

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Estimación de la Evapotranspiración de los cultivos mediante
MODIS16**

Fernando Israel Valdiviezo Camacho

Ingeniería Civil

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Civil

Quito, 11 de mayo de 2020

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

Estimación de la Evapotranspiración de los cultivos mediante MOD16

Fernando Israel Valdiviezo Camacho

Nombre del profesor, Título académico

Sixto A. Durán-Ballen, Ph.D.

Quito, 11 de mayo de 2020

DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Nombres y apellidos: Fernando Israel Valdiviezo Camacho

Código: 00124791

Cédula de identidad: 1104804776

Lugar y fecha: Quito, 11 de mayo de 2020

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

RESUMEN

La evapotranspiración es un dato necesario para varios procesos ingenieriles, por lo tanto, su obtención rápida y precisa es de importancia, por lo que por medio del presente trabajo se discutirá paso a paso su obtención por medio de dos métodos satelitales, siendo estos el método del triangulo y el subproducto del MODIS16, para finalmente demostrar su validez al ser comparados con el resultado de la ecuación de Penman-Monteith.

Palabras clave: Evapotranspiración, Método del Triangulo, MODIS16, Penman, NDVI, Imagen Satelital.

ABSTRACT

Evapotranspiration is a necessary data for various engineering processes, therefore, obtaining it quickly and accurately is quite important , so through this work is obtained by means of two satellite methods that will be discussed step by step, these being the method of the triangle and the sub product of MODIS16, to finally demonstrate its validity when compared with the result of the Penman-Monteith equation.

Key words: Evapotranspiration, Triangle Method, MODIS16, Penman, NDVI, Satellite Image.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	10
DESARROLLO DEL TEMA	19
CONCLUSIONES	33
RECOMENDACIONES.....	34
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Datos meteorológicos Macas.....	19
Tabla 2 Evapotranspiración Macas.....	19
Tabla 3 Datos meteorológicos Antisana.....	26
Tabla 4 Evapotranspiración Antisana.....	26
Tabla 5 Cuadro Comparativo.....	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1 Balance Hídrico.....	11
Ilustración 2 Capas Modis16.....	14
Ilustración 3 NDVI.....	15
Ilustración 4 Método del Triángulo.....	16
Ilustración 5 Aproximación Geométrica.....	17
Ilustración 6 Visualización Nubes.....	20
Ilustración 7 NDVI Macas.....	21
Ilustración 8 Temperatura.....	21
Ilustración 9 Método del Triángulo.....	22
Ilustración 10 Evapotranspiración.....	23
Ilustración 11 Evapotranspiración mediante MODIS16.....	24
Ilustración 12 Representación de Píxel.....	24
Ilustración 13 Puntos al azar en un píxel.....	25
Ilustración 14 Evapotranspiración.....	25
Ilustración 15 Evapotranspiración Modis16.....	26
Ilustración 16 Visualización nubes.....	27
Ilustración 17 NDVI.....	27
Ilustración 18 Temperatura.....	28
Ilustración 19 Método del triángulo.....	28
Ilustración 20 Evapotranspiración.....	29
Ilustración 21 Evapotranspiración MODIS16.....	29
Ilustración 22 Evapotranspiración.....	30
Ilustración 23 Evapotranspiración MODIS16.....	30
Ilustración 24 Regresión Lineal método del Triángulo y Penman.....	31
Ilustración 25 Regresión Lineal Triangulo escalada y Modis16.....	32

INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del proyecto

La evapotranspiración es uno de los principales componentes del balance hídrico. MODIS es un instrumento que conforma parte del proyecto Earth Observation System de la NASA, para estimar la evapotranspiración de la superficie terrestre global mediante el uso de datos obtenidos por instrumentos de teledetección. El producto de evapotranspiración, MOD16, puede ser usado para calcular balances hídricos y balances de energía regionales. Así como una estimación precisa de las necesidades hídricas de los cultivos para adaptar los sistemas de riego a una mejor gestión y aprovechamiento de los recursos hídricos.

1.2 Problemática

La falta de información imposibilita la obtención de evapotranspiración en cualquier zona del Ecuador así mismo las fechas también son limitadas. Toda esta información la maneja una sola entidad gubernamental lo que significa hacer peticiones formales para conseguir los datos deseados, peticiones que si bien pueden ser ágiles también pueden ser demoradas. Por ende, el presente trabajo busca la obtención de la evapotranspiración sin depender de datos de estaciones meteorológicas y solo de valores satelitales para cualquier zona deseada.

1.3 Objetivos

- Evaluar la información cartográfica hidrogeología disponible e investigar el estado actual con respecto a la información de evapotranspiración en el Ecuador.
- Revisión general de los recursos de teledetección e información satelital aplicada a la hidrogeología.
- Definir y comparar los distintos Índices de teledetección tales como NDVI, para la estimación de la evapotranspiración
- Desarrollar un manual de procedimiento para la estimación de la evapotranspiración real (ETa), mediante información satelital, datos meteorológicos estándar, y el método del triángulo
- Proponer una metodología para la determinación del patrón espacial y temporal de la evapotranspiración real a partir de índices de vegetación (NDVI) y la clasificación multi-espectral con los que se pueda estimar cuantitativamente los balances hídricos.
- Establecer criterios que contribuyan a unificar la información, los procesos, las metodologías y técnicas de forma que las diferentes entidades que realizan evaluaciones de los recursos hídricos en el Ecuador compartan una metodología y procedimiento estandarizado.

1.4 Marco teórico

Balance Hídrico

El balance hídrico es el estudio del equilibrio de masas de agua en un sistema cerrado, es decir a grandes rasgos se supone que la precipitación debería ser igual a la escorrentía más la evapotranspiración, suponiendo que no existe pérdida de ningún tipo de pérdidas. Dado este concepto ahora también se puede definir el ciclo hidrológico como el movimiento de masas de agua, descendente por precipitación que después pasa a ser escorrentía superficial o subterránea y ascendente como evaporación (SGL,2011).

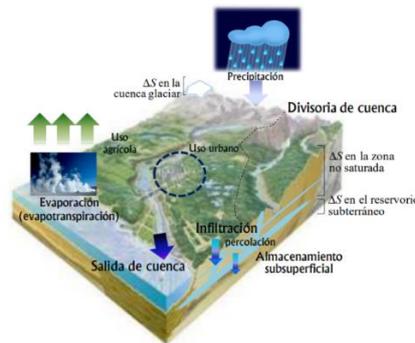


Ilustración 1 Balance Hídrico

El balance hídrico es un valor que ayuda a cuantificar en función de espacio y tiempo los recursos hídricos de una zona deseada (Unesco, 1982). En caso de la ingeniería la importancia de esta herramienta reside en la posibilidad de encontrar déficit en sistemas donde se use cualquier fuente de agua y luego proponer soluciones como; almacenamientos de agua, proyección de estrategias para la correcta distribución de agua, reciclaje de agua y entre otros.

Aunque la ecuación del balance hídrico en si es sencilla, el problema reside en la obtención de los datos que la conforman ya que muchos de estos deben de ser medidos en campo y en el caso de la evapotranspiración la variación que puede tener en un mismo terreno. Por lo cual el presente trabajo tiene como finalidad la obtención de la evapotranspiración por métodos satelitales (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2016).

Evapotranspiración

Se define fácilmente como la salida del agua que se encontraba en el suelo y en la superficie vegetal hacia la atmosfera (Allen, Pereira, Dirk, & Smith, 2006). Como se mencionó anteriormente es de vital importancia en el cálculo del balance hídrico, pero también se puede usar este valor para determinar el estrés hídrico. Se define estrés hídrico cuando la demanda de agua es mayor que la que se encuentra disponible en un periodo de tiempo que generan ciertos cultivos y a su vez el rendimiento de estos. Dado esto a lo largo de los últimos años se han desarrollado dos grandes grupos de métodos de obtención de este valor, los métodos que usan datos registrados en campo de la superficie y los métodos que usan datos obtenidos por percepción remota.

El primer grupo mencionado usa métodos empíricos y directos, siendo los métodos directos que servirán de control para el presente trabajo ya que estos usan instrumentación específica usando el lisímetro, el evapotranspirómetro de Thornthwaite o de parcelas de ensayo. El segundo grupo tiene dos métodos principales, uno que se basa en obtener la ET por métodos de balance energético de superficies y el otro método se basa en índices vegetales (NDVI) (Marini, Santamaría, & Oricchio, 2016).

La evapotranspiración real (ETR) es la que se producirá dadas las condiciones reales de la zona de estudio y la evapotranspiración potencial (ETP) es la que se produciría si el suelo y la cobertura vegetal estuviera en estado óptimo (Marini, Santamaría, & Oricchio, 2016).

Fracción evaporativa

La Fracción evaporativa es un valor adimensional que nos permite cuantificar cuanta energía disponible es usada en el proceso de la evapotranspiración (Toledo et al., 2013). La ventaja de este valor es que es constante en días sin nubes ya que solo es energía disponible (Shuttleworth et al., 1989), a partir de este valor se puede derivar la ET con fórmulas que se mencionará más adelante.

Radiación Neta

La FAO define a la radiación neta (R_n) como la diferencia entre la radiación que entra y la que sale en función de sus longitudes de onda cortas y largas, en otras palabras, se puede interpretar como el equilibrio entre la energía emitida, absorbida y reflejada por la tierra. Según la FAO este valor es positivo en el día y negativo en la noche, esto es importante para tener un control de los datos obtenidos por satélite.

Flujo de Calor del Suelo

Este valor es una aproximación a la evapotranspiración considerando el balance energético, es la energía requerida para calentar un área de suelo (FAO, s/f). Aunque este valor es pequeño comparado con la R_n igual se debe considerar sumándolo o restándolo, aunque varios autores directamente lo desprecian (Shuttleworth & R. J. Gurney, 1989)

Lisímetros

Los lisímetros son tanques que contienen el suelo natural o disturbado en donde los cuales se hace crecer los cultivos su manera de medir la ET varía, pero todos los métodos presentan exactitud de centésimas de milímetros por lo que su pérdida de agua es mínima (Allen, Pereira, Dirksen, & Smith, 2006). Estos tanques requieren de mucho cuidado y su uso es de personas especializados debido a esto se pasará a hablar de un método empírico que ha sido catalogado como uno de los más precisos.

Penman-Monteith

Para la obtención de la ET para el presente proyecto se decidió usar el método aceptado y recomendado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Allen, Pereira, Dirksen, & Smith, 2006). El presente método es una combinación del balance energético con un método de transferencia de masas, por lo cual los datos necesarios para el

cálculo se pueden obtener de estaciones meteorológicas siendo estos; temperatura, humedad atmosférica y velocidad del viento. Por lo cual se va a solicitar al INAMHI los datos necesarios. La ecuación general para la obtención de la ET es dada por la siguiente

$$Et = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \frac{\gamma * 900}{T + 273} u_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Donde:

$$Et = \text{Evapotranspiración} \left[\frac{mm}{día} \right]$$

$$R_n = \text{Radiación Neta} \left[\frac{Mj}{m^2 día} \right]$$

$$G = \text{Flujo de calor de Suelo} \left[\frac{Mj}{m^2 día} \right]$$

$$T = \text{Temperatura medida del aire} [^{\circ}C]$$

$$u_2 = \text{Velocidad del viento} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$e_s = \text{Presión del vapor de saturación} [kPa]$$

$$e_a = \text{Presión real de vapor} [kPa]$$

$$e_s - e_a = \text{déficit de presión de vapor} [kPa]$$

$$\Delta = \text{Pendiente de la curva de presión de vapor} \left[\frac{kPa}{^{\circ}C} \right]$$

$$\gamma = \text{Constante psicrométrica} \left[\frac{kPa}{^{\circ}C} \right]$$

Para poder resolver por el método de Penman se requiere como datos iniciales la temperatura mínima y máxima, humedad relativa máxima y mínima, velocidad del viento, radiación global, latitud y altitud. Una vez teniendo los datos mencionados se requiere procesarlos datos, la FAO plantea un total de 18 pasos antes de obtener la ET, por lo cual se decidió usar un Excel ya desarrollado por Biometereology Group.

Teledetección

La teledetección es el proceso mediante cual se obtiene información a partir de imágenes satelitales que varían en función de la longitud de onda que son captados por sensores que se encuentran en satélites y aerotransportadores.

Los teledetectores puede ser pasivo o activo. Los pasivos detectan la radiación natural reflejada o emitida por el objeto a estudiar, mientras que el activo emite energía para poder analizar el objeto a cuestión y de esta manera medir la radiación reflejada.

MODIS - Mod16

Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) es un sensor de imagen que fue lanzado a órbita por la NASA en 1999 a bordo del satélite Terra y una vez más lanzado a órbita en 2002 a bordo del satélite Aqua. La diferencia principal entre Terra y Aqua es que mientras Terra orbita la Tierra en sentido Norte – Sur, el satélite Aqua orbita en sentido Sur – Norte (United States Geological Survey, n.d.).

Estos dos satélites están analizando toda la superficie terrestre cada 1 o 2 días, obteniendo hasta 36 lecturas de espectros de banda. Dentro de MODIS cuentan con una lectura que se le asignó el nombre de Mod16 que corresponde a evapotranspiración (ET), latent heat flux potencial (PET) y LE Potencial (PLE). La NASA provee datos de superficies de 1km², cada 8 días, mensual o anual. Teniendo información desde el 2000 hasta la actualidad (United States Geological Survey, n.d.). Se debe recalcar que la misma página de la NASA especifica el uso de factores de escala para poder obtener los valores reales de ET.

SDS Name	Description	Units	Data Type	Fill Value	No Data Value	Valid Range	Scale Factor
ET_500m	Total Evapotranspiration	kg/m ² /8day	16-bit signed integer	32761 to 32767	N/A	-32767 to 32700	0.1
LE_500m	Average Latent Heat Flux	J/m ² /day	16-bit signed integer	32761 to 32767	N/A	-32767 to 32700	10000
PET_500m	Total Potential Evapotranspiration	kg/m ² /8day	16-bit signed integer	32761 to 32767	N/A	-32767 to 32700	0.1
PLE_500m	Average Potential Latent Heat Flux	J/m ² /day	16-bit signed integer	32761 to 32767	N/A	-32767 to 32700	10000
ET_QC_500m	Evapotranspiration Quality Control flags	Bit Field	8-bit unsigned integer	255	N/A	0 to 254	N/A

Ilustración 2 Capas Modis16

Landsat 8

Es un satélite estadounidense de observación terrestre lanzado a órbita el 11 de febrero de 2013, estos son de dominio de la USA y USGS, este satélite nos permite obtener hasta 9 bandas espectrales yendo desde los 0.433 μm hasta los 1.390 μm (United States Geological Survey, s.f.). Para el presente trabajo se usó principalmente 3 ondas, siendo las siguientes:

- Band 4 Red (0.64 - 0.67 μm) 30 m
- Band 5 Near-Infrared (0.85 - 0.88 μm) 30 m
- Band 11 TIRS 2 (11.5 - 12.51 μm) 100 m

NDVI

Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es un índice que se usa para cuantificar como ha crecido, desarrollado y la calidad de una vegetación basándose en la intensidad de radiación de bandas electromagnéticas que la vegetación refleja y emite. La ecuación correspondiente es la siguiente

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Donde NIR es la banda espectral cercana al infrarrojo y RED corresponde a la banda espectral del rojo, dependiendo del Landsat se usa, estas bandas corresponden a cierta capa, para este proyecto se usará el Landsat7 (Allen, Pereira, Dirk, & Smith, 2006).

El motivo de usar estas franjas es que existe gran diferencia entre la cantidad de luz roja visible absorbida y la luz infrarroja cercana de una vegetación sana a una enferma, es decir que la luz infrarroja reflejada es menor en una vegetación enferma mientras que la luz roja absorbida es mayor (Allen, Pereira, Dirk, & Smith, 2006).

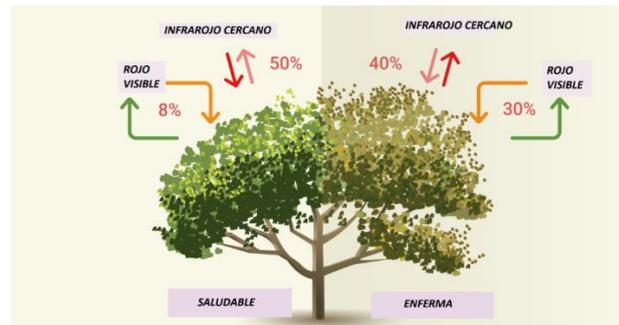


Ilustración 3 NDVI

Estimación de la EF con el método de triángulos

La ET depende de la ecuación de balance de energía, esto se demuestra fácilmente con el ciclo hidrológico, por lo tanto, la ecuación de balance energético es un sistema que considera la vegetación, el suelo y la atmósfera. Es decir, la Radiación Neta (R_n) es la suma de la ET más el flujo de calor transmitido y acumulado (H) más la fuente principal de intercambio de masa y energía (G). La fracción evaporativa como se mencionó antes es un valor que permite cuantificar cuánta energía se usó en el proceso de evaporación. Dada la ecuación de balance energético puedo obtener la fracción evaporativa (EF) en función de la ET, G y radiación neta (R_n), que está dada como;

$$EF = \frac{ET}{R_n} - G.$$

Como el mismo nombre lo dice, es un método que se basa en formar un triángulo en una gráfica de temperatura radiativa de superficie (T_{ir}) vs NDVI. El triángulo se forma por dos límites, el borde húmedo y el borde seco. El borde húmedo es la zona donde la ET tiene su valor máximo, por ende, la temperatura de superficie es mínima y finalmente la EF es igual a 1. Por otro lado, el borde seco es la zona donde la ET es nula, la temperatura de superficie es máxima y por ende la EF es igual a 0.

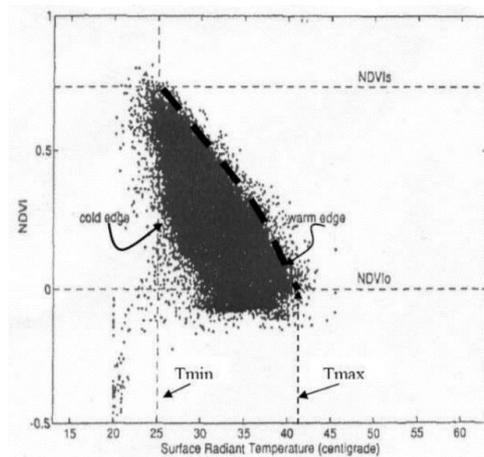


Ilustración 4 Método del Triangulo

Los valores de NDVI varía de -1 a 1, donde los valores cercanos a 0 (-0.1 a 0.1) generalmente representan áreas rocosas, nieve o arena. Valores bajos pero positivos (0.2 a 0.4) son pastizales o arbustos, valores cercanos a 1 selvas tropicales y finalmente valores negativos cercanos al -1 masas de agua.

Toby Carlos en su investigación recomienda normalizar la gráfica anterior mencionada para que ambos ejes varíen desde 0 a 1. Para poder realizar esto primero escalamos la temperatura radiante de superficie (T^*) usando la siguiente formula:

$$T^* = \frac{T_{ir} - T_{min}}{T_{max} - T_{min}}$$

Usando esta escala ahora se interpreta un valor de 0 como la temperatura pertinente a acumulaciones densas de vegetación en suelos saturados y 1 como la temperatura de un suelo (2013).

Ahora convertiremos el eje y de NDVI a fracción vegetal cubierta (Fr) con la siguiente formula

$$Fr = \left(\frac{NDVI - NDVI_o}{NDVI_s - NDVI_o} \right)^2$$

La normalización nos ayuda a obtener un triángulo “universal” cuyas ordenadas no dependen de las condiciones ambiente además de ayudar a evitar falsos datos como pueden ser nubes o zonas de agua.

Para poder obtener la EF se usará una solución geométrica que fue propuesta por Toby Carlos, que tiene la ventaja de no usar más información de la ya usada para formar el triángulo, ahora se debe tomar en cuenta la disponibilidad de humedad en el suelo (Mo) para lo que asumimos que va a variar linealmente entre 0 y 1 entre los límites de bordes húmedos y secos (Carlson, 2013)

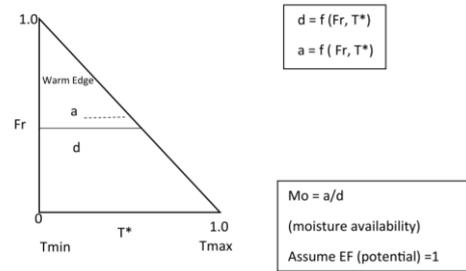


Ilustración 5 Aproximación Geométrica

Como podemos ver en la gráfica, Mo se interpreta como la proporción entre las longitudes a y d , que van variando a lo largo de la gráfica, por lo cual Carlson desarrolló ecuaciones para obtener el Mo usando geometría.

$$T_{Warm\ edge}^* = 1 - Fr$$

$$Mo = 1 - \frac{T_{Pixel}^*}{T_{Warm\ edge}^*}$$

Finalmente, Carlson propone una ecuación para la EF,

$$EF_{total} = EF_{suelo} * (1 - Fr) + EF_{vegetal} * Fr$$

$$EF_{vegetal} = 1$$

$$EF_{suelo} = Mo$$

El método geométrico tiene simplificaciones, pero reduce el cálculo matemático al reducir el problema a solo geometría. El método es consciente que al general los puntos no se forman triángulos perfectos ya que las condiciones de suelo son distintas, por ejemplo se puede generar un caso en el cual no se forme una punta en la parte superior o que se trunque, lo que genera una forma de trapecio, lo que sería un caso donde no existen pixeles con vegetación densa o que para una misma vegetación la temperatura varía por cantidades de agua (Carlson, 2013).

Priestley-Taylor

Este método para encontrar la ET es uno de lo más exactos de los métodos simplificados ya que solo se necesita temperatura y radiación, dado que es un método simplificado el autor agregó a la fórmula un factor de corrección conocido como coeficiente de advección (α_{pt}) que usualmente equivale a 1.26 (Priestly & Taylor, 1972). Por lo cual vamos a tener una ecuación sencilla

$$ET = \alpha_{pt} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (Rn - G)$$

$$EF = \alpha_{pt} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$$

Por ende, los únicos datos faltantes serían la R_n y G . La R_n es fácil de obtener ya que la NASA tiene un repositorio con la R_n de todo el planeta a casi cualquier fecha, por lo cual el siguiente inconveniente es la obtención de G , para lo cual se va a utilizar una aproximación propuesta por (Moran, Jackson, & Raymond, 1989) de la cual solo depende del NDVI y R_n .

$$G = 0.583 * e^{-2.13*NDVI} * R_n$$

Con todo lo mencionado hasta ahora ya se puede obtener la ET utilizando únicamente información satelital.

DESARROLLO DEL TEMA

Para la presente investigación se usará dos estaciones del INAMHI para validar los datos obtenidos, siendo la primera la estación Macas San Isidro – PNS, con código de identificación M1040, latitud -2.229800 y altitud 1110.00 metros, estos valores son importantes para la obtención de la ET por el método Penman-Monteith. Para tener más datos de control se decidió analizar dos fechas separadas entre sí, siendo la primera fecha el 5 de octubre de 2019 y la segunda el 2 de mayo de 2018. A continuación, se presentará una tabla resumen con los datos obtenidos del INAMHI.

Tabla 1 Datos meteorológicos Macas

FECHA	HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE % MAX	HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE % MIN	RADIACION SOLAR GLOBAL W/m ² PROM	RADIACION SOLAR REFLEJADA W/m ² PROM	TEMPERATURA AIRE °C MIN	TEMPERATURA AIRE °C MAX	VIENTO VELOCIDAD m/s INST
sábado, 5 de octubre de 2019	88.875	79.750	225.123	33.035	19.950	21.538	1.733
miércoles, 2 de mayo de 2018	96.917	90.875	149.805	19.019	19.713	20.683	1.146

Los datos proporcionados se encuentran en $\left[\frac{w}{m^2}\right]$ pero se deben de trabajar en $\left[\frac{Mj}{m^2 \text{ día}}\right]$ por ende, se va a usar los factores de conversión sacados de la FAO, que nos dice que $1 \frac{w}{m^2} = 0.0864 \frac{Mj}{m^2 \text{ día}}$ de esta manera convertimos la radiación solar global a unidades coherentes con la ecuación. Para obtener los resultados se utiliza un Excel obtenido de Biometereology Group dándonos los siguientes resultados en $\left[\frac{mm}{día}\right]$.

Tabla 2 Evapotranspiración Macas

FECHA	EVAPOTRANSPIRACIÓN $\left[\frac{mm}{día}\right]$
sábado, 5 de octubre de 2019	3.37
miércoles, 2 de mayo de 2018	2.23

Ahora se va a obtener la ET por métodos satelitales. Por lo cual primero se usará la página propia de la USGS¹ para la obtención de imágenes. Se genera un polígono en la zona deseada y se coloca las fechas deseadas que se mencionaron anteriormente, en la parte de Data Set escogeremos dos tipos de juegos de banda, el primero va a ser Landsat – Landsat Collection 1 Level1 – Landsat 8 OLI/TIRS C1 Leve 1 y la segunda NASA LPDAAC Collection – Modis Net Evapotranspiration V6 – MYD16A2.

¹ <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Dentro de la pestaña de *Additional Criteria* se puede escoger la cantidad de nubes en la imagen, es importante escoger siempre la que tenga la menor cantidad de nubes y de la misma manera escoger imágenes que entren en la categoría de nadir, ya que son las que fueron tomadas estando perpendicular a la zona de estudio.

Una vez descargadas las bandas correspondientes se va a usar el programa QGis versión 3.10.1 y se debe recalcar el uso de dos Plugins que facilitan el desarrollo del tema, siendo el primero *Semi-Automatic Classification Plugin* que nos permitirá pre procesar las bandas de Landsat para obtener la temperatura del suelo y poder recortar los rasters a la forma que uno desee. El segundo plugin usado fue *RasterDataPlottin* que nos permite poder graficar dos rasters y de esta manera exportar a un cuadro en Excel.

Una vez procesadas las bandas, pasamos a crear un raster virtual para poder visualizar las nubes y poder descartarlas de la capa final con la que se trabajará.

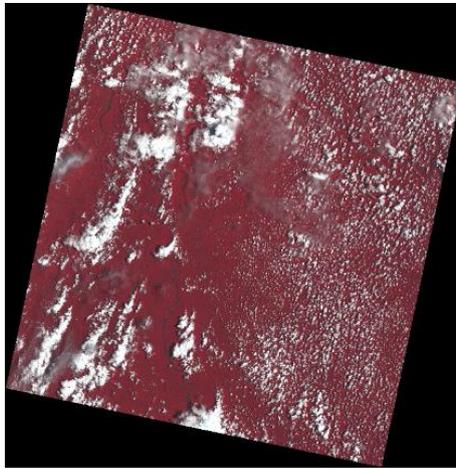


Ilustración 6 Visualización Nubes

De esta manera se selecciona solo un área pequeña de estudio creando un shape file y cortando todas las bandas a ese tamaño. Como se mencionó anteriormente solo se requiere ciertas bandas, basándose en la información del satélite solo se va a requerir la banda 5, la 4 y la banda 10. La banda 5 representa a la luz NIR, la 4 a la onda RED y la banda 10 a la temperatura ya en grados Celsius.

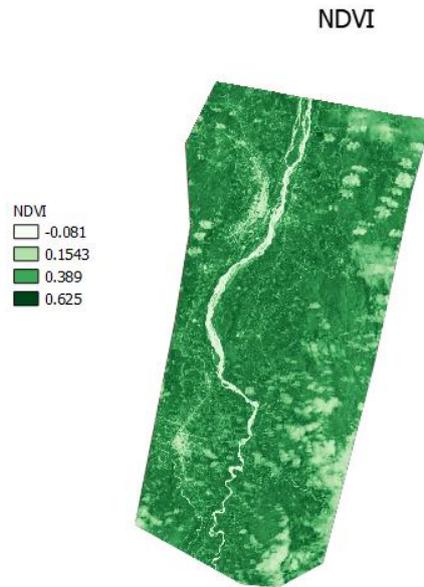


Ilustración 7 NDVI Macas

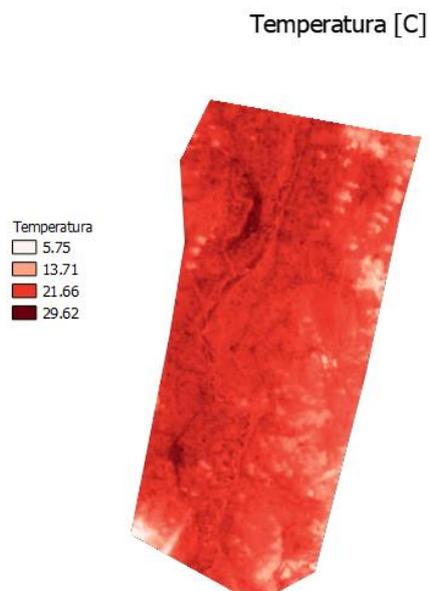


Ilustración 8 Temperatura

De esta manera podemos obtener los valores de NDVI y Temperatura mínimos y máximos. Cabe recalcar que hay valores que representan nubes, por ejemplo, una temperatura de 5 grados Celsius representan nubes mientras que la de 29.6 representan ciudades. Para poder limpiar lo más posible las gráficas se la normaliza con Fr y T^* anteriormente mencionados.

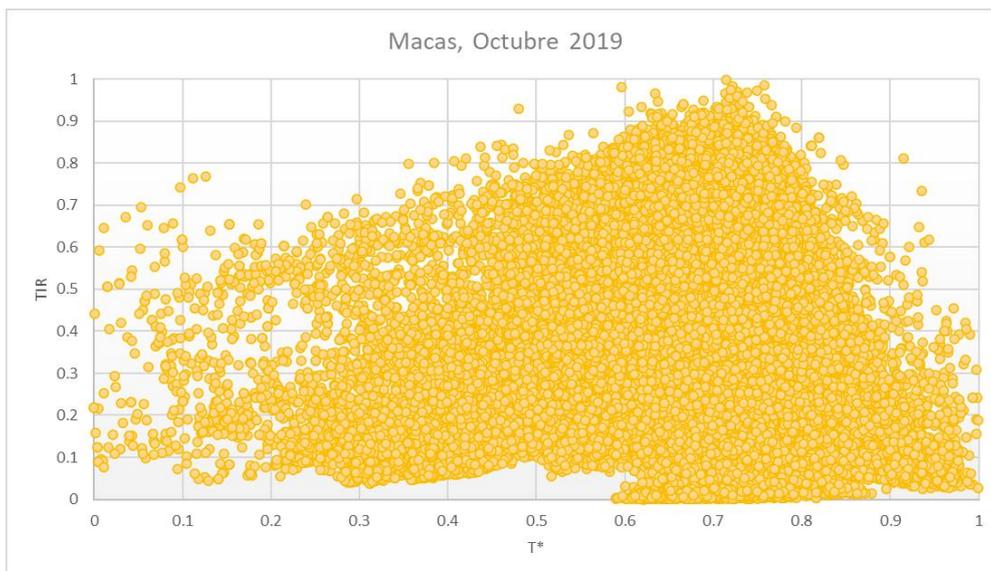


Ilustración 9 Método del Triangulo

Como se puede ver en la ilustración 8, si se forma un triángulo como se menciona en la teoría, pero también se debe recalcar que existen varios puntos que representan nubes, y esos son los que se encuentran dispersos hacia el borde húmedo, esto no modifica mucho los cálculos, ya que se trabaja directamente con el borde seco que si se encuentra claramente definido. A continuación, se debe obtener la R_n , para la cual se va a usar información de la NASA obtenida de la NEO², se usa todas las ecuaciones nombradas en la teoría y se obtiene la ET en $\frac{Mj}{m^2 día}$ por lo cual se le multiplica por 0.408 para dejarlo en $\frac{mm}{día}$ y poder comprar con el valor obtenido.

² https://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=CERES_NETFLUX_M

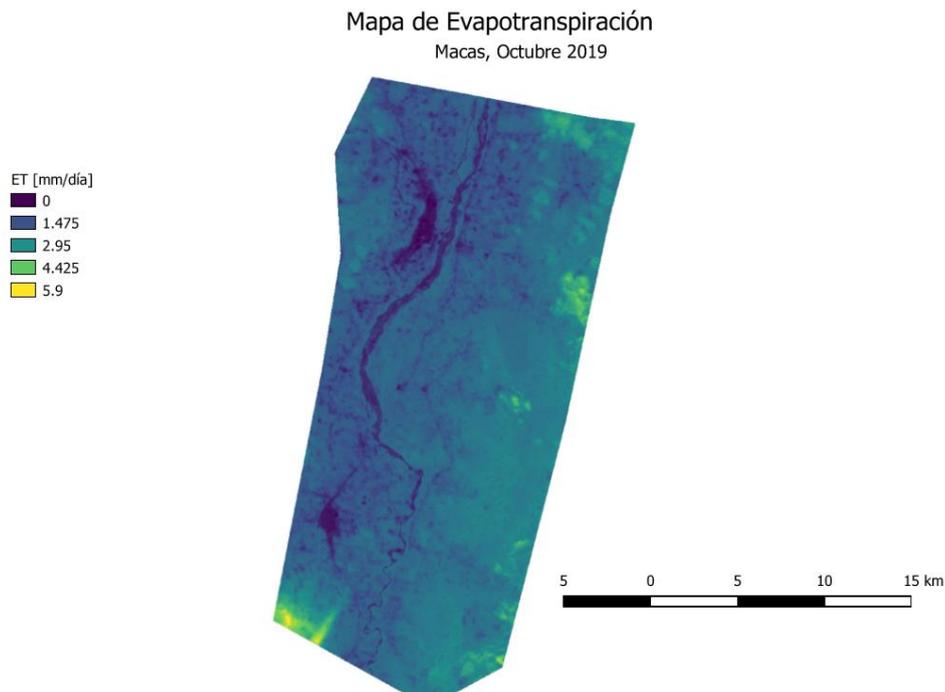


Ilustración 10 Evapotranspiración

Usando las coordenadas geográficas de la estación se la ubica dentro del mapa y se obtiene que tiene una ET de $2.29 \left[\frac{mm}{día} \right]$

Ahora se va a obtener la ET usando el subproducto de la NASA, es decir el MODIS16 en específico el MYD16A2 v006, donde la primera banda corresponde a un promedio de 8 días de la ET, por lo que se dividió la capa para 8 para obtener el valor en función de 1 día y aparte se multiplicó por el factor de escala discutido en la primera parte del proyecto. Obteniendo una ET de 392 [mm/día]

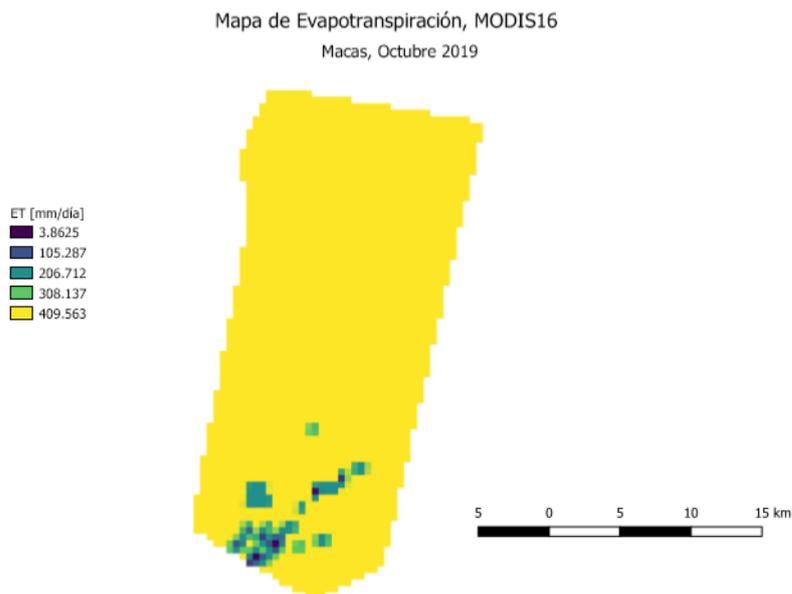


Ilustración 11 Evapotranspiración mediante MODIS16

Una vez obtenida la imagen se midió el tamaño del píxel para verificar si coincide con el tamaño del método del triángulo, esto es importante ya que el programa Qgis nos arroja valores en función del píxel y estos píxeles a su vez representan áreas reales. Una vez analizadas las imágenes se obtuvo que para el MODIS16 cada píxel tenía un tamaño de 460 x 460 metros mientras que para el método del triángulo median 30 x 30 metros, por lo que no se puede hacer una comparación precisa, ya que el método del triángulo nos da la ET para 900 m² mientras que MODIS16 nos da para 211600 m², por lo que para la comparación se decidió hacer una reescalación del método del triángulo.

Haciendo una pequeña división se obtuvo que dentro de los 211600 m² entran 235 píxeles de 30 x 30m, por lo que se tiene que obtener lo más preciso posible el valor de ET de esos 235 píxeles y sumarlo, esta debería ser iguales o parecidas.

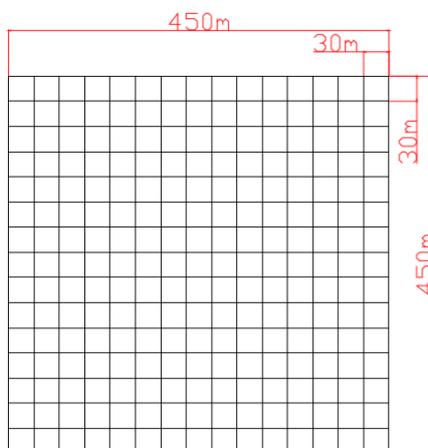


Ilustración 12 Representación de Píxel

Para ahorrar tiempo, se usó una herramienta de Qgis llamada *puntos aleatorios en los límites de la capa*, que nos permite crear puntos al azar en un área deseada, después se usó el plugin mencionado anteriormente para extraer los valores de una capa en esos puntos obtenidos para finalmente sumar cada valor para obtener finalmente 382.063 [mm/día].

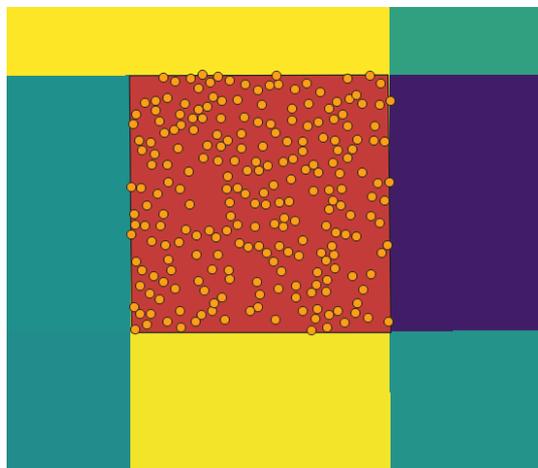


Ilustración 13 Comparativa Píxel Modis vs Píxeles del Método del triangulo

Se repitió el mismo proceso para la misma estación de Macas, pero fecha mayo del 2018, obteniendo el siguiente mapa de ET. Ubicando la estación en el mapa se obtuvo el valor de 1.92 [mm/día]

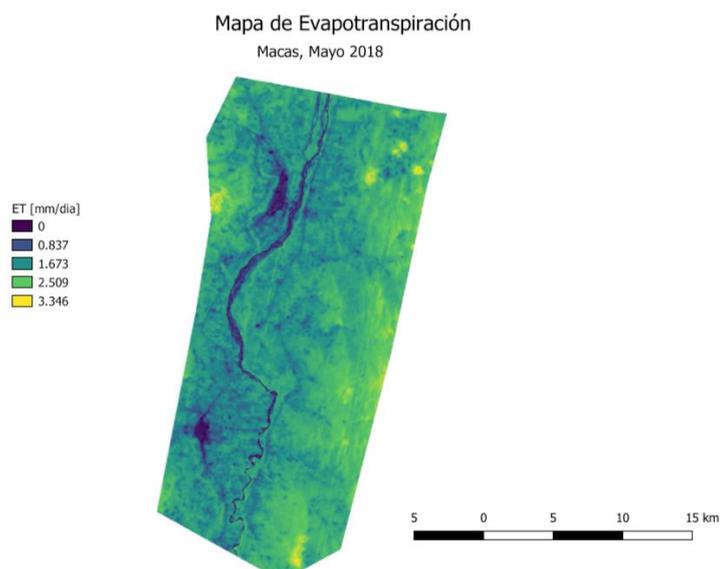


Ilustración 14 Evapotranspiración

De la misma manera se obtuvo por medio del MODIS 16, una ET de 409.563 [mm/día]. Por medio de la re-escalación en cambio se obtuvo 415.580 [mm/día]

Mapa de Evapotranspiración, MODIS16
Macas, Mayo 2018

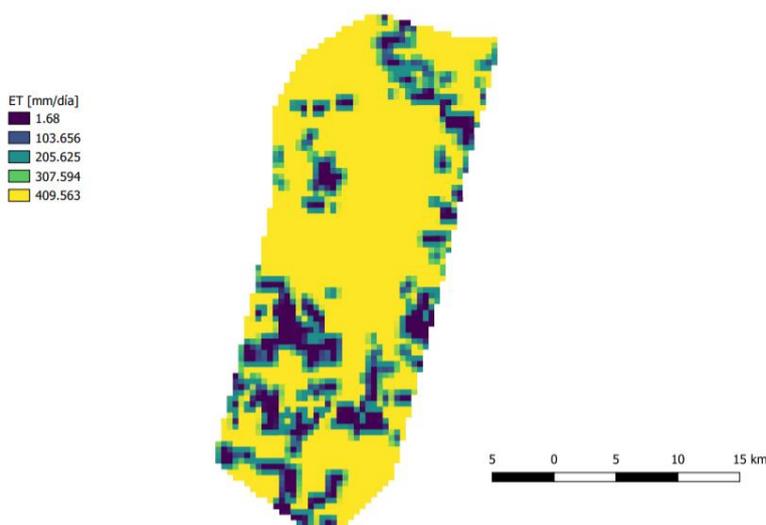


Ilustración 15 Evapotranspiración Modis16

Ahora se va a estudiar la estación la estación Guamaní - Antisana, con código de identificación M5125, latitud -0.503778 y altitud 4148.00 metros. Los datos de igual manera se obtuvieron del INAMHI y se mostrarán a continuación

Tabla 3 Datos meteorológicos Antisana

FECHA	HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE % MAX	HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE % MIN	RADIACION SOLAR GLOBAL W/m ² PROM	RADIACION SOLAR REFLEJADA W/m ² PROM	TEMPERATURA AIRE °C MIN	TEMPERATURA AIRE °C MAX	VIENTO VELOCIDAD m/s INST
viernes, 7 de septiembre de 2018	68.250	80.042	244.375	36.583	1.004	3.183	9.171
sábado, 13 de abril de 2019	92.917	98.667	402.546	40.586	3.900	5.204	8.692

Usando los mismos factores de conversión se obtuvo las siguientes ET:

Tabla 4 Evapotranspiración Antisana

FECHA	EVAPOTRANSPIRACIÓN $\frac{mm}{dia}$
Viernes, 7 de septiembre de 2018	1.44
Sábado, 13 de abril de 2019	1.64

Se repite el mismo proceso, primero detecto la cantidad de nubes y recorto una zona de estudio deseada.

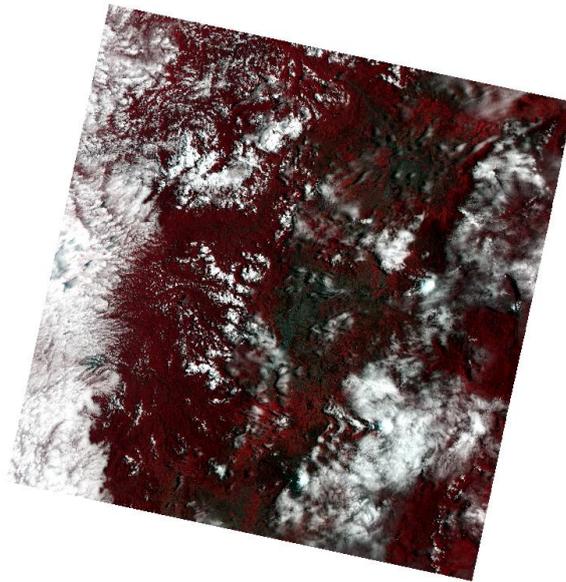


Ilustración 16 Visualización nubes

Después obtengo el NDVI y temperatura de la zona, usando la misma metodología, de igual manera se recortó la imagen original a una donde se pueda eliminar la mayor cantidad de nubes y tener zonas descubiertas para poder obtener los valores lo más preciso posible.

NDVI

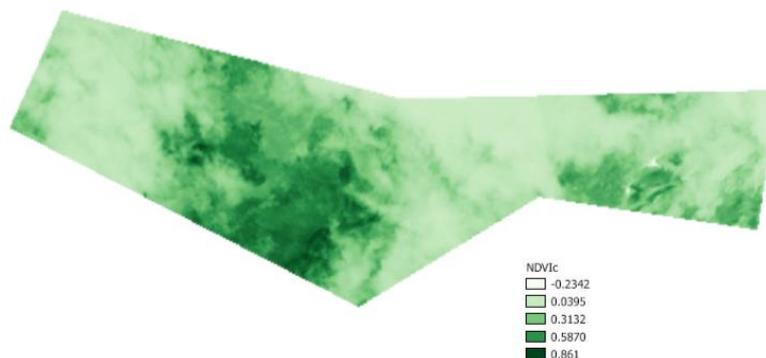


Ilustración 17 NDVI

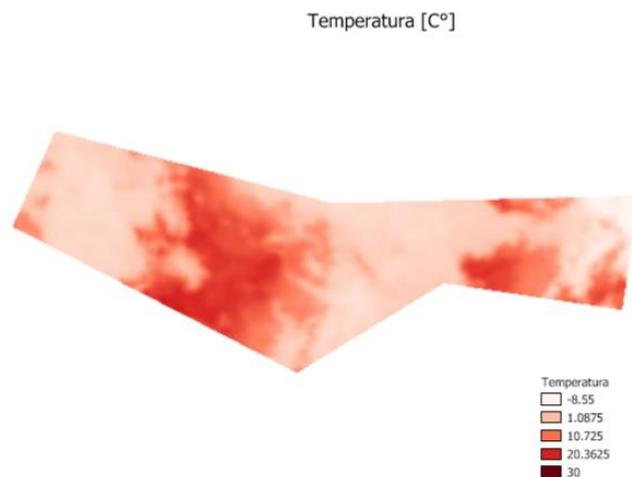


Ilustración 18 Temperatura

Una vez obtenidos estos valores, se pasa a obtener el triángulo de T^* vs Fr .

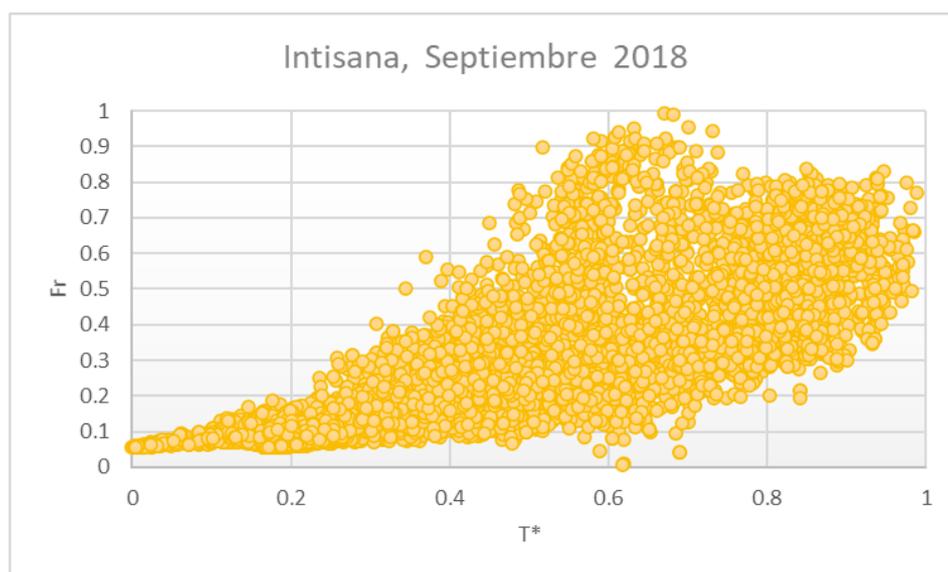


Ilustración 19 Método del triángulo

En este caso no se puede visualizar el triángulo y esto se debe a que en la sección estudiada había una gran cantidad de nubes. Esto no modifica el cálculo ya que todos los procesos trabajan a nivel de píxel, es decir que donde haya nubes va a tener un NDVI correspondiente a lugares húmedos y temperaturas bajas. Mientras que, zonas sin nubes vamos a tener valores correspondientes al suelo y cobertura vegetal correspondiente. Esto se puede ver en la gráfica de ET donde obtenemos valores normales correspondientes a suelos vegetales y también evapotranspiraciones de 0 que corresponden a masas de agua y nubes.

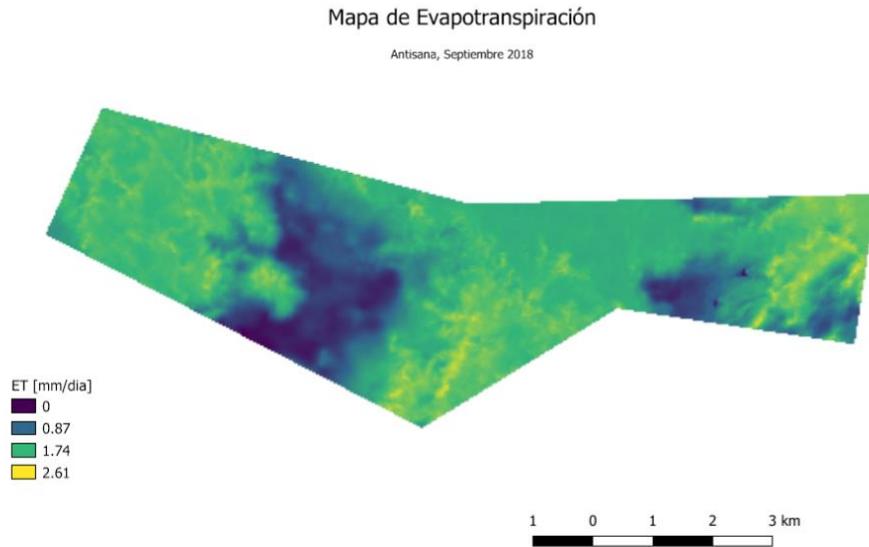


Ilustración 20 Evapotranspiración

Utilizando las coordenadas geográficas de la estación se obtuvo que la ET era de 1.04 [mm/día], ahora se va a obtener la ET utilizando el MODIS16 y después re escalar el método del triángulo para verificar si los datos obtenidos tienen coherencia.

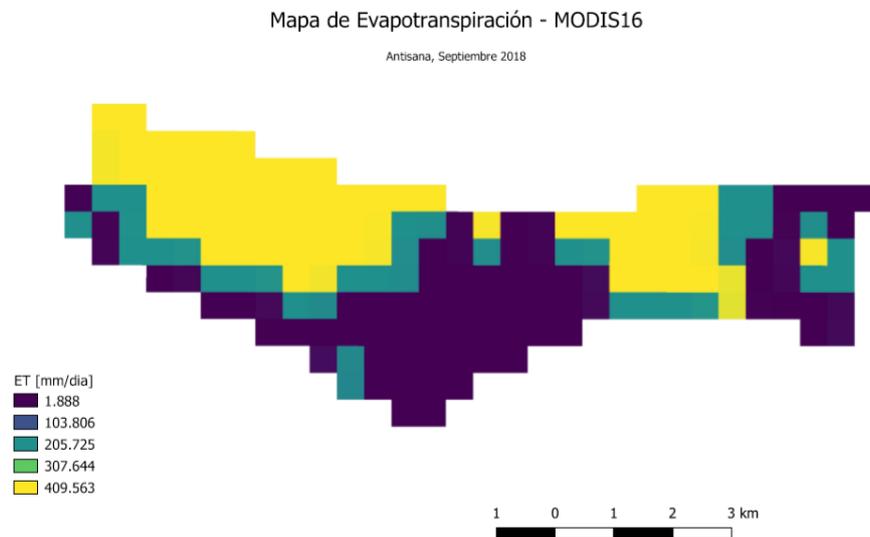


Ilustración 21 Evapotranspiración MODIS16

De este mapa se extrajo el valor de ET de 402.688 [mm/día] mientras que por medio de la re-escalación se obtuvo para la misma zona un valor de 392.045 [mm/día]. El proceso es igual para la otra fecha, por lo que solo se va a mostrar resultados finales.

Mapa de Evapotranspiración

Antisana, Agosto 2019

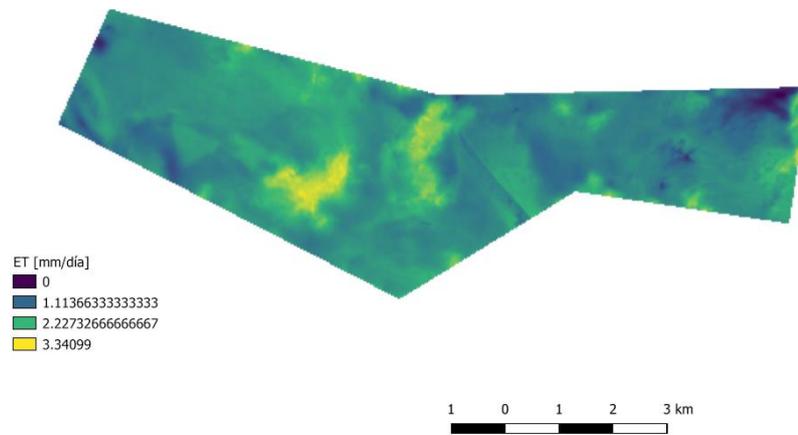


Ilustración 22 Evapotranspiración

Del método del triángulo se obtuvo una ET de 1.580 [mm/día], este fue uno de los valores más cercanos al método de Penman y esto se discutirá cuando veamos la gráfica del método del triángulo.

Mapa de Evapotranspiración - MODIS16

Antisana, Agosto 2019

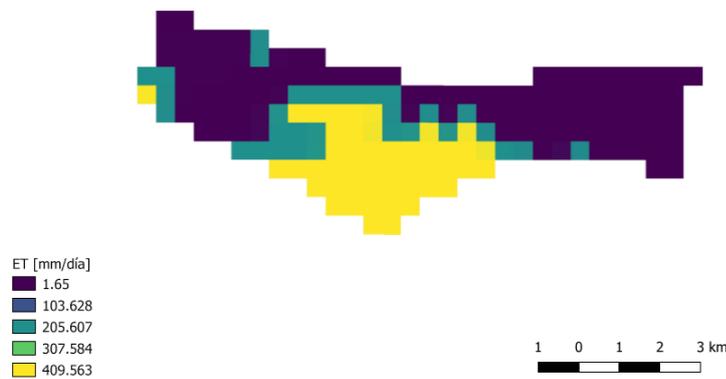


Ilustración 23 Evapotranspiración MODIS16

Del método de MODIS16 se obtuvo 405.113 [mm/día] mientras que re escalando el método del triángulo arrojó un valor de 312.129 [mm/día].

Finalmente se adjunta una tabla comparativa entre todos los valores obtenidos para las 2 estaciones mencionadas, con estos datos se realizó una regresión lineal entre la ET del método Penman que servirá como dato de control y la evapotranspiración del método del triángulo; para poder obtener el coeficiente de determinación R^2 , que en el caso del presente estudio dio un valor de $R^2= 0.8398$.

Tabla 5 Cuadro Comparativo

FECHA	ET Penman mm/día	Et Qgis mm/día	Et Qgis Escalada [mm/día]	Et Modis [mm/día]	
sábado, 5 de octubre de 2019	3.370	2.290	382.063	397.751	Macas
miércoles, 2 de mayo de 2018	2.230	1.920	415.580	409.563	
viernes, 7 de septiembre de 2018	1.44	1.040	381.136	402.688	Antsiana
sábado, 13 de abril de 2019	1.64	1.580	392.045	405.113	

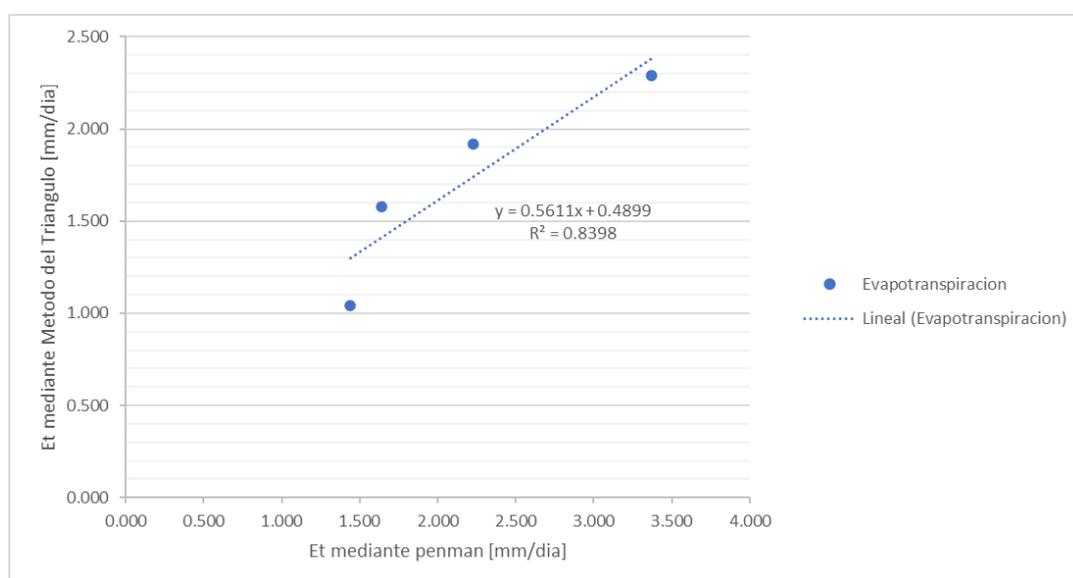


Ilustración 24 Regresión Lineal método del Triangulo y Penman

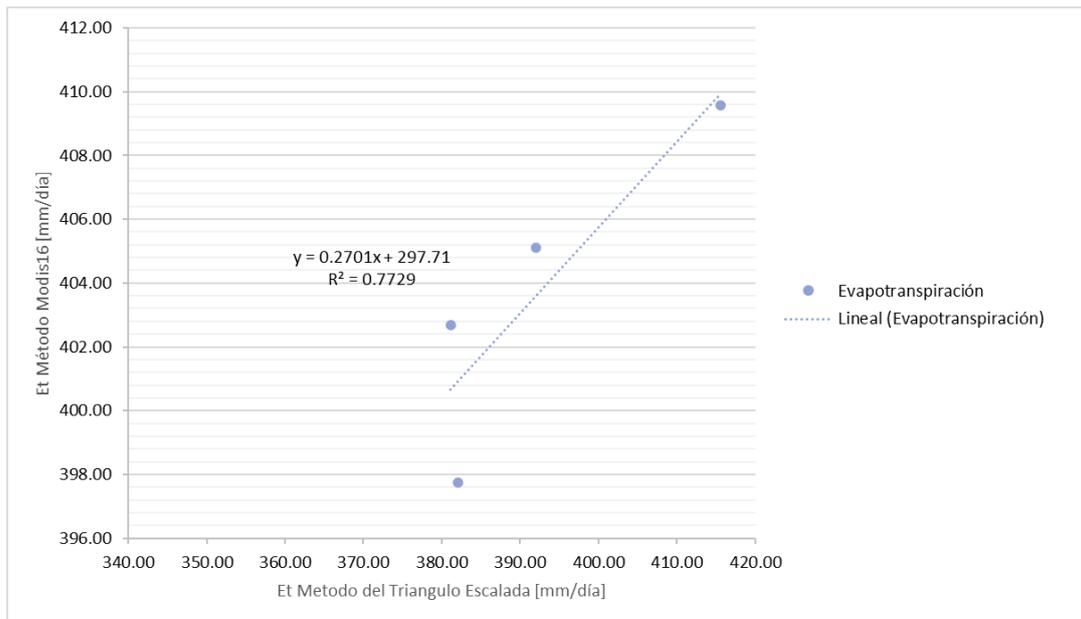


Ilustración 24 Regresión Lineal Triangulo escalada y Modis16

CONCLUSIONES

- Se llega a la conclusión que los dos métodos planteados pueden ser válidos para la obtención de evapotranspiración sin la necesidad de datos tomados por estaciones meteorológicas ya que se obtuvo un coeficiente de determinación aceptable.
- El uso de cada método dependerá de la zona de estudio, mientras el método del triángulo refleja una evapotranspiración en un área de 900 m², el método MODIS16 calcula para un área de 211600 m².
- El mayor problema para los métodos satelitales es la presencia de nubes, esto se debe a la variedad climática del Ecuador que en zonas montañosas es donde mayor problema genera, para esto la NASA cuenta con otros siete satélites tipo Landsat que se encuentran tomando datos constantemente, por lo tanto, se cuenta con una gran base de datos para encontrar el momento en el cual la zona de estudio se encuentre despejada.
- Durante la investigación un paso importante fue la obtención de datos de control y para esto se contó con el INAMHI³ ya que es la entidad encargada de la generación y difusión de información hidrológica y meteorológica, pero se encontró una falta de datos considerable, esto se debe a que las estaciones entran en mantenimiento, se dañan o simplemente no cuentan con el equipo necesario, por lo que el presente trabajo propone una solución para esa información faltante.

³ <http://186.42.174.236/InamhiEmas/#>

RECOMENDACIONES

- Se recomienda complementar la investigación con otro método satelital, por ejemplo, el *método two-source energy Budget* (TSEB).
- Así mismo se recomienda el uso de un lisímetro para obtener mejores datos de control, debido a que la ecuación de Penman es empírica.
- De igual manera sería de gran interés estudiar un cultivo a lo largo de un periodo de tiempo para detectar como cambia la evapotranspiración en función de las estaciones y épocas del año. Se debe considerar el uso de imágenes *nadir*, es decir imágenes que han sido tomadas perpendiculares al plano deseado, para evitar problemas por ángulos de reflectancia.
- Para obtener los resultados lo más preciso posible se debería hacer un uso combinado entre datos satelitales y de una estación meteorológica. La radiación neta (R_n) es un componente muy importante en la ET, pero al obtener las imágenes satelitales se usaron unas de tamaño global, por lo no se puede ser muy preciso en una R_n local, más bien se maneja un dato por todo el Ecuador⁴.
- Finalmente se debería considerar la creación de un plug-in que automatice el proceso descrito en esta investigación, todas las imágenes usadas son de libre acceso por lo que se podría automatizar su descarga y procesamiento, esto sería de gran ayuda para poder obtener la ET de cultivos y evitar perdidas excedentes de agua, así mismo se podría usar para obras de almacenamiento, conducción, distribución y drenaje.

⁴ https://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=CERES_NETFLUX_M&year=2018

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R., Pereira, L. S., Dirk, R., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma : Food and Agriculture Organization.
- Carlson, T. N. (2013). Triangle Models and Misconceptions. *International Journal of Remote Sensing Applications*.
- Marini, F., Santamaría, M., & Oricchio, P. (2016). Estimación de evapotranspiración real (ETR) y de evapotranspiración potencial (ETP) en el sudoeste bonaerense (Argentina) a partir de imágenes MODIS. *Revista de Teledetección*.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2016). Guía metodológica para la elaboración de balances hídricos superficiales. Bolivia.
- Moran, S., Jackson, R., & Raymond, L. (1989). *Mapping Surface Energy Balance Components by Combining Landsat Thematic Mapper and Ground-Based Meteorological Data*. Obtenido de <https://pubag.nal.usda.gov/download/34035/PDF>
- Ordoñez, J. (2011). *CARTILLA TÉCNICA: BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL* . Lima: Sociedad Geográfica de Lima .
- Priestly, C., & Taylor, J. (1972). On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Division of Atmospheric Physics*.
- Sánchez, J., Caselles, V., Niclós, R., Coll, C., & Valor, E. (2005). Cálculo de la evapotranspiración real diaria en la zona norte de Finlandia empleando técnicas de teledetección. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 278-300.
- Shuttleworth, W. J., & R. J. Gurney, A. Y.-s. (1989). The variation in energy partition at surface flux sites.
- Tomás, A., Nieto, H., Guzinski, R., Sandholt, I., & Berliner, P. (2013). *Aplicaciones de la teledetección en hidrología: estimación de la evapotranspiración mediante el método del triángulo*. Alcalá de Henares: IMDEA Water Foundation.
- United States Geological Survey. (s.f.). Obtenido de USGS: https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-8?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con
- United States Geological Survey. (s.f.). *U.S. Geological Survey*. Obtenido de MOD16A2 v006: <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod16a2v006/>