



# MAPA DE ZONAS AGROCLIMÁTICAS DE LA CUENCA DEL RÍO SAN MIGUEL, SONORA, MÉXICO

MARÍA DEL CARMEN HERAS SÁNCHEZ\*, JOSÉ ALFREDO OCHOA GRANILLO, RAÚL GILBERTO HAZAS IZQUIERDO

*Se propone una metodología para generar mapas de zonas agroclimáticas para la cuenca del Río San Miguel, Sonora, México, utilizando datos disponibles de temperatura, precipitación y elevaciones del terreno, a partir de los cuales se calcularon modelos de evapotranspiración, humedad disponible y la relación entre los diferentes parámetros climáticos, considerando la elevación como el factor determinante en el comportamiento de las variables climáticas. Los mapas generados pueden ser utilizados como una aproximación inicial con propósitos de planeación regional.*

M.C. María del Carmen Heras Sánchez  
Departamento de Matemáticas,  
Universidad de Sonora  
Correo: carmen@acarus.uson.mx

M.C. José Alfredo Ochoa Granillo  
Departamento de Geología,  
Universidad de Sonora  
Correo: ochoa@correo.geologia.uson.mx  
M.C. Raúl Gilberto Hazas Izquierdo  
Departamento de Investigación en Física,  
Universidad de Sonora  
Correo: rhazas@difus.uson.mx

\*Autor para correspondencia: María del Carmen Heras Sánchez  
Correo electrónico: carmen@acarus.uson.mx  
Recibido: 26 de Septiembre de 2013  
Aceptado: 14 de Noviembre de 2013  
ISSN: 2007-4530

## INTRODUCCIÓN

La cuenca del Río San Miguel, Sonora, México, se localiza en la zona de transición entre las regiones fisiográficas Llanura Sonorense y la Sierra Madre Occidental. Debido a su ubicación, desde el año 2004, ha sido el sitio más relevante del noroeste de México para estudios del Monzón de Norteamérica, fenómeno climatológico que provee más del 70% del agua en la región.

La información requerida para los mencionados estudios se encuentra en una Base de Datos Geográfica (BDG), que integra datos de diversas fuentes, con el propósito de analizar y representar gráficamente, fenómenos climatológicos y fisiográficos como precipitación, temperatura, suelos, topografía, uso del suelo, geología, entre otros [1]. Se agregaron también imágenes de satélite Landsat 4, información tabular, gráficas, estadísticas e información vectorial espacialmente referenciada al sitio de estudio. La conformación de la BDG requirió rigurosos procesos de validación, debido a que las estructuras de datos representan valores continuos en sistemas discretos (como los computacionales), lo que hizo necesario realizar estudios de referenciación y validación geográfica, con lo que se lograron modelos matemáticos y gráficos que representan con precisión los fenómenos físicos de interés en el sitio de estudio.

Crear un mapa de zonas agroclimáticas para la cuenca del Río San Miguel, tiene como finalidad evaluar las zonas con el clima idóneo para varias alternativas de agricultura y reconocer la mayoría de los aspectos climáticos que afectan al crecimiento de las plantas, como son la humedad disponible, la temperatura, la precipitación y la evapotranspiración. El mapa de zonas agroclimáticas está compuesto por una serie de píxeles con las características propias de distintas zonas agroclimáticas, según los criterios establecidos con base en las elevaciones del terreno, la precipitación, la temperatura y las elevaciones de las 5 estaciones climatológicas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) ubicadas en el área de estudio.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### **Ubicación geográfica del área de estudio**

La cuenca hidrográfica del Río San Miguel se localiza geográficamente en la parte centro-norte del Estado de Sonora, México (Figura 1), siendo los municipios de Cucurpe, Opodepe, Rayón y San Miguel de Horcasitas, los que cubren la mayor extensión territorial de la cuenca con el 36.5%, 20.9%, 15.5% y 7.6%, respectivamente, según la división municipal empleada por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (Figura 2). El área del polígono en el cual se encuentra enmarcada la cuenca en mención, tiene una extensión de 17,378.25 km<sup>2</sup> y un perímetro de 546.11 km. Las coordenadas UTM de los puntos que definen al polígono son las siguientes: a(482805,3408152), b(583812,3408152), c(482805,3236102) y d(583812,3236102) [1].

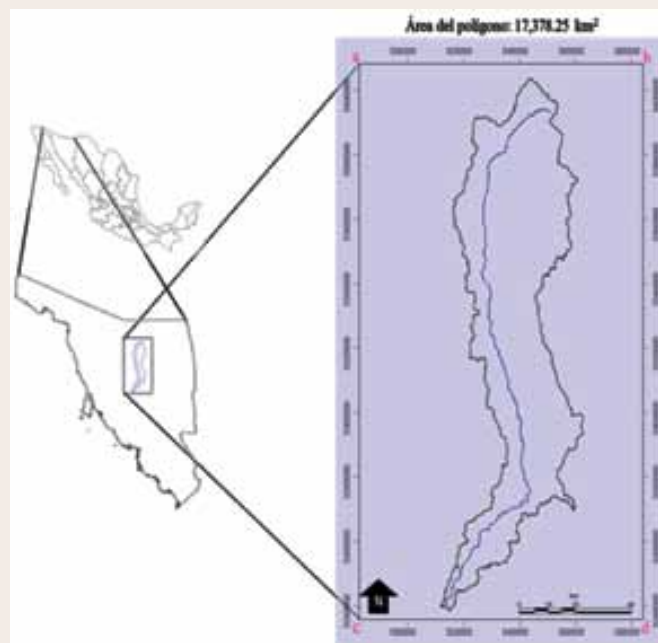


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio.

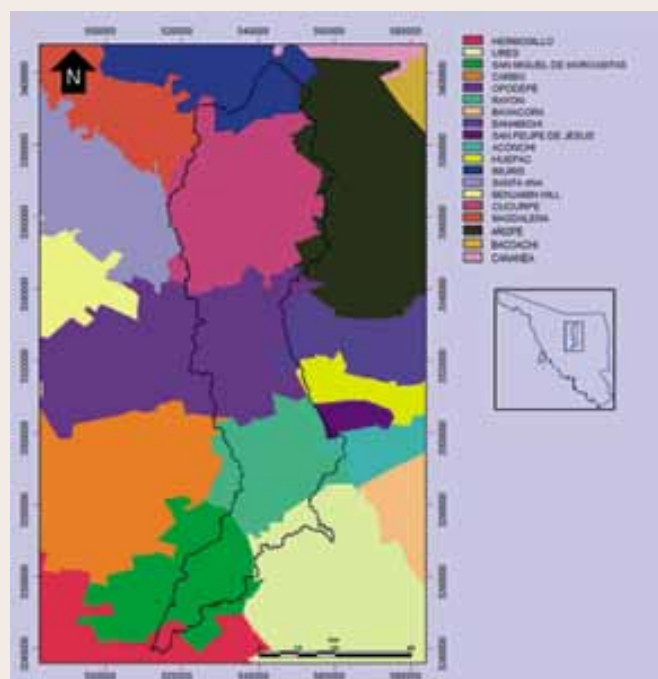


Figura 2. Municipios que cubren el área de estudio.

Es importante mencionar que la cuenca hidrográfica del Río San Miguel queda comprendida dentro de la Región Hidrológica RH-9, Sonora Sur y se encuentra clasificada como una subcuenca de la cuenca Río Sonora. De acuerdo con la clasificación hidrológica que se dispone para esta zona, no se tiene información sobre subregiones hidrológicas formales.



### Base de Datos Geográfica (BDG)

Como parte fundamental de la BDG se cuenta con los Modelos Digitales de Elevación (MDE) del INEGI, los cuales fueron generados de la cartografía topográfica escala 1:50,000 y a partir de los cuales, se delineó la cuenca hidrográfica del Río San Miguel. Como resultados elementales se definió el polígono del área de estudio y se obtuvieron parámetros fisiográficos tanto de la cuenca como del cauce principal; además se generaron una serie de productos cartográficos digitales que contienen información temática como geología, hidrología, uso del suelo, entre otros, imprescindibles para realizar estudios hidrológicos y modelos tridimensionales.

El programa informático utilizado para generar las simulaciones y las modelaciones es IDRISI versión 16 y el origen de la mayoría de los datos son tanto INEGI, como los registros de las estaciones de observación de datos climatológicos de la Universidad de Sonora y de la CONAGUA, las cuales se encuentran distribuidas geográficamente sobre la cuenca del Río San Miguel.

Todos los procesos de manipulación de la información geográfica y climatológica se basan en la metodología creada para esos fines, lo cual brinda la confianza de que los datos han sido validados y analizados.

### Procesos para generar el modelo

Para resolver el modelo ha sido necesario emplear el álgebra de mapas, que es una técnica que se emplea

cuando se usan imágenes en formato ráster, como si fueran variables para llevar a cabo operaciones aritméticas con ellas, de tal manera que es posible realizar sumas, restas, y resolver ecuaciones que involucran a una o un grupo de imágenes, las cuales deben tener las mismas referencias geográficas [1].

En relación a las zonas agroclimáticas fueron definidas por una combinación específica de zonas de temperatura y zonas de disponibilidad de humedad [2], de tal manera que se debió generar las imágenes con valores continuos que representara los mencionados fenómenos, tomando como base los registros de Temperatura Promedio Anual (TPA), Precipitación Promedio Anual (PPA), el MDE y las elevaciones de las estaciones climatológicas de la CONAGUA, además de la Evapotranspiración Real, calculada con el método de Turc definido con la siguiente expresión:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{IT^2}}}$$

Donde *ETR* es la evapotranspiración real expresada en mm/año; *P* es la precipitación media anual dada en mm/año; *IT* es un indicador que depende directamente de la temperatura:  $IT = 300 + 25T + 0.05T^3$ , donde *T* es la temperatura media anual [3] (Tabla 1; Figura 3).

Tabla 1. Datos de estaciones climatológicas de la CONAGUA (1994-1997).

No. Estación Climatológica	Nombre de la estación Climatológica	Longitud	Latitud	UTM WGS84/12N	Altitud (msnm)	TPA (°C)	47PPA (mm)	ETR (mm)
1	El Cajón	110° 41' 11"	29° 28' 20"	530406,3260347	390	21.85	407.89	410.17
2	Rayón	110° 34' 14"	29° 42' 38"	541539,3286790	560	22.26	471.82	468.99
3	Meresichic	110° 40' 30"	30° 01' 50"	531336,3322216	700	18.97	494.37	472.14
4	Cucurpe	110° 42' 22"	30° 19' 50"	528251,3355451	860	19.5	519.42	494.99
5	Rancho La Aquituna	110° 42' 15"	30° 28' 22"	528396,3371212	950	20.3	438	432.46

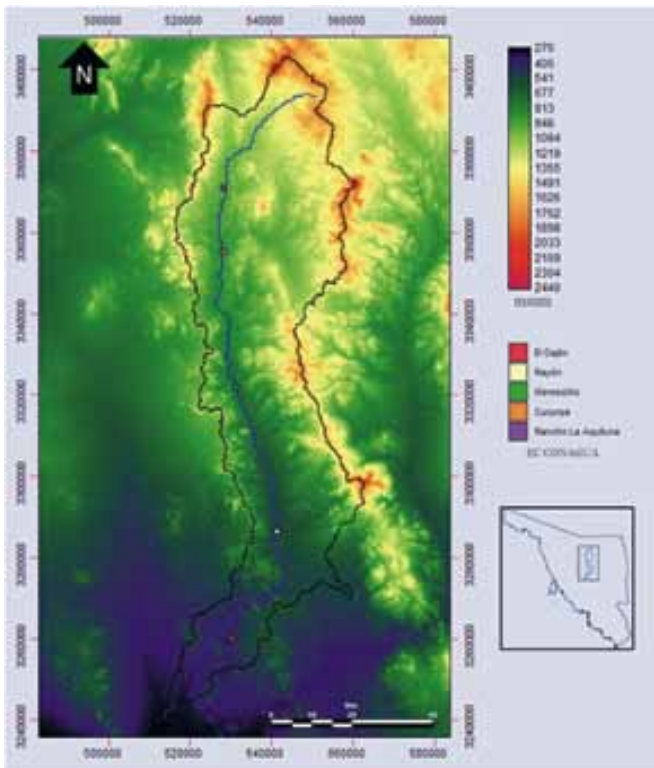


Figura 3. Modelo Digital de Elevación de la cuenca del Río San Miguel, INEGI.

En la figura 4 se muestra la metodología empleada para generar los modelos y realizar tanto los cálculos entre las imágenes como la clasificación de las mismas, los cuales dan como resultado el mapa de zonas agroclimáticas. En el diagrama los rectángulos indican procesos y los romboides indican datos, los cuales pueden ser imágenes en formato ráster o datos alfanuméricos.

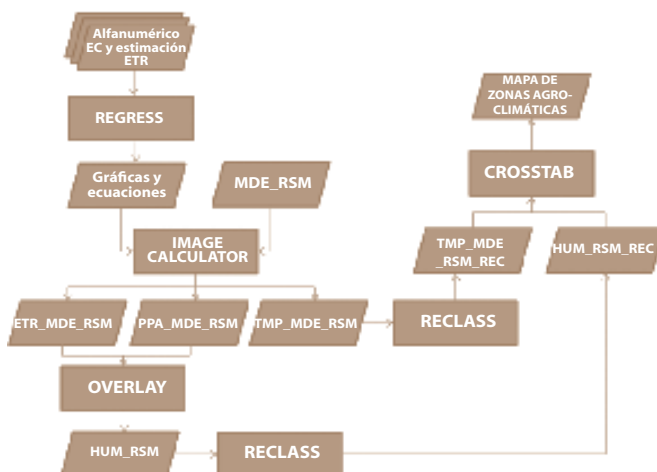


Figura 4. Diagrama de la metodología para generar el mapa de zonas agroclimáticas.



## RESULTADOS

Para generar el modelo de zonas agroclimáticas no se están considerando los factores de intensidad y duración de la precipitación, ni se contabilizan las temporadas de sequía y su variación anual, por la razón de que no se cuenta con los datos, de tal manera que, sólo se puede considerar como una aproximación que provee información básica con propósitos de planeación regional.

### Modelo de temperatura (T) de la cuenca del Río San Miguel

En la tabla 1 se puede observar una relación entre la TPA y la elevación de las estaciones climatológicas (EC), en la mayoría de los casos, a las elevaciones más altas, corresponden las temperaturas más bajas y a las elevaciones más bajas, corresponden las temperaturas más altas. Para conocer con exactitud las correspondencias entre las elevaciones y las temperaturas se aplica un análisis de regresión [4], el cual es un método matemático que modela la relación entre una variable independiente (trazada en el eje de las X) y una variable dependiente (trazada en el eje de las Y), dando como resultado una ecuación matemática que expresa la mencionada relación. En otras palabras, para cualquier valor conocido de X, la ecuación calcula un valor para Y.

Para aplicar el método de análisis de regresión, se utiliza el subprograma REGRESS de IDRISI [5], considerando a Y para los valores de temperatura, los cuales dependen de X, que representan los valores de las elevaciones. En la figura 5 se muestra la gráfica de la relación resultante para X y Y, así como también la ecuación que define la relación.

La gráfica provee información muy importante, por un lado se observan a manera de puntos, las combinaciones entre T y la elevación de cada EC, por otro lado se ve la línea de tendencia de la regresión que representa el mejor ajuste entre los datos. Mientras más cerca se encuentre los puntos de la línea de tendencia, más fuerte es la relación entre los datos. Cabe mencionar que el coeficiente de correlación "r" muestra lo mismo numéricamente, para valores entre -1.0 y 0, existe una fuerte relación inversa o negativa, para el valor de 0, no existe una relación y para valores entre 0 y 1.0 existe una fuerte relación positiva [6]. De la misma manera, si la pendiente de la línea va de izquierda a derecha, indica una relación negativa entre los datos, de lo contrario, es una relación positiva. En este caso los datos de T y elevación tienen una relación inversa.

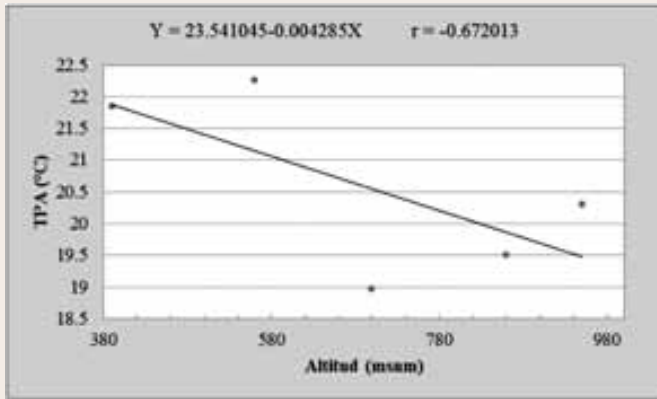


Figura 5. Gráfica del análisis de regresión entre TPA y el MDE y su respectiva ecuación.

La ecuación por sí misma es una expresión matemática de la línea:

$$Y = a + bx = 23.541045 - 0.004285X$$

Donde Y es la variable dependiente (T), a es la intersección con el eje de las Y, b es la pendiente que multiplica a X, que es la variable independiente (elevación).

Los cálculos que implica la ecuación anterior se aplican a cada pixel que contiene la imagen de elevaciones del terreno, utilizando el módulo de IDRISI llamado IMAGE CALCULATOR [5], dando como resultado, un modelo de temperaturas, donde se aprecia que las temperaturas más bajas se encuentran en las elevaciones más altas y viceversa (Figura 6).

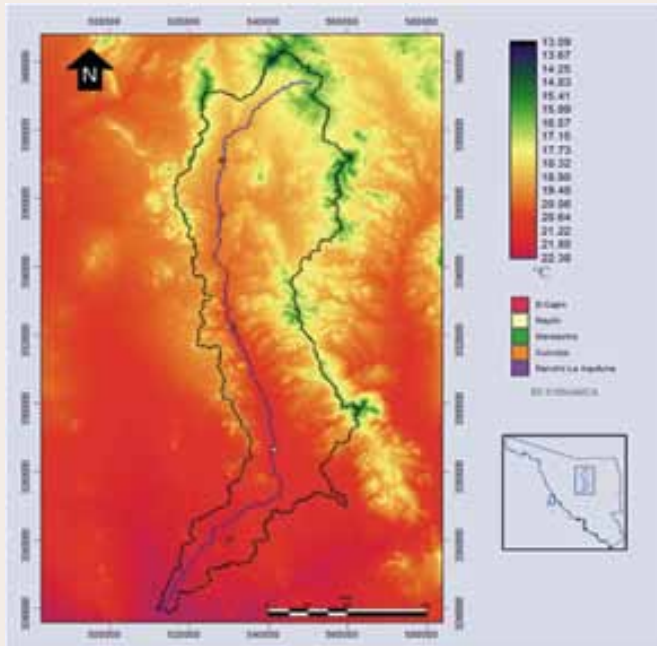


Figura 6. Modelo de TPA de la cuenca del Río San Miguel, Sonora, México.

### Modelo de precipitación (P) de la cuenca del Río San Miguel

Para crear el modelo de precipitación, se repiten los procesos y operaciones realizadas anteriormente para crear el modelo de temperaturas.

De igual manera, para aplicar el método de análisis de regresión se utilizó el subprograma REGRESS de IDRISI [5], considerando a Y para los valores de precipitación, los cuales dependen de X, que representan los valores de las elevaciones. En la figura 7 se muestra la gráfica de la relación resultante para X y Y, así como también la ecuación que define la relación.

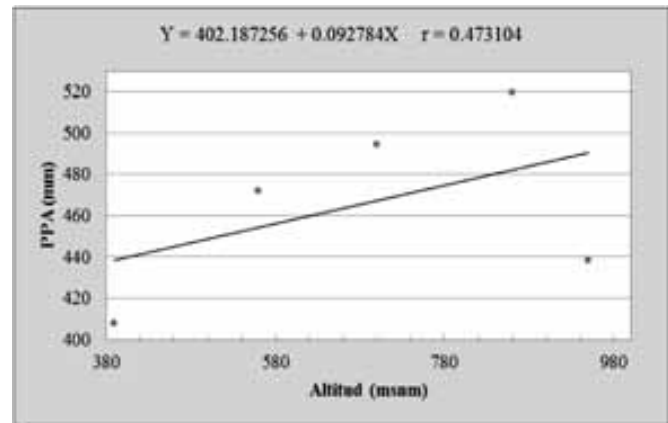


Figura 7. Gráfica del análisis de regresión entre PPA y el MDE y su respectiva ecuación.

La figura anterior provee información muy importante, por un lado se observan a manera de puntos, las combinaciones entre P y la elevación de cada EC, por otro lado vemos la línea de tendencia de la regresión que representa el mejor ajuste entre los datos. De manera similar a la línea de regresión de T, mientras más cerca se encuentre los puntos de la línea de tendencia, más fuerte es la relación entre los datos. En este caso, el coeficiente de correlación "r" muestra una relación positiva, lo cual indica que a mayores valores de elevación, corresponden mayores valores de precipitación.

De nuevo, la ecuación por sí misma es una expresión matemática de la línea:

$$Y = a + bx = 402.187256 + 0.092784X$$

Nuevamente los cálculos que implica la ecuación anterior se aplica a cada pixel que contiene la imagen de elevaciones del terreno, utilizando el módulo de IDRISI llamado IMAGE CALCULATOR, dando como resultado un modelo de precipitación, donde se aprecia que las precipitaciones más bajas se registran en las elevaciones más bajas y las precipitaciones más altas se registran en las elevaciones más altas (Figura 8).

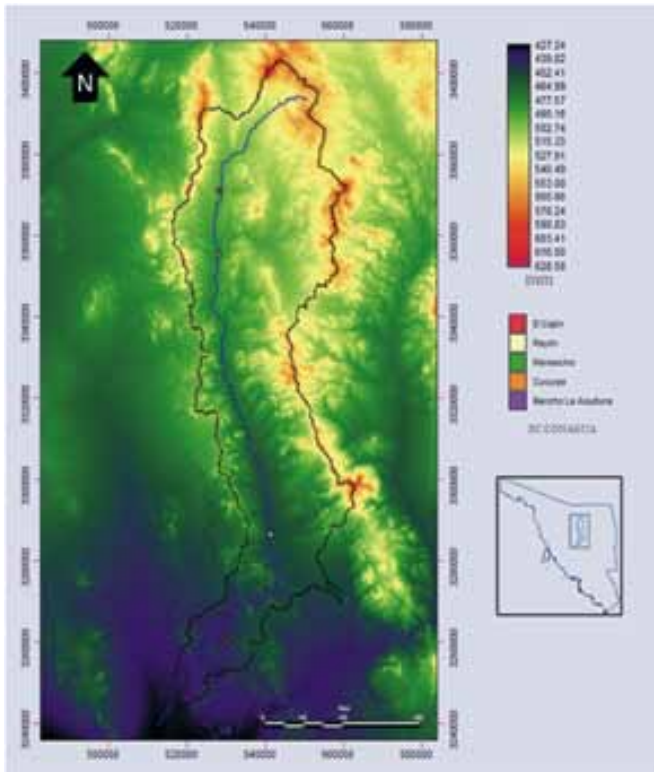


Figura 8. Modelo de PPA de la cuenca del Río San Miguel, Sonora, México.

### Modelo de evapotranspiración (ETR) de la cuenca del Río San Miguel

Para crear el modelo de evapotranspiración real, primero se estimaron los valores utilizando el Método de Turc para cada una de las estaciones climatológicas, después se repitieron los procesos y operaciones realizadas anteriormente para crear el modelo de temperaturas.

De nuevo, para aplicar el método de análisis de regresión, se utilizó el subprograma REGRESS de IDRISI [5], considerando a  $Y$  para los valores de  $ETR$ , los cuales dependen de  $X$ , que representan los valores de las elevaciones. En la figura 9 se muestra la gráfica de la relación resultante para  $X$  y  $Y$ , así como también la ecuación que define la relación.

La gráfica provee información muy importante, por un lado se observan a manera de puntos, las combinaciones entre  $ETR$  y la elevación de cada EC, por otro lado vemos la línea de tendencia de la regresión que representa el mejor ajuste entre los datos. El coeficiente de correlación " $r$ " muestra una relación positiva, lo cual indica que a mayores valores de elevación, corresponden mayores valores de  $ETR$ .

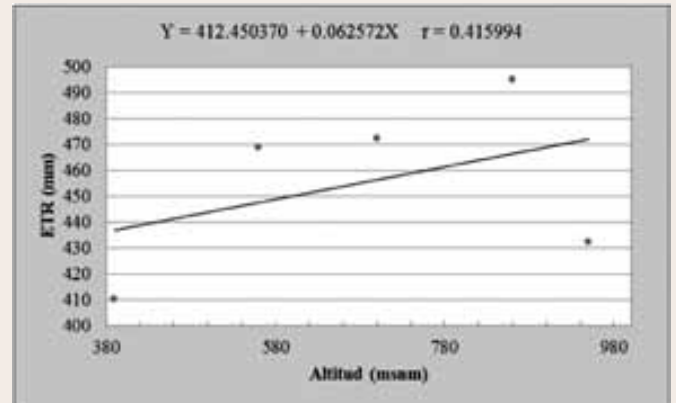


Figura 9. Gráfica del análisis de regresión entre  $ETR$  y el MDE y su respectiva ecuación.

De nuevo, la ecuación por sí misma es una expresión matemática de la línea:

$$Y = a + bx = 412.450370 + 0.062572X$$

Donde  $Y$  es la variable dependiente ( $ETR$ ). Nuevamente los cálculos que implica la ecuación anterior se aplican a cada pixel que contiene la imagen de elevaciones del terreno, utilizando el módulo de IDRISI llamado IMAGE CALCULATOR, dando como resultado, un modelo de evapotranspiración, donde se aprecia que los valores de  $ETR$  más bajos se registran en las elevaciones más bajas y los valores de  $ETR$  más altos se registran en las elevaciones más altas (Figura 10).

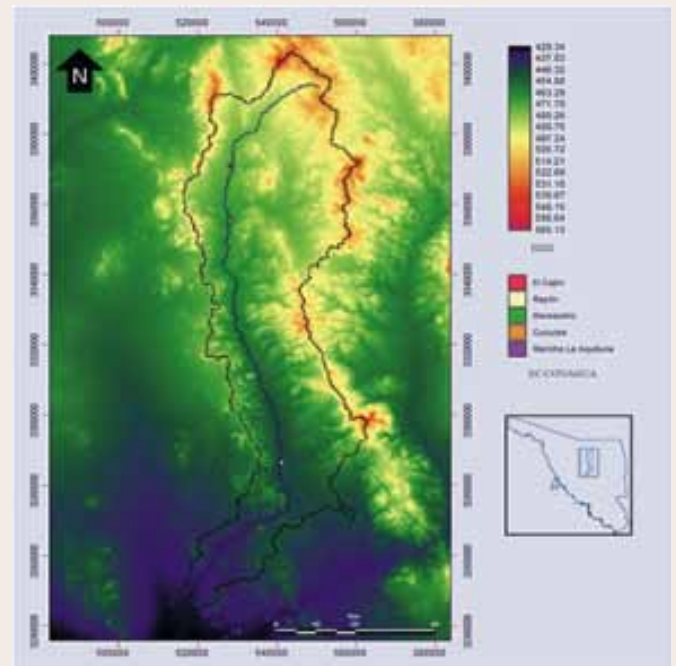


Figura 10. Modelo de  $ETR$  de la cuenca del Río San Miguel, Sonora, México.

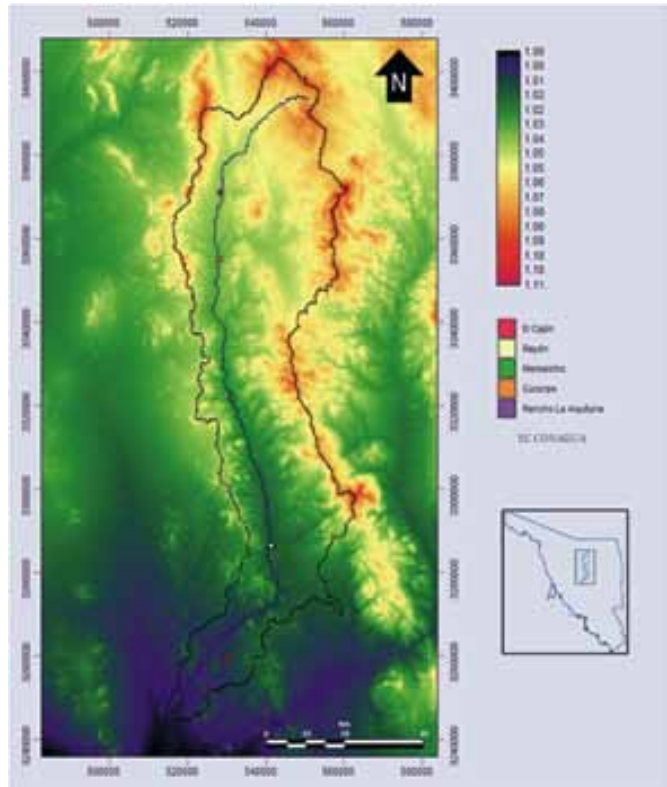


Figura 11. Modelo de disponibilidad de humedad de la cuenca del Río San Miguel, Sonora, México.

### Modelo de disponibilidad de humedad

Para generar el modelo de zonas agroclimáticas, además de los modelos de temperaturas, precipitación y evapotranspiración, se requiere un modelo de disponibilidad de humedad. La humedad disponible es un indicador del balance entre la Precipitación Promedio Anual (*PPA*) y la Evapotranspiración Real (*ETR*) y se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Humedad} = PPA/ETR$$

Considerando la fórmula anterior se utiliza el módulo de IDRISI llamado OVERLAY [5], el cual genera una imagen a partir de los cálculos que se realizan con los valores de los píxeles de otras 2 imágenes. En este caso se utilizaron las imágenes de los modelos de precipitación y evapotranspiración, donde cada uno de los píxeles del primero, fue dividido entre el valor del pixel de igual ubicación geográfica del segundo y el resultado de la operación se almacenó en el pixel de la imagen resultante, el cual se convirtió en el modelo de humedad disponible; la expresión matemática de la operación fue:

$$\text{Humedad}(X, Y) = PPA(X, Y) / ETR(X, Y)$$

La imagen resultante contiene valores sin unidad, ya que se dividió la precipitación expresada en mm, entre la evapotranspiración, también expresada en mm, donde los píxeles con valores igual a 1, indican un balance exacto entre los 2 parámetros implicados. Cuando los valores de los píxeles son mayores a 1, la *PPA* es mayor que la *ETR* indicando un balance positivo de humedad disponible, por lo contrario, cuando los valores de los píxeles son menores a 1, la *ETR* es mayor que la *PPA*, significando un balance negativo de disponibilidad de humedad (Figura 11).

### Mapa de zonas agroclimáticas

Finalmente, para definir las zonas agroclimáticas se establecieron los rangos de los valores para cada clase de las zonas de Temperatura (*T*) y Humedad disponible (*Hum*) (Tablas 2 y 3), lo cual derivó en la generación de los modelos de las zonas correspondientes a ambos parámetros climáticos (Figura 12), a partir de los cuales se hicieron los cruces de datos utilizando el subprograma de IDRISI, CROSSTAB [5], el cual hace una tabulación cruzada entre 2 imágenes con valores clasificados y genera como resultado una tercera imagen con las combinaciones posibles, remarcando las zonas agroclimáticas requeridas en el planteamiento del problema (Figura 13).

Tabla 2. Zonas TPA y sus rangos de valores

No. de zona	Rango de TPA
1	12-13.99
2	14-15.99
3	16-17.99
4	18-19.99
5	20-21.99
6	22-23.99

Tabla 3. Zonas de disponibilidad de humedad y sus rangos de valores

No. de zona	Rango de disponibilidad de humedad
1	0.98-0.99
2	1
3	1.01-1.05
4	1.06-1.11

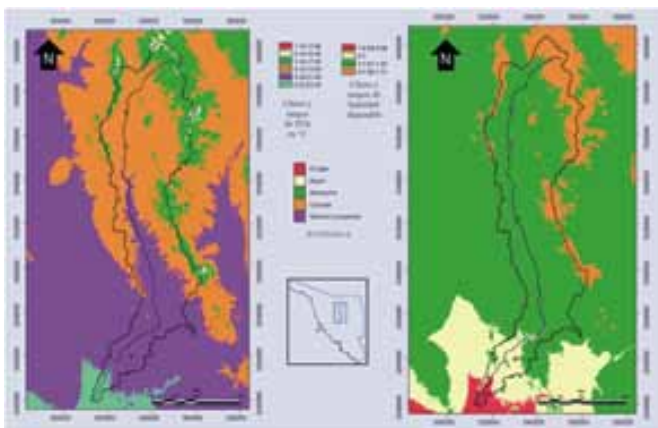


Figura 12. Zonas de TPA y disponibilidad de humedad de la cuenca del Río San Miguel, Sonora, México.

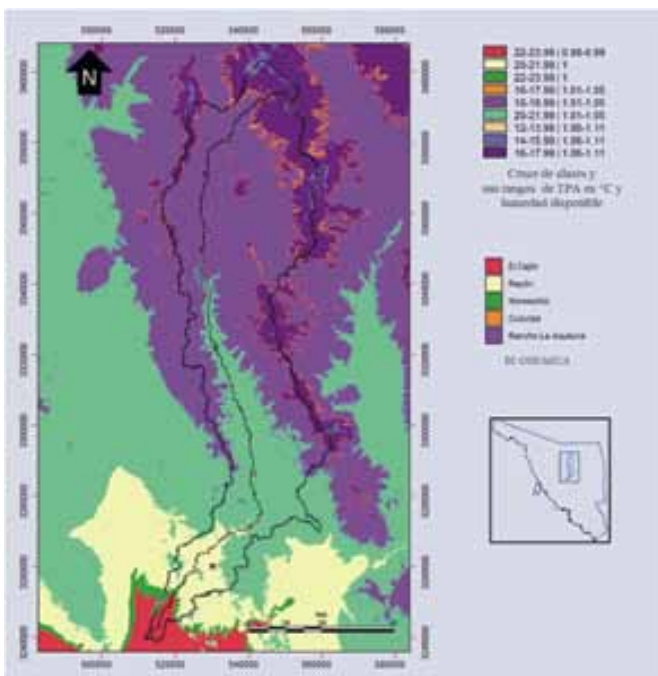


Figura 13. Mapa de zonas agroclimáticas de la cuenca del Río San Miguel, Sonora, México.

## BIBLIOGRAFÍA

- 1) Heras-Sánchez, M.C. (2013). *Análisis y procesamiento de geodatos para la generación de modelos temático-temporales de la cuenca del Río San Miguel, Sonora, México*. Tesis de Maestría en Ciencias-Geología. Universidad de Sonora.
- 2) SAGARPA-INIFAP (2012). *Zonificación agroclimática de Los Altos de Jalisco, México*. Folleto técnico no. 1. ISBN 978-607-425-785-4. 59 pp.
- 3) Pereyra, D., Cruz, D.G., Pérez, J. A., (2011). *La Evapotranspiración Real (ETR) en la cuenca del Río La Antigua, Veracruz: estado actual y ante escenarios de cambio climático*. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM ISSN 0188-4611, Núm. 75, 2011, pp. 37-50.
- 4) Anderson, D.R., Sweeney, D.J., A y Williams, T.A. (2011). *Estadística para negocios y economía*, 11ª. Ed. Editorial Cengage Learning. ISBN 13:978-0-324-78324-7.
- 5) IDRISI (2008). *IDRISI Taiga Help System version 16.1*.
- 6) Pérez, C. (2009). *Técnicas de análisis de datos con SPSS 15*. Ed. Pearson Educación, S.A. ISBN 978-84-8322-601-8.

