspiración por la Técnica de Surface Renewal

Gustavo Espinoza García, Carlos Alberto Olvera Olvera, José Ismael de la Rosa Vargas
Universidad "Francisco García Salinas" /Maestría en Ciencias de la Ingeniería
Jardín Juárez No. 147 Centro, Zacatecas Zac., México
ismaelrv@yahoo.com, gustavo.esga@hotmail.com, olveraca@gmail.com

RESUMEN

La técnica de Surface Renewal fue usada para estimar la densidad del flujo de calor sensible (H), para lograr dicha estimación fue necesario realizar mediciones de temperatura a una frecuencia de 10 Hz, esto para analizar las pérdidas de agua en el cultivo a través de evapotranspiración real en pasto (césped), uno de los resultados obtenidos fue la estimación de H por la técnica de SR a través de dispositivos electrónicos y comunicación para proceso de la señal en tiempo real, esto para poder estimar el flujo de calor latente que es equivalente a la evapotranspiración y poder analizar cuanta pérdida de agua hay en un cultivo.

Las mediciones fueron tomadas con retardos de tiempo $r = 0.5s$ para procesar la señal, y se analizó el comportamiento de los datos obtenidos; se recopilaron datos de temperatura por medio de termopares, los cuales fueron compensados con un circuito integrado (AD595) para tener a la salida una temperatura adecuada y en forma lineal, a los datos de temperatura fueron llamados vectores de medición (v_1 , v_2 y v_3), esto para procesarlos y observar el comportamiento de (H) extraída por medio de funciones de tipo rampa que indican el periodo de duración $t+s$ (s) y amplitud a ($^{\circ}C$) de la transpiración. Se recopilaron lecturas de datos en un microcontrolador (Arduino Mega 2560) y se enviaron a una computadora para luego ser procesadas por el método de Funciones de Estructura y el método de Newton-Raphson [5] para encontrar las raíces reales que se requieren para identificar la amplitud al igual que el periodo de duración de las funciones tipo rampa, esto tuvo hincapié al apoyo de una herramienta de proceso rápido, en el cual se efectuó gran parte del acondicionamiento de las señales de temperatura de forma computarizada con el software Matlab.

PALABRAS CLAVE: Evapotranspiración, Calor Sensible, Calor Latente, Función de Estructuras, Rampas de Temperatura, Técnica Surface Renewal.

1 INTRODUCCIÓN

Una de las problemáticas generales que se presentan en el Estado de Zacatecas es el gasto excesivo del agua, uno de los sectores que se encargan de gastar en forma exagerada este líquido es el de agronomía, por tal motivo surge una necesidad de potenciar recursos destinados a la modernización y tecnificación hidroagrícola además de que la comunidad científica y tecnológica contribuya de forma crecientemente efectiva a la formulación y despliegue de la política de sustentabilidad hídrica según las cláusulas de la agenda del agua con tendencias al 2030 de la SEMARNAT, para dar énfasis a tal problemática se buscó una necesidad en forma real para poder dar una aplicación en cuestión tecnológica, en este caso algo de aplicación mecatrónica a la biología; por lo que se inició un proyecto en campo agrícola con interés en producción que se da en el estado zacatecano tanto en invernaderos como en cielo abierto, actuando principalmente sobre los sistemas de riego basados en problemas reales de las plantas, dichos problemas son resueltos por medio de sensores que miden variables climatológicas como temperatura, radiación solar, velocidad del viento, y la



implementación de una técnica para estimar la densidad del flujo de calor sensible (H), sin embargo este flujo de calor sensible sirve para calcular el flujo de calor latente (LE), esto para estimar la evapotranspiración de cultivo y analizar las necesidades de la planta para tener una idea de cuánta agua se pierde y cuanta se necesita en el cultivo para llevar a cabo un riego con uso eficiente del agua en nutrientes y tecnificar todo el sistema de riego para generar transferencia tecnológica y resolver una de las necesidades que pueda atacar problemáticas como el gasto en exceso del agua y evitar sobreexplotación al igual que otras necesidades como son la huella hídrica en el estado y otras problemáticas que van surgiendo con respecto a otras necesidades. [1] Hoy en día la evapotranspiración es uno de los factores más importantes para los sistemas de riego, ya que permite conocer información directa de las pérdidas de agua en el cultivo a medida de que dicha información puede ser usada como retroalimentación en el control de un sistema de riego automatizado y lograr un potencial en el desarrollo de los mismos sistemas de riego en forma real ya sea en cielo abierto o en invernaderos y así lograr una transferencia tecnológica con mejor desarrollo con costos accesibles y menores a comparación de los sistemas existentes.

Comúnmente existen distintos métodos para la estimación de evapotranspiración que a menudo son muy costosos y únicamente con fines de investigación como lo son el sistema de Covarianza de Eddy, lisímetro, porómetro y medidores de flujo de sabia; una de las actuales soluciones a nivel de granja y de menor costo y con mediciones en tiempo real es la técnica de Surface Renewal (SR), la cual consiste en almacenar datos de la densidad del flujo de calor sensible (H) en niveles (alturas de medición) ubicados en la parte superior al dosel de las plantas en algún cultivo definido para la parte experimental, para llevar a cabo la aplicación e implementación de la técnica SR se requiere interactuar con distintos parámetros para detectar los flujos de temperatura existentes sobre los doseles de las plantas, una de las principales necesidades es estimar la transpiración, para luego tener idea de cuánto es lo que se debe regar en un área determinada en función del mismo cultivo es obtener la densidad del flujo de calor sensible (H) registrando las mediciones ya mencionadas de temperatura a una frecuencia alta de muestreo de 10Hz debido a que es una de las frecuencias que se ha reportado con mayor satisfacción en las recopilaciones de temperatura bajo distintas condiciones así como son la altura de medición sobre el dosel de la planta $z(m)$, retardos de tiempo $r(s)$ y la combinación de todos estos factores para lograr con mayor acierto el uso eficiente del agua en un cultivo.

Al recopilar la información de las temperaturas se utilizó un método de filtros pasabajas para eliminar la parte turbulenta de ruido independiente que se encontró en las señales de temperatura, esto para considerar la mínima existencia de factores que intervengan en los resultados y el sistema sea lo menos erróneo posible, toda la parte del análisis de la temperatura se comparó con mediciones de radiación solar y velocidad de viento, se observó que las gráficas de resultados únicamente en la recopilación de los datos coinciden en los intervalos de tiempo (30 minutos) en que fueron capturados, las mediciones fueron almacenadas en una computadora después de la recopilación de datos, los registros de la radiación fueron tomados a partir de una consola de recepción de señales en forma inalámbrica, ya que las señales recibidas en la consola fueron enviadas desde una estación que mide variables climatológicas (Davis), los datos almacenados de temperatura muestran que el comportamiento de la velocidad del viento es menor cerca de la superficie y aumenta con respecto a la altura por lo que un solo nivel en cuestiones a dicho viento nos indican que



el corte de la temperatura es afectado de manera notoria en captura de datos a través de termopares colocados por encima del dosel de la planta por consecuencia los datos del viento son una variable independiente de la captura de datos.

2 teoría

La técnica de SR consiste en identificar el flujo de calor sensible (H) que es inferido por una ecuación que depende de funciones de estructura de tipo rampa, además de incluir parámetros que tienen inferencia en el aire tal como lo son la densidad y el calor específico a presión constante dependiendo de la ubicación de la zona, entre otros parámetros, es por ello que se recurre a fórmulas que nos ayudaron al cálculo de la estimación del flujo de calor sensible (H) tomando en cuenta los parámetros del aire, utilizando la siguiente ecuación:

$$H = \rho c_p \frac{a}{l + s} z \quad (1)$$

$$H_{SR} = \alpha \rho c_p \frac{a}{l + s} z \quad (2)$$

Donde H_{SR} es únicamente el flujo de calor sensible con SR, α es un factor de calibración que es determinado a través de la comparación de una medición de referencia de H , en este caso se tomó $\alpha = 1$, ρ es la densidad del aire, y c_p es el calor específico del aire a presión constante, z es el nivel de medición por encima del dosel de la planta, también se introduce que la parte de medición de la temperatura es independiente de la dirección del flujo del calor, por lo que se consideran todos los datos que capta el sensor de temperatura y se recopilan en la computadora en forma vectorial y gráfica para un proceso que es necesario a fin de que se tenga una buena precisión al estimar H , sin embargo los resultados de esta estimación nos da un valor que debe ajustarse o corregirse por medio de un factor de calibración que nos determina la comparación con cualquier otro sistema de referencia al que se esté sometiendo la parte de pruebas en el sistema de estimación para evapotranspiración, tales son los casos de mediciones directas con una estación Davis, Atmómetro de medición para evapotranspiración de referencia y Cálculos por el método de Penman-Monteith. [3]

Otro de los puntos tratados es la densidad del flujo de calor latente (LE), el cual es dado por una ecuación de balance que resulta de la manipulación de todos los datos obtenidos como lo son la densidad del flujo de calor sensible, radiación solar, flujo de la radiación hacia el suelo, y un par de parámetros de ajuste que influyen a través de la dependencia del sistema de referencia con el que se cuente, ya que el cálculo de la regresión lineal por medio de la ecuación de la línea recta y el factor de error por medio del método de mínimos cuadrados nos dio la idea de calcular esos valores de ajuste llamados A y B .

3 Materiales y metodos

Se realizó un experimento en la Universidad Autónoma de Zacatecas en una de las Áreas de Ingeniería Eléctrica, sobre un área contenedora de pasto, esto con la finalidad de obtener

mediciones de temperatura para implementar la técnica de Surface Renewal, en este caso las ubicaciones del terreno donde se llevó a cabo, son las siguientes: Latitud de $22^{\circ}46'08''N$; Longitud de $102^{\circ}33'55''O$, y una Altitud de 2390 msnm, al conocer la ubicación se buscó un área de 2m x 2m y en el centro de esa área se ubicaron termopares con separación de 1m en forma cuadrada, de tal modo que se simulara un cuadrado de 1m x 1m, estas mediciones fueron hechas a una altura de 0.1m sobre el dosel del pasto para registrar temperaturas acorde al comportamiento del medio ambiente, todas la mediciones de temperatura fueron efectuadas a una frecuencia de muestreo de 10Hz, los datos fueron capturados por los termopares tipo k y compensados por un circuito integrado (AD595) ya que entrega además una salida lineal, el AD594/AD595 es un amplificador de instrumentación completa y termopar compensador de unión fría en un chip monolítico, combina un punto de referencia fría con un amplificador precalibrado para producir un nivel alto ($10\text{ mV} / ^{\circ}\text{C}$) de salida directamente de una señal de termopar. Tiene unas opciones Pin-flejado que permiten que sea usado como un amplificador de compensación lineal o como un controlador de punto de ajuste de salida de conmutación utilizando ya sea fijo o de control remoto de consigna. Se puede utilizar para amplificar su tensión de compensación directamente, de ese modo la conversión de un transductor independiente a grados centígrados con una salida de voltaje con baja impedancia, después los datos fueron transferidos a un microcontrolador (Arduino Mega 2560) el cual se encarga de recibir, leer y transferir información y a la vez sirve como adaptador de señal para tener comunicación directa con Matlab para graficar en tiempo real, para luego ser procesados por el mismo software (Matlab), también cabe mencionar que se colocaron 4 termopares en la misma altura ($z_n=0.1\text{m}$) para observar el comportamiento del flujo de calor sensible en el pasto, y verificar la recepción de señal de cada uno de los termopares, se eliminó uno de ellos por mala recepción de datos y se consideraron los tres restantes, en la *Figura 1* se muestra la dispersión y acomodo de los sensores de medición y el área contenedora de pasto en la que se realizó el experimento:



Figura 1. Área del experimento con sensores de medición.

Como se ve en la figura 1 todos los sensores fueron dispersados en un área de prueba en la que se almacenaron los datos capturados y se enviaron a un microcontrolador para su lectura y comunicación en un computador en el que se llevó un seguimiento de la recepción y se efectuó un proceso al cual, teóricamente se le llamado método de funciones de estructura que fue propuesto por Van Atta (1977) y sirve para inferir la estimación de la densidad del flujo de calor sensible (H), se recopilaron de igual manera datos de Radiación Solar y de velocidad



de viento para comparar con los datos de temperatura y observar si el comportamiento era de la misma forma que el de los datos capturados de temperatura, los datos de radiación y de viento fueron tomados con una estación de la marca Davis que manda señales en forma inalámbrica hacia una consola compatible con la misma estación y se comparan los datos en forma gráfica en la interface de Matlab para lo ya mencionado que es el comportamiento de las gráficas justo en los mismos instantes de tiempo y con las mismas duraciones de medición, en este caso se tomó una de las muestras que tuvo una duración de 2.5 horas y se dividió en 5 segmentos de 0.5 horas para el estudio y observación de los datos siguiendo el protocolo de otras publicaciones. [2,3 y 4]

La estación y la consola Davis que fueron usadas en este experimento se muestran en la figura 1, se usaron en conjunto con termopares tipo k, compuestos de una aleación de Alumel y una de Cromel, fueron expuestos a una altura sobre el dosel del pasto (z/h) de 0.1m y se almacenaron datos cada media hora para fin de ver y analizar el comportamiento de la oscilación de la temperatura con respecto al tiempo y la radiación solar. Se hizo la medición de la altura (h) sobre la cima del dosel (zn) al aire libre, se colectaron mediciones de temperatura para inferir cuanto era la densidad del flujo de calor sensible (H) para estimar el flujo de calor latente (LE) por medio de una ecuación de balance ya que (LE) es equivalente a la evapotranspiración y se estimarían a partir de los datos almacenados, graficados y comparados contra las temperaturas obtenidas de las termopares tipo k en la experimentación.

El proceso que se le aplica a las gráficas de las temperaturas recopiladas es el método de Funciones de Estructura propuesto por Van Atta (1977), ya que este método consiste en detectar funciones de tipo rampa las cuales simulan un comportamiento en forma ideal de la transpiración del cultivo en eventos de temperatura con respecto al tiempo, el fin de utilizar funciones de estructura es para determinar la duración de los periodos ($I+s$) que duran cada uno de los eventos y la amplitud de las rampas (a) a partir de la siguiente ecuación [2]:

$$S^n(r) = \frac{1}{m-j} + \sum_{i=1+j}^m (T_i - T_{i-j})^n \quad (3)$$

Donde m indica el número de muestras de datos en intervalos de 30 minutos medidos a una frecuencia (en Hz), n es la potencia de la función, j son las muestras de retardo entre datos correspondientes al retardo de muestreo ($r = j/f$), y las T_i son la i -ésima muestra de temperatura. La teoría de Funciones de Estructura nos dice que r puede ser mucho menor que $I+s$, la usada en este experimento fue una $r=0.5$ que es la q mejor ha funcionado para césped. [3]

Para el cálculo de la amplitud media de las rampas fue estimada de la siguiente manera:

$$a^3 + ap + q = 0 \quad (4)$$



Dónde:

$$p = 10S^2(r) - \frac{S^5(r)}{S^3(r)} \quad (5)$$

Se menciona que las literales $S^n(r)$ en la ecuación anterior no son la misma y por eso no procede más reducción algebraica, requieren diferente potencia para cumplir con las literales p y q además de extraer las raíces reales del polinomio de orden cúbico y se tiene la siguiente ecuación:

$$q = 10S^3(r) \quad (6)$$

Para determinar las raíces reales que cumplen con la solución de a se recurrió al método numérico de Newton-Raphson ya que este nos ayuda a identificar la raíz real correspondiente a cada una de las modificaciones que van incidiendo en la medición y variación de las temperaturas de los datos almacenados en la computadora, esto para obtener de manera precisa el periodo de duración del evento tipo rampa involucrado con los eventos de transpiración del cultivo (densidad del flujo sensible de calor), también se calculó el inverso de a (frecuencia de rampa) con esta ecuación:

$$l + s = -\frac{a^3 r}{S^3(r)} \quad (7)$$

Al obtener los valores del periodo y amplitud de las funciones tipo rampa y el valor de H se procede a ingresarlos a una ecuación de energía de balance, la cual nos ayuda a identificar el valor de la densidad del flujo de calor latente (LE) para relacionar la radiación solar, la densidad del flujo de calor sensible, el flujo de calor hacia el suelo, entre otros parámetros que sirven para la estimación del flujo de calor latente como el densidad del aire (ρ), calor específico del aire a presión constante (Cp) y la altura de medición sobre el dosel del cultivo (zn), en algunos artículos como el publicado por Rafael Rosa (2013). [4]

Se dice que el flujo del calor latente es usado para inferir la evapotranspiración, por lo que se observa que es uno de los caminos a seguir en el análisis de estimación para las pérdidas de agua en un cultivo, la ecuación de Balance es la que se muestra enseguida:

$$LE = A(Rn - G) + B - H \quad (8)$$

Donde Rn ($W m^{-2}$) es la Radiación neta, G ($W m^{-2}$) es el flujo de calor al suelo, A y B representan la pendiente y la intersección, respectivamente de la regresión lineal entre H , LE y $Rn-G$.

4 resultados

Como resultado de las mediciones se seleccionó una de las gráficas con duración de 2.5 hrs., en esta medición se graficó por número de muestras, considerando que en las 2.5 hrs. Caben 5 periodos de 30 minutos y cada minuto 60 segundos, y además se llevó a cabo un muestreo de 10 Hz, o 10 muestras por segundo es el equivalente a las 90,000 muestras en total y el comportamiento de las 3 mediciones a un mismo nivel y con una misma frecuencia se analizó la *Figura 2*.

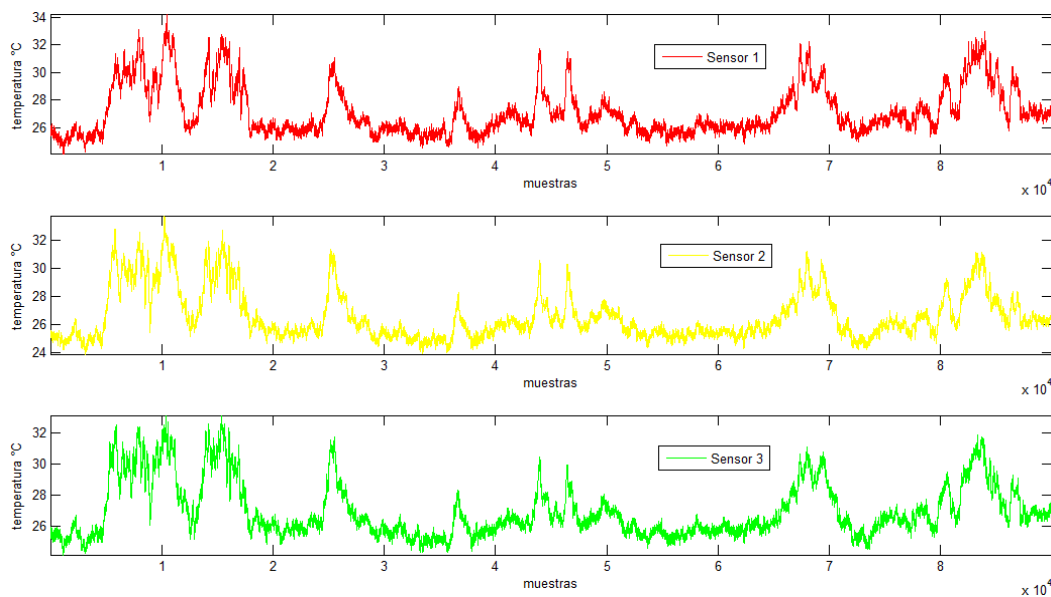


Figura 2. Temperatura capturada en 2.5 horas

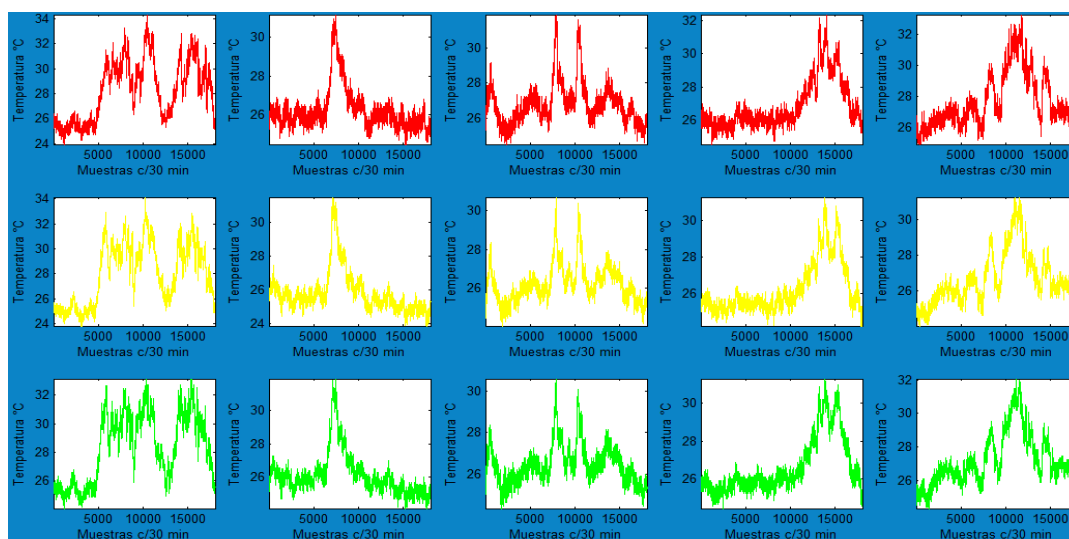


Figura 3. Segmento y comparación de los vectores cada 30 minutos.

Al igual que las Figuras 2 y 3 también se analizó el comportamiento de la Radiación Solar y la Velocidad del Viento como se ve en la Figura 4 en un tiempo como se ve en la tesis [7] solo que en este caso el tiempo de duración fue de 2.5 hrs, con una recopilación de datos cada minuto a partir de la 1:38pm y culminando a las 4:12pm el día martes 20/05/2014, al hacer el experimento se observaron cambios drásticos en el clima, por lo que las gráficas de temperatura y radiación salieron con bastante variación, se nota como aumenta y disminuye el comportamiento, esto sirve para analizar el comportamiento de la temperatura en el cultivo con respecto a la radiación y la precisión con la que llega la respuesta al sistema receptor de datos en el microcontrolador.

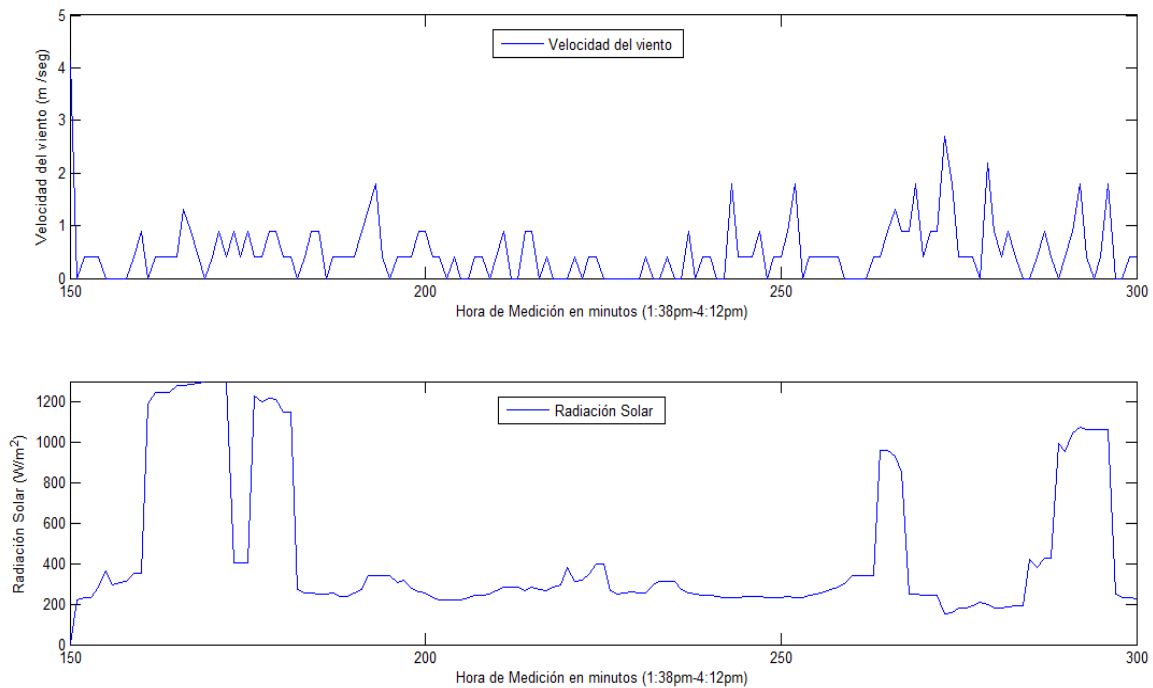


Figura 4. Radiación Solar y Velocidad del viento almacenada cada minuto en 2.5hrs.

A continuación se indican los valores de las raíces reales de los polinomios correspondientes a los comportamientos de las funciones rampa como la función de estructura que se ingresaron al software Matlab y el resultado que se ha tenido hasta hoy dl flujo de calor sensible (H).

Tabla 1. Resultados para el primer sensor

'p, q'	's31'	Raíces 'a'	$\tau_1 = 1/s$ (s)	#i	H1- W/m ²
1.5238e4, 1.2068e5	1.2068e4	-7.8875	0.0203	4	-144.9263
1.5238e4, 1.2068e5	1.2068e4	-7.8872	0.023	4	-144.9382
1.5238e4, 1.2068e5	1.2068e4	-7.8872	0.023	4	-144.9382



1.5238e4, 1.2068e5	1.2068e4	-7.8872	0.023	4	-144.9382
1.5238e4, 1.2068e5	1.2068e4	-7.8872	0.023	4	-144.9382

Tabla 2. Resultados para el segundo sensor

'p y q'	's32'	Raíces 'a'	$\tau_2 = l+s$ (s)	#i	H2-W/m ²
1.4079e4, 1.1886e5	1.1886e4	-8.3999	0.0249	4	-125.8599
1.4081e4, 1.1886e5	1.1886e4	-8.3991	0.0241	4	-1258842
1.4081e4, 1.1886e5	1.1886e4	-8.3991	0.0241	4	-1258842
1.4081e4, 1.1886e5	1.1886e4	-8.3991	0.0241	4	-1258842
1.4081e4, 1.1886e5	1.1886e4	-8.3991	0.0241	4	-1258842

Tabla 3. Resultados para el tercer sensor

'p y q'	's33'	Raíces 'a'	$\tau_3 = l+s$ (s)	#i	H3-W/m ²
1.4766e4, 1.2072e5	1.2072e4	-8.1386	0.0223	4	-136.1662
1.4767e4, 1.2072e5	1.2072e4	-1.81381	0.0223	4	-136.1827
1.4767e4, 1.2072e5	1.2072e4	-1.81381	0.0223	4	-136.1827
1.4767e4, 1.2072e5	1.2072e4	-1.81381	0.0223	4	-136.1827
1.4767e4, 1.2072e5	1.2072e4	-1.81381	0.0223	4	-136.1827

5 conclusiones

Una de las técnicas más accesibles en costo para el campo agrícola es la de Surface Renewal, ya que se han demostrado resultados que son similares a los ya reportados y comparados contra sistemas costosos como EC como la estimación en las tablas anteriores de la literal *H* para inferencia de ET por medio de procesado de señal para cada uno de los sensores de medición.

La frecuencia de medición de 10 Hz fue la que mostró los mejores resultados en el pasto con una altura de 0.1m sobre el nivel del dosel.

La estimación de evapotranspiración por medio de la técnica de Surface Renewal es una que requieren de un bajo costo en la implementación real para los sistemas de fertirrigación y nos aporta conocimiento de las necesidades reales en cuestión a las necesidades del cultivo.



6 Agradecimientos

Agradecemos a CONACyT por la Beca No. 286722 y el Proyecto 213413, ya que han sido un gran apoyo para el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] Agenda del agua 2030 (Comisión Nacional del Agua). Edición 2011
- [2] D. Spano, et al. Surface renewal analysis for sensible heat flux density using structure functions. *Agricultural and Forest Meteorology*, (1997); 86: 259-271.
- [3] R.L. Snyder, D. Spano, K.T. Paw U. Surface renewal analysis for sensible and latent heat flux density. *Boundary-Layer Meteorology*, (1996); 77: 249-266.
- [4] Rafael Rosa, Uri Dicken, Josef Tanny. Estimating evapotranspiration from processing tomato using the surface renewal technique. *Biosystems engineering*, (2013); 114: 406-413.
- [5] D. Spano, et al. Estimation of surface energy fluxes using surface renewal and flux variance techniques over an advective irrigated agricultural site. *Advances in Water Resources*, (2012); 50: 91-105.
- [6] Andrew N. French, et al. Surface renewal analysis for sensible heat flux density using structure functions. *Agricultural and Forest Meteorology*, (1997); 86: 259-271.
- [7] Samuel Villarreal Rodríguez. Variabilidad interanual de la evapotranspiración en dos ecosistemas semiáridos con patrones de precipitación distintos. MSc Thesis, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior e Insenada, Ensenada, Baja California, México, 2012.