CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLOGICAS
DEL NOROESTE, S.C.

Programa de Estudios de Posgrado

EVAPOTRANSPIRACIÓN Y DÉFICIT HÍDRICO EN UN AGOSTADERO REPRESENTATIVO DE MATORRAL SARCOCAULE EN LA PAZ, BAJA CALIFORNIA SUR.

TESIS

Que para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

en

Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales
(Orientación en ecología de zonas áridas)

Presenta

Gustavo Mercado Mancera

La Paz, Baja California Sur, noviembre, 2006

ACTA DE LIBERACION DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las 12:00 horas del día 25 del Mes de Octubre del 2006, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

"EVAPOTRANSPIRACIÓN Y DÉFICIT HÍDRICO EN UN AGOSTADERO REPRESENTATIVO DE MATORRAL SARCOCAULE EN LA PAZ, BAJA CALIFORNIA SUR"

Presentada por el alumno:

GUSTAVO MERCADO MANCERA

Aspirante al Grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACION DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACION EN **ECOLOGÍA DE ZONAS ÁRIDAS**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Dr. Enrique Troyo Diéguez
DIRECTOR DE TESIS

Dr. José Luis García Hernández
CO-TUTOR

Dr. Bernardo Murillo Amador
CO-TUTOR

DRA. THELMA ROSA CASTELLANOS CERVANTES,
DIRECTORA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Comité Tutorial y Revisor de Tesis

Dr. Enrique Troyo Diéguez - Director de tesis
Programa de Agricultura de Zonas Áridas.
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.

Dr. Bernardo Murillo Amador – Cotutor
Programa de Agricultura de Zonas Áridas.
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.

Dr. José Luís García Hernández – Cotutor
Programa de Agricultura de Zonas Áridas.
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.

Jurado de Examen

Dr. Enrique Troyo Diéguez

Dr. Bernardo Murillo Amador

Dr. José Luís García Hernández

Dra. Alejandra Nieto Garibay (Suplente)
Programa de Agricultura de Zonas Áridas.
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.

Un sueño es la vida.....

Una realidad es la vida.....

Un reto es la vida.....

Un suspiro es la vida.....

Una esperanza es la vida.....

Cada día que pasamos en este mundo

lleno de retos y vicisitudes, damos gracias

a la existencia de un ser supremo que nos

infunde la fuerza de seguir adelante y no desfallecer

en el intento, y seguir adelante es el objetivo de vivir

aquí y ahora, para fortalecer el futuro que nos espera

con los brazos abiertos sin decirnos hasta que momento parar...

Por ser mi fuerza, Dios los bendiga siempre.....

Con todo amor y cariño a mis hijos: María†, Ricardo†, Gustavo, Daniela.

Agradecimientos

A mis padres, hermanos y familiares por la oportunidad de compartir la vida con ellos.

A mi Universidad Nacional Autónoma de México y sus maestros, los cuales me han forjado el espíritu de seguir adelante como profesionista.

Al CONACYT, por la beca 190960 que me permitió realizar mis estudios de maestría aquí, en el CIBNOR.

Al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste por todas las facilidades que me ha brindado para llevar a cabo los estudios de maestría, gracias.

A mi director de tesis el Dr. Enrique Troyo Diéguez por su amistad y apoyo académico brindado, invaluable para completar esta etapa de mi vida profesional y académica, gracias.

A mis sinodales, Dr. José Luis García Hernández, Dr. Bernardo Murillo Amador y a la Dra. Alejandra Nieto Garibay, por sus valiosas aportaciones para el desarrollo del trabajo de tesis que representaron parte de su tiempo, esfuerzo y dedicación.

A mis compañeros de trabajo Adolfo, Margarita, Alejandro, Arturo, Alfredo, Ernesto, Juan, Cynthia, Miguel, Rocío, Juan Antonio, Eduardo, Manuel Armando, por su apoyo y confianza para llevar a cabo este reto profesional, estoy en deuda con ustedes.

A mis compañeros de generación de maestría, Christian, Ligia, Ciro, Héctor, Grecia, Maria Elena, Claudia, Flavio, Alfonso, Erika, Marcela, Salvador y Rodolfo, gracias por su amistad y por los gratos momentos vividos en nuestra estancia en el CIBNOR, deseando vaya todo bien en sus vidas futuras.

A mis otros compañeros que de una u otra manera me han apoyado en el CIBNOR, a Lupita, Martha, Perla, Ricardo, Fernando, Horacio, Gaby, Karina, Gaston, gracias y suerte en todo lo que emprendan.

Al personal de Posgrado, Dra. Thelma, Lic. Osvelia, Lic. Leticia, Betty, Lupita, Claudia, por su incondicional apoyo en mis estancia en el CIBNOR.

Especial reconocimiento a Horacio y Manuel por su incondicional apoyo en el centro de cómputo, siempre atentos.

A mis profesores del Posgrado los Doctores Leonardo, Martha Jeannette, Yolanda, Patricia, Fernando Luis, Sara Cecilia, Ricardo, Salvador Emilio, Alejandro, Francisco, Illie Sava, Aurora, César, Elena, Diana, a todos ellos gracias por sus valiosas aportaciones para el cumplimiento de mis estudios de maestría. Me llevo algo de ustedes, deseando haberles dejado algo de mí.

A Tony, Ana María, que su apoyo en biblioteca ha sido grandioso y muy importante para el cumplimiento de las tareas diarias.

A la M. en C. Sandra Robles Gil Mestre, Jefa del Observatorio La Paz de la CONAGUA, por su valiosa asesoría y apoyo al proporcionarme los datos climáticos del Observatorio.

A la Gerencia Estatal en Baja California Sur, de la Comisión Nacional del Agua, por el apoyo brindado con la información climática de la estaciones La Paz y Alfredo V. Bonfil.

A la Dirección del SENEAM y al personal de la estación climática del Aeropuerto de La Paz, por permitirme acceder a la base de datos climáticos de esta estación.

Finalmente, a toda la gente que de una u otra manera me han permitido caminar por el sendero académico y alcanzar este objetivo, mil gracias.

Índice General

Pág.
Lista de Tablas……... ii
Lista de Gráficas…… iii
Lista de Figuras……..... iv
Lista de Anexos..... iv
Resumen..... v
Abstract…….. vi
I. INTRODUCCIÓN……..... 1
1.1. Antecedentes……..... 2
1.1.1. El clima en zonas áridas……..... 2
1.1.2. Conceptos de evapotranspiración…….. 5
1.1.3. Métodos de cálculo de la evapotranspiración……..……. 10
1.1.4. Concepto de balance hídrico……. 16
1.1.4.1. Déficit hídrico……... 16
1.1.5. La fisiología de la planta y la resistencia al déficit hídrico..... 20
1.1.5.1. Sistema fotosintético y metabólico..…….. 21
1.2. Objetivos…….. 26
1.3. Hipótesis…….. 27
II. MATERIALES Y MÉTODOS……..... 28
2.1. Localización del área de estudio……. 28
2.2. Clima y vegetación…….. 29
2.3. Suelo…… 30
2.4. Materiales…… 31
2.5. Métodos..…… 32
2.5.1. Variables.....……..... 32
2.5.2. Pruebas estadísticas…….. 36
III. RESULTADOS…….. 42
IV. DISCUSIÓN……... 66
V. LITERATURA CITADA…… 78
ANEXOS..... 82

Lista de Tablas

Pág.

Tabla I. Diferentes métodos y técnicas de medida de la evapotranspiración, clasificados según su aplicación temporal y espacial……. 15

Tabla II. Zonas de aridez por la relación Pp/ETP. (PNUMA, 1992)……... 18

Tabla III. Tipos climáticos de acuerdo a De Martonne……..... 19

Tabla IV. Climas de acuerdo al Índice de Lang……... 19

Tabla V. Análisis de Componentes Principales. Observatorio La Paz, B.C.S……..... 42

Tabla VI. Estructura de los dos componentes principales obtenidos en el ACP con las variables originales. Observatorio La Paz, B.C.S……..... 43

Tabla VII. Análisis de regresión múltiple entre la ETP y nueve variables climáticas. Observatorio La Paz, B.C.S……... 44

Tabla VIII. Análisis de varianza para la ETP y las nueve variables climáticas. Observatorio La Paz, B.C.S……..... 45

Tabla IX. Matriz de correlación de los coeficientes de Pearson. Observatorio La Paz, B.C.S..... 48

Tabla X. Datos de evaporación promedio mensual en las estaciones analizadas en el presente trabajo……..... 51

Tabla XI. Evapotranspiración potencial promedio mensual con datos del tanque de evaporación Tipo A……..... 54

Tabla XII. Evapotranspiración potencial promedio mensual por el método de Thornthwaite…….. 55

Tabla XIII. ETP promedio mensual, calculada por varios métodos. Observatorio La Paz, B.C.S…….. 58

Tabla XIV. Índices de aridez para la zona de La Paz, B.C.S……. 60

Tabla XV. Análisis de regresión - Modelo Lineal Y = a + b*X. La Paz, B.C.S..... 63

Tabla XVI. Análisis de varianza entre la precipitación y el IDHA. La Paz, B.C.S... 64

Lista de Gráficas

Pág.

Gráfica 1. Marcha de la temperatura en cada estación analizada…… 50

Gráfica 2. Temperatura media mensual en la zona de estudio…… 50

Gráfica 3. Evaporación media mensual en cada estación climática analizada…… 51

Gráfica 4. Evaporación media mensual en la zona de estudio…… 52

Gráfica 5. Precipitación media mensual por estación climática analizada……. 53

Gráfica 6. Precipitación promedio mensual en la zona de La Paz…….. 53

Gráfica 7. ETP promedio mensual en la zona de estudio……... 55

Gráfica 8. ETP por el Método de Thornthwaite, promedio mensual por estación climática…..... 56

Gráfica 9. ETP por el Método de Thornthwaite, promedio mensual en la zona de estudio……..... 56

Gráfica 10. Comparación de métodos…… 57

Gráfica 11. Comparación de 4 métodos para el cálculo de la ETP…… 58

Gráfica 12. Estación de crecimiento para la zona de La Paz……. 60

Gráfica 13. IDHA, Observatorio La Paz, B.C.S…… 61

Gráfica 14. IDHA, Aeropuerto La Paz, B.C.S.……. 62

Gráfica 15. IDHA, estación climática La Paz, B.C.S….……... 62

Gráfica 16. IDHA, estación climática Alfredo V. Bonfil, B.C.S…….. 63

Gráfica 17. Modelo ajustado de la precipitación-IDHA. La Paz, B.C.S.…….. 65

Lista de Figuras

Pág.

Figura 1. Representación simplificada del sistema físico formado por el sistema continuo suelo-planta-atmósfera (SVAT). Los flujos (F) están regulados por unos gradientes de concentración (C1-C2) y unas resistencias (r)..... 13

Figura 2. Métodos y técnicas instrumentales para medir la evapotranspiración más usados en la actualidad…….. 14

Figura3. La planta un sistema abierto……..... 20

Figura 4. Vista de un estoma abierto y uno cerrado……... 24

Figura 5. Ubicación de la zona de estudio. La Paz, BCS……... 28

Figura 6. Ubicación de las estaciones climáticas analizadas. La Paz, BCS…..…….. 32

Lista de Anexos

Anexo 1. Coordenadas geográficas de las estaciones climáticas evaluadas en el presente trabajo..... 83

Anexo 2. Promedios mensuales de las variables climáticas. Estación Observatorio La Paz. La Paz, Baja California Sur..... 83

Anexo 3. Análisis de regresión múltiple entre la ETP y ocho variables climáticas Observatorio La Paz, B.C.S..... 84

Anexo 4. Análisis de varianza entre la ETP y ocho variables climáticas. Observatorio La Paz, B.C.S..... 84

Anexo 5. Análisis de regresión múltiple entre la ETP y siete variables climáticas. Observatorio La Paz, B.C.S..... 85

Anexo 6. Análisis de varianza entre la ETP y siete variables climáticas. Observatorio La Paz, B.C.S..... 85

Resumen

La evapotranspiración (ETP) se define como la cantidad de agua perdida por evaporación del suelo y la transpiración de las plantas, por lo cual destaca entre los datos importantes para el manejo sustentable del recurso agua y para conocer la respuesta fenológica de las plantas. Su estudio reviste mayor importancia en las zonas áridas al estimarse que la ETP es mayor que la precipitación (Pp) durante el año (Evenari, 1985). Se sabe que existe dicha relación, sin embargo, no existen datos en la zona de estudio que den cuenta de la magnitud del déficit. Se realizó la estimación de la evapotranspiración potencial y del déficit hídrico en un agostadero representativo de matorral sarcocaule en La Paz, Baja California Sur. A partir de los datos de Pp y ETP promedio mensual del año de 1980 a 2005 de las estaciones climáticas de La Paz y Alfredo V. Bonfil, se caracterizó el régimen hidrológico y la disponibilidad de agua presente en la zona, asimismo de 1997 a 2005 con los datos del Observatorio y del Aeropuerto de La Paz. El clima es seco, con una vegetación de matorral sarcocaule y el suelo es arenoso de color claro. Los datos analizados fueron temperatura, precipitación, evaporación, viento, radiación solar, humedad y presión atmosférica. Se estimó el valor de la ETP aplicando 4 métodos: del tanque de evaporación, de Thornthwaite, de Penmann y de Penmann-Montieth. Con la ETP y Pp se realizó el análisis del déficit hídrico determinando los correspondientes índices de aridez de acuerdo a los métodos propuestos por Lang, De Martonne y PNUMA. Además, se calculó el índice de disponibilidad hidro-ambiental (IDHA) empleando el índice de De Martonne modificado por Troyo (2004). Se realizó un análisis de regresión múltiple entre variables climáticas y la ETP, y entre la Pp y el IDHA. Se empleó el análisis de componentes principales para establecer la influencia de cada variable climática sobre la ETP. Los resultados obtenidos evidencian una influencia mayor de la temperatura media y evaporación sobre la ETP. Con el análisis de regresión múltiple se obtuvo la siguiente ecuación reducida a su mínima expresión:

ETP = 78.8727 + 0.802345*Evaporación - 0.00919186*Humedad - 0.00153907*Precipitación - 0.0755447*Presión - 0.461159*Tmáxima + 0.719289*Tmedia - 0.310138*Tmínima.

La tendencia de la temperatura mostró un incremento en verano y su disminución en invierno, con un promedio anual de 24.3º C. Se observó un marcado déficit de agua durante el año, a causa de la baja Pp y la alta ETP, lo cual es indicativo de la dominancia de la aridez presente en la zona de estudio. La determinación del índice de disponibilidad hidro-ambiental permitió estimar que la aridez es mayor en la parte norte de La Paz impactando significativamente en el manejo sustentable del recurso agua. Con lo anterior se concluyó que en la zona de La Paz existe un déficit climático todo el año. El *índice de disponibilidad hidro-ambiental* es un método práctico en la evaluación de la aridez, en condiciones semejantes a la región de La Paz. Los datos aquí expuestos deben ser considerados en la planeación del uso y manejo sustentable del recurso agua en los campos agrícolas y a su vez del recurso vegetal en los agostaderos de la región.

Palabras clave: evapotranspiración, índice de aridez, índice de disponibilidad hidro-ambiental.

Vo. Bo. Dr. Enrique Troyo Diéguez.

Abstract

Evapotranspiration (ETP) is defined as water transferred to the atmosphere from ground surface by evaporation and transpiration by plants, which is one of the most important processes and information for sustainable management of water to assess the physiological responses of plants to water deficit. The estimation of ETP is relevant for arid zones because in these areas ETP is commonly greater than rainfall (Pp) throughout the year (Evenari, 1985). This relationship is already known, however, there are no data in the studied zone to provide information about the magnitude of water deficit. Potential evapotranspiration and water deficit were estimated for a representative Sarcocaulescent shrub plant ecosystem in La Paz, Baja California Sur. In addition, hydrologic status and water availability of the studied zone were characterized from monthly averages of Pp and ETP for 25 years (1980 to 2005), with data from climatic stations of La Paz and Alfredo V. Bonfil. The same variables were calculated using monthly averages of Pp and ETP obtained from the climatic stations 'Observatory' and 'La Paz Airport' with data for nine years (1997 to 2005). The study zone has a dry climate; the dominant vegetation is Sarcocaulescent shrub and the soil is sandy-loam with clear color. The analyzed data were temperature, precipitation, evaporation, wind velocity, solar radiation, humidity and atmospheric pressure. ETP values were estimated applying four methods: pan evaporation, Thornthwaite, Penmann and Penmann-Montieth. ETP and Pp were considered for the analysis of water deficit. Aridity indexes were estimated according to the methods that were proposed by Lang, De Martonne and PNUMA. Likewise, a water deficit indicator was calculated by means of a hydro-environmental availability index (IDHA), based on De Martonne's index modified by Troyo (2004). In order to confirm numerical correspondences, analyses of multiple regressions between climatic variables and ETP, and between Pp and IDHA, were carried out. A principal component analysis was applied in order to establish the influence of each climatic variable on ETP. Results showed a greater influence of temperature and evaporation on ETP. Through the multiple regressions, the following equation reduced to its minimum expression was obtained:

ETP = 78.8727 + 0.802345*Evaporation - 0.00919186*Humidity - 0.00153907*Precipitation - 0.0755447*Pressure - 0.461159*T. Maximum + 0.719289*T. Medium - 0.310138*T. Minimum.

The temperature trend showed an increase in summer and a decrease in winter, with an annual average of 24.3º C. A noticeable deficit of water was observed during the year, caused by low Pp and high ETP, which is indicative of a dominance of dryness, present in the area of study. The application of a hydro-environmental availability index was useful to estimate that dryness is greater in the north of La Paz, thus impacting significantly the use and management of water as a resource. It was concluded that in the area of La Paz there is a climatic water deficit through most part of the year. The hydro-environmental availability index is a practical method for evaluating climatic dryness, applicable to similar conditions as those prevalent in La Paz, Mexico. The obtained data should be considered for planning the use and sustainable management of water resources in agricultural fields, and at the same time for planning strategies for the conservation of plant resources in the study region.

Key words: evapotranspiration, aridity index, hydro-environmental availability index.

Vo. Bo. Dr. Enrique Troyo Diéguez.

I. INTRODUCCIÓN

Los científicos de la presente generación están preocupados por encontrar solución a los problemas que afectan a la sociedad mundial en su conjunto. Uno de los grandes retos que enfrentamos es la de producir alimento para una población que crece cada día más. En México, el problema no es menor, si se considera que el 51% de la superficie está clasificada como zonas áridas y semiáridas, las cuales están caracterizadas por una baja precipitación, con la consecuente baja productividad de sus áreas agrícolas. Asimismo, los ciclos pluviales han variado notoriamente en los últimos años provocando una mayor afectación de los rendimientos agrícolas. Esta situación causa la necesidad de eficientizar el manejo del recurso agua sobre todo en aquellas regiones donde la cantidad de precipitación es baja.

Unos de los datos importantes para el manejo del agua con fines de riego y para conocer la respuesta fenológica de las plantas al déficit hídrico es la evapotranspiración (ET), definida como la cantidad total de agua perdida por evaporación del suelo y la transpiración de las plantas. En las zonas áridas reviste mayor importancia su estudio, al conocerse que la ET es mayor que la precipitación durante el año (Evenari, 1985).

Se sabe que la falta de agua limita la productividad de los ecosistemas naturales y agrícolas. En general, se produce sequía o escasez de agua cuando el suministro es restringido por falta o deficiencia de lluvias, o bien porque la capacidad de almacenamiento del suelo no es buena. También puede haber pérdida de agua por demanda evaporativa del aire.

El agua es el solvente y transporte universal de las células, que ejerce un efecto refrigerante en todas las plantas y que además es el donador de electrones en la reacción de Hill. Por lo tanto, es de esperarse que el estrés por falta de agua afecte a cualquiera de estos niveles, de modo que se puede pensar que las plantas están capacitadas para percibir el estrés, transformarlo en una señal y luego responderla.

1.1. Antecedentes.

1.1.1. El clima en zonas áridas.

El clima en las zonas áridas es de los más extremosos en el planeta y presentan características particulares, que en otros rincones del planeta no se encuentran. A continuación se presentan de manera general algunas características generales del clima en las zonas áridas.

Pauw (2000) señaló que las zonas áridas del mundo están caracterizadas por un déficit de precipitación (Pp) en relación a la evapotranspiración potencial. Su distribución a través del mundo está regulada por la interacción de los patrones de la circulación atmosférica global, la distribución de tierra y mar y la topografía local.

Evenari (1985) apuntó que las zonas áridas están caracterizadas en forma general por un gran número de factores comunes, climáticos, geomorfológicos, hidrológicos, edáficos, de vegetación y vida animal. Son regiones de baja precipitación, baja humedad, alta temperatura del aire, vientos fuertes, suelos con bajo contenido orgánico y alto contenido de sales minerales, alta erosión hídrica y eólica. Asimismo, "son áreas donde la evaporación del suelo y de la vegetación excede a la precipitación, donde la flora y fauna muestran adaptación a las altas temperaturas y escasez de agua".

Ayllón (1996) señaló que los desiertos presentan climas secos, divididos en dos grados de escasez de lluvia: los climas desérticos (BW) casi sin lluvia, en los que no crece vegetación, o bien, es de tipo xerófita; y los esteparios (BS), en que los períodos de lluvia son muy cortos, pero permiten el desarrollo de una vegetación de gramíneas o de matorral.

Según Köppen son regiones donde la que la evaporación es por lo menos dos veces superior a la precipitación. De acuerdo a su Sistema de Clasificación Climática, el tipo climático B designa los climas en los cuales el factor determinante de la vegetación es la sequedad (más que las bajas temperaturas). La aridez no es un asunto sólo de

precipitaciones sino que está definida por la relación entre las precipitaciones que penetran en el suelo donde las plantas crecen y la evaporación hace que se pierda esa humedad. La evaporación es difícil de evaluar y no es una medida convencional en las estaciones meteorológicas; Köppen se vio forzado a sustituir la fórmula que identifica aridez en términos de índice de temperatura-precipitaciones. Los climas secos se subdividen a su vez en áridos (BW) y semiáridos (BS), y cada uno puede diferenciarse aún más añadiéndole un tercer código, *h* para cálido y *k* para frío (García, 1988).

Una zona árida es una región seca y cálida donde el suelo desnudo es el rasgo más característico del paisaje. En las zonas áridas y semiáridas la temperatura producto de la alta radiación solar tiene un efecto temporal que establece la fisiología y el ritmo de vida de los organismos que habitan ahí. Durante el día y la noche existen oscilaciones muy marcadas, existiendo lugares en el mundo en que estas fluctuaciones van más allá de 20º C, en tanto que en otros más templados es menor. Durante el día se pueden alcanzar temperaturas de 40º C ó más, mientras que durante la noche se pueden obtener valores menores de 0º C, esto último ocasionado por la falta de nubosidad que detenga la irradiación del suelo con la consecuente pérdida de calor de la superficie terrestre (Evenari, 1985).

Por otro lado, la precipitación en las zonas áridas y semiáridas presenta dos aspectos de suma importancia para la vida de los organismos: su tendencia espacial y temporal. El régimen de lluvias en las zonas áridas y semiáridas puede ser de lluvias en verano, lluvias en invierno y en algunos lugares está presente en dos épocas del año. Lo errático de las lluvias puede ser de varios milímetros hasta menos de 400 mm al año; sin embargo, se han observado precipitaciones de alta magnitud, mayores de 100 mm en un solo evento, en una hora. Este patrón de lluvias marca profundamente la vida en dichas zonas. En México la zona más seca es Altar, Sonora, con no más de 50 mm al año, mientras que en el desierto Hidalguense o bien en el Valle Tehuacan-Cuicatlán, la lluvia presenta valores no mayores de 400 mm (García, 1988).

Es importante subrayar que el dato de precipitación total anual no es suficiente para analizar su influencia sobre los organismos, sino también se debe considerar su estacionalidad porque se ha visto que de un año a otro la precipitación varía notablemente, tanto en su forma como en la cantidad precipitada. Se han tenido años con valores superiores a la media, como también años en que la precipitación es menor a la media. Esto puede ocurrir de un año a otro. Asimismo, su incidencia durante el año también es variable respecto a lo normal (Evenari, 1985).

El carácter de la precipitación en las zonas áridas está marcado por su irregular distribución tanto espacial como temporal. Normalmente en el verano se presenta en forma torrencial, de alta intensidad y corta duración, debido a celdas convectivas muy localizadas en radios de 10-50 km, mientras que en el invierno, las lluvias son en forma intermitente, lloviznas ligeras de mayor duración, que pueden ser localizadas o bien abarcar una zona más amplia. Este carácter intermitente de la lluvia, hace que las lluvias de invierno sean más efectivas para el crecimiento de las plantas en el desierto (Nicholson, 1999).

Las zonas que se encuentran determinadas por la sombra orográfica o bien por la latitud, experimentan menores valores de humedad atmosférica, que aquellos que están determinados por corrientes marinas frías. En estos últimos, la entrada de humedad de la costa favorece la formación de rocío y niebla, los cuales proveen a las plantas una forma de allegarse de humedad y con ello soportar la inclemencia del tiempo atmosférico.

La falta de agua en las zonas áridas también se debe a una alta evapotranspiración, la cual está influenciada por las altas temperaturas que se registran durante el día, baja precipitación, alta radiación solar, baja humedad atmosférica, así como por la acción de los vientos, que son secos y fuertes (Ayllón, 1996).

1.1.2. Conceptos de evapotranspiración.

El concepto de evapotranspiración potencial (ETP) fue definido de forma paralela en 1948 tanto por Thornthwaite como por Penmann. Desde entonces este concepto es ampliamente utilizado y ha tomado una enorme importancia para los estudios geográficos sobre climatología mundial y, en general, en las investigaciones hidrológicas y en la predicción de necesidades de agua para la agricultura, tanto en condiciones de temporal como de riego. Así, es frecuente ver clasificaciones de índices de aridez en función de la Precipitación/ETP. También se usa como variable en correlaciones para estimar el rendimiento de los cultivos, incluso se considera también para definir la aridez en los estudios de recarga[11].

Se define la evapotranspiración potencial como la evaporación a partir de una superficie extensa cubierta con pasto corto que ensombrece totalmente el suelo y que se encuentra a capacidad de campo. La evapotranspiración potencial no puede ser nunca superior a la de una superficie libre de agua en las mismas condiciones meteorológicas. Pruitt y Lawrence (1968) midieron en cultivos de centeno en Davis, California, USA, que la cantidad de agua utilizada era del 80% de la evaporada por tanque de evaporación, excepto cuando los vientos eran fuertes y el aire seco y cálido, aunque en ese caso las plantas consumen relativamente menos agua, debido aparentemente a una mayor resistencia de los estomas.[2] En las grandes planicies de los Estados Unidos y en otras muchas regiones áridas, los cultivos regados adecuadamente que ejercen una débil cubierta resistente, pueden consumir más energía y transpirar más agua que la evaporada por una superficie libre de agua.

La evapotranspiración máxima (ETM) es determinada por el clima y el desarrollo de las plantas y su fisiología cuando tienen suficiente abastecimiento de agua. En esencia, la diferencia ETP-ETM es una medida de la resistencia de la cubierta vegetal. La evapotranspiración Real (ETR) es el resultado de un suelo poco regado o con poca

[1] www.agua.uji.es/pdf/leccionRH04.pdf
2 Idem.

disponibilidad de agua, provocando una falta de disponibilidad de agua para la planta. La relación ETR/ETP puede expresarse como una función del potencial del agua en el suelo y se ha utilizado como parámetro para cuantificar el riego en función de la demanda (op. cit.).

Los vegetales pierden agua a través de la transpiración que realizan como producto de las altas temperaturas o bien por la sequedad del viento. La transpiración se realiza por los estomas cuando están abiertos y depende de la diferencia en la presión de vapor existente entre las hojas y el aire que rodea a las plantas. La transpiración representa de un 98 a 99% del agua consumida por los vegetales; sólo se utiliza para construcción de tejidos el 1 ó 2% y junto con la evaporación del agua del suelo, constituye la evapotranspiración ya sea potencial ó real según el caso (Torres, 1990). De acuerdo con el mismo autor, la evapotranspiración es la suma de agua evaporada del suelo más el agua transpirada por la planta y puede ser potencial (ETP) cuando esta se presenta bajo condiciones de humedad óptimas y es medida en un cultivo agrícola bajo y de cobertura completa. La ETR es la cantidad de agua que un vegetal ha evapotranspirado realmente en condiciones de campo, es decir, en condiciones limitadas de agua.

Ortiz (1988) estableció que la ET es la suma de las cantidades de agua evaporada desde el suelo y transpirada por las plantas. Asimismo, la ETP es la máxima cantidad de agua capaz de ser perdida por una capa continua de vegetación que cubra todo el terreno, cuando es ilimitada la cantidad de agua suministrada al suelo. La ETR es la cantidad de agua perdida por el complejo planta-suelo en las condiciones meteorológicas, edáficas y biológicas existentes.

Aguilera y Martínez (1990) definieron la evaporación como el agua perdida en forma de vapor por el terreno adyacente a la planta, por la superficie del agua o por la superficie de las hojas de las plantas. Como es un proceso de intercambio de energía, el proceso está influenciado principalmente por la radiación solar, la temperatura del aire, la presión de vapor, el viento y la duración del día, así como la latitud y época del año.

La intensidad de evaporación de una superficie del suelo saturado es aproximadamente la misma que la de un tanque de agua a la misma temperatura del suelo. Conforme el suelo se seca, la evaporación decrece y su temperatura aumenta para mantener el balance de energía. Eventualmente, la evaporación cesa porque no existe un mecanismo efectivo para transportar el agua a la superficie del suelo cuando se encuentra a profundidades apreciables. Así, la evaporación está limitada por la disponibilidad de agua en el suelo. Asimismo, se ha definido a la ET como la cantidad de agua utilizada por las plantas para realizar sus funciones de transpiración más el agua que se evapora de la superficie del suelo en el cual se desarrolla (Aguilera y Martínez, 1990; Gay, 1981).

La ET depende de factores hídricos, edáficos, vegetales y climáticos. A continuación se citan los más importantes dentro de cada grupo de factores.

a) Hídricos: calidad y disponibilidad de agua, drenaje.
b) Edáficos: propiedades físicas y químicas del suelo, como la textura, estructura, materia orgánica, salinidad, profundidad, fertilidad, otros.
c) Vegetales: especie, ciclo vegetativo, edad, características morfológicas de los estomas.
d) Climáticos: temperatura, humedad relativa, precipitación, viento, radiación solar, evaporación, otros.

La importancia cuantitativa de este proceso es tal que, como promedio global, el 57 % de la precipitación anual es devuelta a la atmósfera por evapotranspiración, alcanzando valores del 90 y 100 % en zonas áridas y desérticas (Sánchez-Toribio, 1992).

La ET es un componente fundamental del balance del agua y un factor clave en la interacción entre la superficie terrestre y la atmósfera. Su cuantificación se hace precisa en contextos diferentes tales como la producción vegetal, la planificación y gestión de recursos hídricos o estudios ambientales y ecológicos, y afecta por tanto a una enorme variedad de especialidades científicas como climatología, modelación del clima, ecología y fisiología vegetal, modelación de ecosistemas, hidrología y análisis de reservas hídricas y

planificación regional. Pozo (2002) señaló que el inicio de la floración en el cultivo de la hualputra ó carretilla (genotipo de alfalfa semidomesticada) (*Medicago polymorpha* L) se correlacionó positivamente con la relación Pp/ETP; días después de la primera flor hasta la madurez de la vaina la correlación fue negativa.

Desde el punto de vista energético, la evapotranspiración está representada por el símbolo λE y puede ser descrita por un balance de energía que en su forma simplificada tiene la siguiente ecuación:

$$Rn - G = \lambda E - H$$

El balance anterior indica que la energía radiativa (Rn) es usada en evaporar el agua (λE) y en calentar las superficies (suelo y vegetación), lo que se denomina 'calor latente' y 'calor sensible' respectivamente. El 'calor sensible' representa tanto el calor que es emitido desde las superficies al aire por conducción o por convección (H), como el calor que pasa por conducción al suelo (usándose en este caso el símbolo G). La energía invertida en la fotosíntesis no se considera en la ecuación ya que es despreciable frente a estos otros flujos energéticos. Por tanto, desde el punto de vista energético, y conocidos los demás componentes del balance, sería sencillo calcular λE por diferencia. Pero esto en la práctica es una tarea compleja por la dificultad en determinar los otros componentes del balance:

i) El balance de radiación puede ser extremadamente complejo cuando la superficie tiene algún elemento de heterogeneidad, como por ejemplo en el caso de vegetación dispersa.

ii) La heterogeneidad espacial hace que los flujos de energía y vapor de agua provenientes de las diferentes superficies evaporantes interaccionen entre sí lo que dificulta enormemente su determinación.

iii) El aire fluye generalmente en régimen turbulento, formando remolinos que dan lugar a mezclas de capas de aire y a un transporte mucho más efectivo que el que se produce por difusión molecular. Pero el transporte de vapor de agua encuentra resistencias, superficiales y aerodinámicas (también llamadas de capa límite o limítrofe) que se oponen a ese transporte.

iv) Por último, las variables meteorológicas, disponibilidad de agua en el suelo y variables fisiológicas, imponen una variabilidad temporal que ha de ser conocida.

Cuando el aprovisionamiento de agua del suelo es adecuado, la ETR será igual a la ETP, mientras que si existe insuficiencia de agua, la ETR será menor a la ETP. En consecuencia, la diferencia entre ambas magnitudes expresa la verdadera falta de agua al nivel de la vegetación y el cociente entre ambos parámetros, es decir, el índice de evapotranspiración, representa una medida adecuada de la sequía.[3]

El índice de evapotranspiración es una de las medidas más sintéticas que existen para expresar el grado de sequía experimentado por un lugar dado, especialmente en lo concerniente a la sequía edáfica, es decir, aquella que va a afectar al desarrollo de la vegetación. El índice responde a la expresión: I.E. = ETR/ETP. Los índices inferiores a la unidad son expresivos de condiciones de déficit de agua y los superiores a la unidad de condiciones satisfactorias o incluso con excedentes. Se define entonces como el cociente (multiplicado por 100) entre el índice de evapotranspiración registrado en el período considerado y el índice de evapotranspiración que se considera normal para ese mismo período. Cuando el valor observado es superior al normal, el indicador vale más de 100 y cuando es inferior, vale menos de 100.[4]

Holdridge (1967) señaló que la ETP es la tasa de evaporación y transpiración que tendría lugar en un área completamente cubierta de vegetación en la cual el agua del suelo no es limitante. Las tasas máximas de evaporación de grandes embalses de agua en las zonas áridas se aproximan a los 2,500 mm por año.

[3] http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/clima_atmosfera/infgen/sicam3_2.html

[4] Idem.

1.1.3. Métodos de cálculo de la evapotranspiración.

Las dificultades en la medida de ET y en la discriminación entre evaporación y transpiración ocasionaron que muchos autores se inclinaran por suponer condiciones ideales de humedad del suelo y desarrollo vegetal, dos de las variables más difíciles de medir y una vez admitidas éstas, correlacionar la ET con uno o varios factores que influyen en la misma. Se estableció entonces el término evapotranspiración potencial, el cual fue introducido a mediados del siglo XX de forma independiente por Penmann y Thornthwaite, en un intento de optimizar el contenido de humedad en el suelo y el desarrollo vegetal. A partir de los trabajos de estos autores se han desarrollado y publicado una gran variedad de métodos, lo que ha derivado en un cierto nivel de confusión, tanto desde el punto de vista hidrológico o agronómico, por la heterogeneidad de conceptos y supuestos de partida, como por la desconexión entre la disponibilidad de datos y la realidad física (Sánchez-Toribio, 1992). Desde los más sencillos como el de Thornthwaite hasta otros más complejos como los de Penmann-Montieth, el de Blaney-Criddle o el de Priestley-Taylor (Domingo *et al*., 2003).

En virtud de que la definición de evapotranspiración potencial resultaba poco útil, desde el punto de vista de su aplicación y daba origen a interpretaciones diversas, se desarrolló a nivel agronómico el concepto de evapotranspiración de referencia (ETr). Así se llegó a la conclusión (Montieth, 1965) que para obtener valores razonables de ETP, la cubierta vegetal debía quedar explícita en la definición de ETP. Por ello diversos autores utilizaron la ET de un cultivo específico a capacidad de campo, como la alfalfa (*Medicago sativa* L.) o gramíneas, dando lugar al concepto de ETr.

Se desarrollaron dos definiciones de ETP según el cultivo de referencia considerado. Doorenbos y Pruitt (1977) propusieron para la FAO la definición de evapotranspiración sobre gramíneas (se usa entonces la nomenclatura ETo). La segunda definición se basa en la alfalfa y fue desarrollada inicialmente por Jensen (1971). La ET a que da lugar es

diferente a la anterior ya que la alfalfa desarrolla una superficie aerodinámicamente más rugosa que las gramíneas (op. cit.).

Como la definición de ETr seguía sin dar lugar a un auténtico método estándar, en mayo de 1990 la FAO organizó una consulta entre expertos e investigadores en colaboración con la International Commission for Irrigation and Drainage (ICID) y con la World Meteorological Organization (WMO) en un intento de unificar terminología y conceptos y realizar una profunda revisión y actualización metodológica. Smith *et al*. (1990) propusieron una nueva definición basada en la ecuación de combinación de Penmann-Montieth, según la cual la ETo sería la tasa de ET de un cultivo hipotético con valores fijos de altura (12 cm), resistencia de la cubierta vegetal (70 s m^{-1}) y albedo (0.23), que representa la ET de una superficie extensa cubierta de gramíneas verdes, de altura uniforme y crecimiento activo, que cubre completamente el terreno y no padece de falta de agua.

Entre los diversos modelos basados en variables micro-meteorológicas y fisiológicas, el más conocido y de general aplicación es el modelo de evaporación de Penmann-Montieth derivado de la ecuación de combinación. Se llama así porque combina la ecuación del balance de energía y los gradientes de humedad, temperatura y velocidad del viento. Con ella se elimina la necesidad de medidas en la superficie evaporante y medidas a diversas alturas sobre la superficie como requieren los métodos del 'gradiente' y del 'perfil de viento', respectivamente, muy usados hasta la aparición de esta ecuación. Combina información meteorológica y fisiológica y asume que las copas vegetales pueden asemejarse a una superficie uniforme como única fuente de evaporación ('gran hoja' o 'big-leaf'), lo que supone una considerable simplificación de la realidad, particularmente cuando se aplica a cubiertas estratificadas (multicapas) o con distintas superficies evaporantes (multifuentes) (Domingo, 2003).

La distribución dispersa y agrupada en mosaicos de vegetación, característica de las zonas semiáridas constituye un ejemplo donde no se satisfacen las premisas de la aproximación de Penmann-Montieth, por lo que trabajos posteriores extendieron el modelo a dos o más

fuentes (Shuttleworth y Wallace, 1985; Choudhury y Montieth, 1988; Shuttleworth y Gurney, 1990). La interacción entre las fuentes se estudia como combinación de resistencias en serie y paralelo hasta una altura de referencia (zr) por encima de la vegetación, donde los efectos de la heterogeneidad espacial ya no son perceptibles (op. cit.).

Un aspecto criticable es que los modelos que toman de partida la ecuación de combinación, se basan en la teoría de difusión turbulenta (Teoría de la K, o en ingles *K-theory*) para describir los flujos de calor, vapor de agua y movimiento a través de las copas. El uso de esta teoría para vegetación dispersa ha sido cuestionado tanto desde el punto de vista teórico como observacional, ya que asume que la longitud característica de los remolinos dominantes sea menor que la distancia sobre la cual los gradientes cambian apreciablemente. Esto no siempre ocurre en el interior de los rodales de vegetación dispersa (op. cit.).

Otras aproximaciones son los modelos que describen el sistema físico formado por el sistema continuo suelo-planta-atmósfera (SVAT) en un perfil unidimensional desde una profundidad de suelo determinada hasta la copa vegetal (Figura 1). Dichos modelos no consideran los flujos de agua ni de energía y establecen que el suelo y la vegetación actúan como almacén de agua que se llena y vacía por diferentes entradas y salidas. Los flujos están regulados por determinados gradientes de concentración y determinadas resistencias. Se establecen diferentes capas tanto en suelo como en vegetación y es uno de los aspectos que diferencia unos modelos SVAT de otros, siendo más complejos cuanto mayor es el número de capas considerado. Los mayores inconvenientes de estas aproximaciones son las siguientes: un significativo esfuerzo en parametrización, sobre todo del suelo, la no consideración de la variabilidad espacial y la premisa de condiciones de estado estacionario entre el suelo y la vegetación.

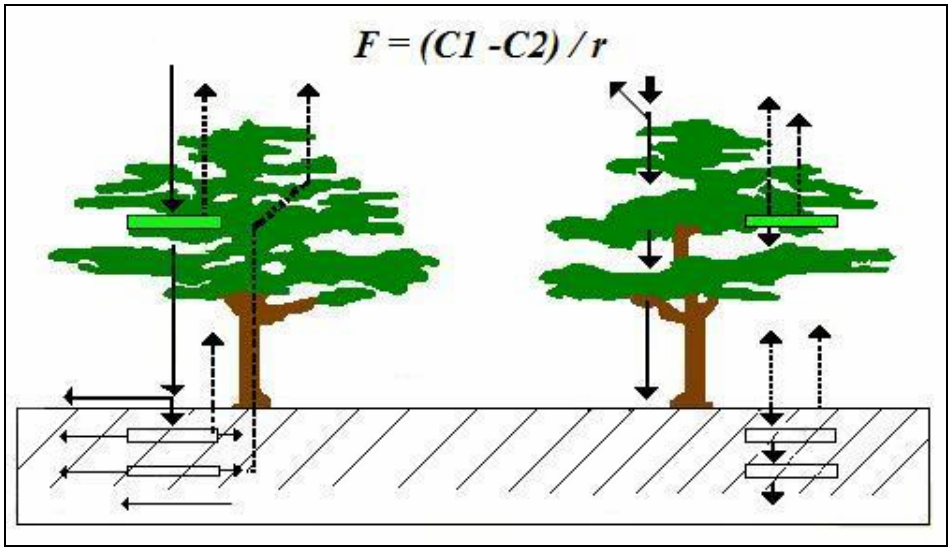


Figura 1. Representación simplificada del sistema físico formado por el sistema continuo suelo-planta-atmósfera (SVAT). Los flujos (F) están regulados por gradientes de concentración (C1-C2) y resistencias (r).

Cabreras (1995) formuló un modelo que garantiza una estimación adecuada de la evapotranspiración de la caña, pero al mismo tiempo consideró la simplicidad, facilidad de utilización, precisión y, sobre todo, la factibilidad de obtención de las variables del mismo; combinación de criterios que debe tomarse en cuenta si se quiere obtener el mejor entre distintos métodos. Dicho autor demostró que se puede formular un modelo matemático en el cual el factor cismático fundamental fuera la temperatura, siendo necesario considerar en su concepción elementos tan importantes como el posible potencial del cultivo de extraer agua del suelo, teniendo en cuenta sus necesidades variables de acuerdo a su estado de desarrollo, la fecha de plantación, variedad, cepa y esencialmente la humedad del suelo, aspectos no considerados en ese año. Dicho modelo fue el resultado de modificaciones al propuesto anteriormente por Blanney-Criddle (1950) donde la temperatura es más importante, agregando el factor de cultivo a su modelo para estimar la evapotranspiración.

De este modo el citado autor propuso el siguiente modelo cuya formulación general es:

$Et = K*F(T)$

Donde Et: es la evapotranspiración decenal, en mm
K: es un coeficiente
F(T): es la función temperatura.

En relación al coeficiente K, éste tiene en cuenta los efectos referidos anteriormente. Por definición, el coeficiente K quedó formulado de la siguiente manera:

$$K = Ke * Kc * Kv * Kfp * Kw * Ks$$

Donde el coeficiente Ke considera la edad del cultivo y el posible potencial de extraer agua del suelo, de acuerdo a su desarrollo; Kc la cepa; Kv la variedad; Kfp la fecha de plantación y cosecha; Kw la humedad del suelo; Ks el tipo de suelo.

Entre los métodos y técnicas instrumentales para medir la ET en un rodal (Figura 2) destacan el método de la tasa de Bowen y el de correlación o covarianza de flujos turbulentos o remolinos. Para medir flujos de las superficies evaporantes por separado, se utiliza el medidor del flujo de savia y los porómetros para medir la transpiración y conductancias estomáticas a nivel de planta y hoja, respectivamente, y los lisímetros para medir la evaporación del suelo.

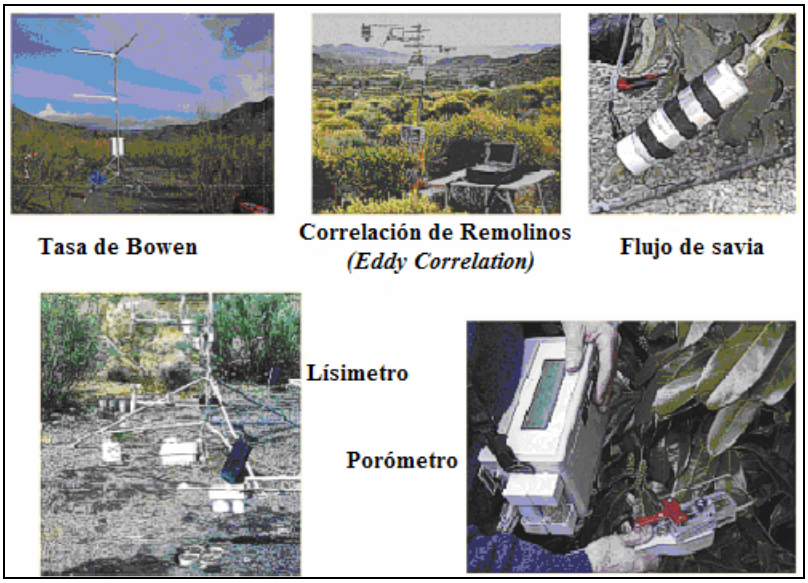


Figura 2. Métodos y técnicas instrumentales para medir la evapotranspiración más usados en la actualidad.

Las medidas directas de la ETP son usadas para la validación de modelos pero tienen también problemas intrínsecos. Funcionan en épocas en que los flujos sobrepasan un umbral impuesto por la resolución instrumental, por tanto fallan cuando los volúmenes de agua son bajos, requieren calibraciones periódicas, no son válidos cuando hay lluvia y requieren un 'fetch' o longitud de rodal suficiente para ser aplicados, lo que hace que los datos necesiten ser filtrados considerando orientaciones de viento concretas. Otro problema es que, aunque son útiles para validar modelos, esto sólo es posible realizarlo en períodos en los que funcionan adecuadamente.

Una comparación entre los diferentes métodos y técnicas de medida (Tabla I) resulta difícil ya que muchos de ellos fueron desarrollados para cubrir determinados objetivos no estrictamente comparables. La escala de medida es otra variable a tener en cuenta. Unos métodos se usan para cuantificar la ET sobre períodos de tiempo prolongados, de meses a años, mientras que otros son usados a una escala temporal de días, horas e incluso minutos. En general, los métodos que son usados para medir la ET en periodos cortos de tiempo están confinados a medidas sobre áreas pequeñas y viceversa (Domingo, 2003).

Tabla I. Diferentes métodos y técnicas de medida de la evapotranspiración, clasificados según su aplicación temporal y espacial.

CLASIFICACIÓN	MINUTO	HORA	DIA	MES	AÑO	DÉCADA
REGIÓN					BALANCE DE AGUA	
CUENCA		CORRELACIÓN DE REMOLINOS				
				BALANCE DE AGUA		
RODAL		BALANCE DE ENERGÍA (Bowen)				
		MÉTODO AERODINÁMICO				
	CORRELACIÓN DE REMOLINOS					
			LÍSIMETRO DE DRENAJE			
			INTERCEPCIÓN			
GRUPO DE PLANTAS			LÍSIMETRO DE PESADA			
			CÁMARA VENTILADA			
PLANTA		PLANTA CORTADA				
		FLUJO DE SAVIA				
TALLO	TALLO CORTADO					
		CÁMARA DE PRESIÓN				
HOJA	PORÓMETRO					

1.1.4. Concepto de balance hídrico.

Los valores de ETR obtenidos se comparan con los datos de precipitación para obtener el balance de humedad (Ortiz, 1988).

Una aplicación de la modelación de ET es el cálculo de balances hídricos. El drenaje (D) es difícil de obtener tanto de forma experimental como mediante la aplicación de modelos de base física. Si se puede medir la ET de forma fiable, se podrá estimar el drenaje a partir del balance hídrico. Además, la relación Pp-ET proporciona una valiosa información acerca del balance hídrico del área estudiada y sus implicaciones en su manejo. Si Pp >> ET la escorrentía será probablemente substancial y la regulación hídrica local será pobre. Por el contrario si Pp << ET, esto será indicativo de que hay otras fuentes de agua adicional aparte de la Pp local. Este procedimiento ha sido aplicado con éxito sobre el cauce de un arroyo con flujo de agua superficial discontinuo durante el año (Domingo *et al*., 2001) y parece prometedor el desarrollo de procedimientos para su aplicación en otras áreas de interés.

1.1.4.1. Déficit hídrico.

En el análisis del clima de las zonas áridas del mundo se requieren algunas medidas comparativas de aridez. Dos de las medidas más comunes de aridez son la relación de aridez denominada Budyko-Lettau y la relación hidrológica Pp/ETP. La relación Budyko-Lettau expresa la relación entre la energía radiante neta sobre la superficie de la Tierra y el calor requerido para evaporar la precipitación de un año. En lenguaje común, un valor de uno para este índice indica que el calor neto irradiado sobre la superficie es suficiente para evaporar la precipitación de un año. Este valor se observa cerca del límite entre el bosque y los pastizales.

La aplicación del índice mencionado a nivel mundial ha demostrado que las regiones áridas y semiáridas están más extendidas de lo que se suponía y que el proceso de desertificación puede ser considerado actualmente como uno de los llamados ‘problemas globales’, del

mismo orden de importancia que, por ejemplo, el calentamiento de la Tierra debido al uso de combustibles de origen fósil, entre otros. En una revisión comparativa, la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Desertificación encontró que las zonas con más riesgo al proceso de desertificación se encuentran entre las relaciones de sequías de 2 y 7. A valores mayores, la productividad biológica es tan baja que no puede soportar grandes poblaciones humanas, las cuales se agrupan alrededor o a lo largo de los principales oasis. A valores menores de 2 la vegetación es generalmente vigorosa como para recolonizar las áreas dañadas[5].

La relación Pp/ETP expresa mediante el cociente resultante a la precipitación como una fracción de la Evapotranspiración Potencial. Pp/ETP, representa la cantidad máxima de humedad que puede ser evaporada de la superficie y transpirada por la vegetación, si esta existiese. Este índice climático ha servido para caracterizar la aridez del paisaje y ha sido recomendado por el PNUMA (1992)[6], en la evaluación de la aridez a nivel global y actualmente es el adoptado por la Convención Internacional de Lucha Contra la Desertificación y la Sequía.
Es necesario precisar que este índice depende de factores exclusivamente climáticos y no toma en cuenta las características hidro-físicas del suelo y de la vegetación.

La Tabla II muestra la clasificación de las zonas climáticas a través de la relación entre Pp/ETP (PNUMA, 1992).

[5] www.globalbioclimatics.org Worldwide Bioclimatic Classification System. *Phytosociological Research Center;* www.ucm.es/info/cif/form/indices.htm
[6] Idem.

Tabla II. Zonas de aridez por la relación Pp/ETP (PNUMA, 1992).

Zona Climática	R=Pp/ETP	% de cobertura mundial
Hiperárido	R < 0.05 Actividades humanas muy limitadas alrededor de los oasis	7.5
Árido	0.05 < R < 0.20 El pastoreo es posible pero es altamente vulnerable a la variabilidad climática anual o a la disponibilidad de recursos de agua	12.5
Semiárido	0.20 < R < 0.50 Pastoreo sostenible. Agricultura susceptible en alto grado a la variabilidad climática interanual	12.5
Seco subhúmedo	0.50 < R < 0.65 Se practica ampliamente la agricultura de temporal	9.9
Climas más húmedos	R > 0.65	
-Húmedo		39.2
- Frío		13.6

Otra medida para establecer el grado de aridez y a su vez la falta de humedad en una región es la propuesta por De Martonne (1925) (Tabla III) que se expresa por medio de la siguiente fórmula:

$$\text{Índice de aridez} = \frac{P}{(T + 10)}$$

Donde:

P: Precipitación anual (cm).

T: Temperatura media anual (°C).

Tabla III. Tipos climáticos de acuerdo a De Martonne[7].

Ia	Clima
>60	Hiper-húmedo
60-30	Húmedo
30-20	Sub-húmedo
20-15	Semiárido (mediterráneo)
15-5	Árido (estepario)

El índice pluviosidad de Lang (1925)[8] establece la siguiente relación para definir la aridez y tipo de clima (Tabla IV).

$$\text{Indice de Lang (R)} = P/T$$

Donde:

P = Precipitación anual (mm).

T = Temperatura media anual (° C).

Tabla IV. Climas de acuerdo al Índice de Lang.

R	Clima
>160	Húmedo
160-100	Templado húmedo
100-60	Templado cálido
60-40	Semiárido
0-40	Estepario

[7] www.globalbioclimatics.org Worldwide Bioclimatic Classification System. *Phytosociological Research Center;* www.ucm.es/info/cif/form/indices.htm.
[8] www.ucm.es/info/cif/form/indices.htm. consultado en enero 2006.

1.1.5. La fisiología de la planta y la resistencia al déficit hídrico.

Las plantas en su relación con el ambiente en que se desarrollan, pueden ser analizadas mediante la teoría de los sistemas abiertos, es decir sistemas orgánicos complejos que intercambian materia y energía con su ambiente inmediato. Una hoja de cualquier vegetal fotosintetizada intercambia materia, nutrientes del suelo, agua y recibe energía solar, a su vez elimina hacia el ambiente oxígeno, materia orgánica en forma de hojas y exudados orgánicos (Figura 3), es decir, cumple con la definición de un sistema abierto. Este sistema abierto está influenciado por el medio que lo rodea, por lo que todas sus funciones se ven afectadas de una u otra manera por factores como la temperatura, humedad, disponibilidad de agua, radiación, presión atmosférica, otros. Esto quiere decir, que las condiciones que lo rodean afectan el funcionamiento de este sistema abierto, de manera que una especie cualquiera, natural o cultivada en un ambiente determinado deberá ajustar sus mecanismos fisiológicos y morfológicos ante un ambiente cambiante, exhibiendo una respuesta que se traduce en determinada respuesta morfológica (altura, tamaño de hoja, productividad) y fisiológica (respiración y fotosíntesis a ciertos niveles, producción de determinados compuestos orgánicos) que se pueden estudiar o investigar con métodos adecuados para conocer la mejor condición para la producción o productividad (Grajales, 2004).

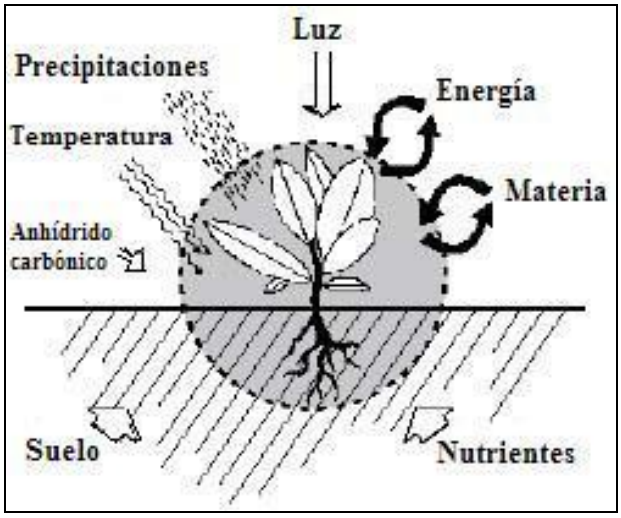


Figura 3. La planta un sistema abierto.

Es necesario tener en cuenta que las plantas pueden exhibir varias respuestas al cambio de condiciones ambientales. Por lo tanto, se debe hablar de posibles respuestas de las plantas frente a un ambiente determinado. Se debe tener en cuenta que existe cierta plasticidad genética que permite a las especies expresarse, dentro de ciertos límites, fenotipicamente, es decir, manifestar sus expresiones morfológicas que están fuertemente influenciadas por efectos ambientales tales como la disponibilidad de agua, nutrientes, condiciones de radiación, temperatura y otros factores que la llevan en definitiva a obtener una morfología y fisiología adaptadas a su ambiente.

1.1.5.1. Sistema fotosintético y metabólico.

a) Sistema fotosintético: el crecimiento y desarrollo de las plantas están estrechamente relacionados al medio. Por ejemplo, la radiación solar es un factor que participa directamente en la fotosíntesis, al igual que el agua, minerales, CO_2, O_2 y temperatura. A su vez, todos estos factores afectan el crecimiento, el transporte de nutrientes, la respiración y la transpiración, procesos que están involucrados en la producción vegetal.

Aunque la cantidad de agua utilizada directamente en las reacciones de la fotosíntesis es pequeña en comparación con la transpirada o almacenada por las plantas en cualquier tiempo dado, la condición hídrica de la planta influye significativamente en el crecimiento de la misma y en la producción de biomasa, en particular a través de sus efectos en la expansión de la hoja y de la raíz. La tasa de fotosíntesis de la copa de un vegetal (equivalente a la producción de biomasa) también disminuirá con la escasez de agua debido al cierre de estomas y al efecto del déficit hídrico en los procesos de los cloroplastos.

La disminución de la fotosíntesis se atribuye principalmente al cierre estomático, aunque existen otras causas como el incremento de la resistencia al flujo de CO_2 a nivel de las

células del mesófilo, lo que disminuye el paso desde la superficie celular hasta el interior del cloroplasto y la alteración de los procesos fotoquímicos en las membranas tilacoidales[9].

A nivel de los mecanismos de la fotosíntesis, la falta de agua puede afectar los sistemas cosechadores de luz de los tilacoides, así como la cadena transportadora de electrones, los sistemas transductores de energía (fosforilación y producción de ATP), el ciclo de reducción fotosintético del carbón en el estroma de los cloroplastos y la utilización de los asimilados. Como consecuencia, afecta el rendimiento cuántico (moles de CO_2 por moles de fotones absorbidos) y la fotosíntesis máxima. Existe evidencia de que en hojas relativamente estresadas por falta de agua se mantiene el transporte de electrones y que se produce un estado más reducido en los fotosistemas del cloroplasto. Esto proviene de tres situaciones: el incremento de la fluorescencia de la clorofila, el mantenimiento de estados altamente reducidos en los nucleótidos de piridina y la fotoinhibición (Grajales, 2004).

Las plantas C3 y C4 presentan diferencias en cuanto a su fotosíntesis neta (Fn). En ambos casos la fotosíntesis se ve afectada negativamente cuando disminuyen los potenciales totales, osmóticos y de turgencia. Los cambios en los potenciales hídricos en algunos períodos del día disminuyen la tasa de asimilación casi linealmente a la disminución de los potenciales, con lo cual se reduce la fotosíntesis, pudiendo detenerse completamente.

En condiciones naturales, generalmente el déficit hídrico se encuentra asociado al estrés térmico (altas temperaturas). Es difícil separar ambos efectos en las plantas. Así por ejemplo, el déficit hídrico produce el cierre de los estomas, lo que a su vez provoca una disminución en la tasa de transpiración y por lo tanto la disipación de calor también se ve afectada, con el consiguiente incremento de la temperatura foliar (op. cit.). Rizhsky ***et al.*** (2004) encontraron que bajo estrés de calor las plantas de *Arabidopsis* aceleraron la respiración y la apertura de estomas, mientras que en sequía, se inhibió la fotosíntesis y se cerraron los estomas. En contraste, la combinación del estrés incrementó la respiración simultáneamente a la inhibición de la fotosíntesis.

[9] http://www.condensan.org/publicacion/Libro05/index.html.

b) Sistema metabólico: cuando un vegetal se somete por primera vez a un factor de estrés, el organismo crea una reacción de alarma por lo cual algunas de sus funciones metabólicas se alteran, provocando una respuesta. Posteriormente vendrá una fase de resistencia, en la cual la planta se adaptará al factor estresante, retornando la función a la normalidad. Sí este factor de estrés continua por un largo tiempo, la planta llegará a un estado de agotamiento, en el cual su función puede modificarse nuevamente o producir la muerte de la planta en el caso que el factor estresante se mantenga. Bawa (1993) señaló que la acumulación de prolina libre es un mecanismo de resistencia al déficit hídrico en las plantas de zonas áridas.

La salinidad y el estrés hídrico son los factores abióticos más importantes que limitan la productividad agrícola en áreas propensas a sequía. Una vía para solucionar esto es crear cultivos tolerantes al estrés. Esto es difícil porque la tolerancia al estrés esta regulado por varios genes. Sin embargo la ingeniería genética ofrece una alternativa para lograr el objetivo. Existen varios elementos que se pueden utilizar, uno de ellos es por la acumulación de osmo-protectores. El osmolito manitol es sintetizado en varias plantas. La acumulación de manitol se incrementa cuando las plantas se exponen a un potencial hídrico bajo; dicha acumulación se regula por la inhibición de las vías que disminuyen su catabolismo (Tilahun, 2003). Asimismo, la respuesta de las plantas a estos tipos de estrés muestra la plasticidad genética para regular su respuesta en condiciones de campo, donde se incluye un grupo de factores de transcripción que la regulan (Rizhsky, 2004).

Al efectuar un primer análisis de la reacción de las plantas con déficit hídrico, lo primero que se observa es el cierre de estomas y la consiguiente pérdida de agua (Figura 4). No obstante, este mecanismo, aparentemente simple y destinado sólo a evitar la caída del potencial hídrico, engloba una serie de ajustes fisiológicos y metabólicos colaterales que incluyen, entre otros, la disminución de la fotosíntesis y alteraciones en la translocación y distribución de fotoasimilados, hechos que tienen trascendencia significativa en el funcionamiento normal de la planta. Si bien el cierre estomático obedece a un déficit hídrico, no se conoce con exactitud el mecanismo que causa dicha respuesta, aunque en diversas plantas ya se ha demostrado que en este proceso estarían involucrados dos

sistemas de señales: uno mediado por la hormona ácido abscísico (ABA) y otro que actuaría a nivel genético (Grajales, 2004). Con relación a este último, la demostración de que el estrés hídrico produce alteraciones a nivel postranscripcional que afecta los mRNA y la translocación, hace suponer la existencia de una secuencia de interacciones que funcionarían en forma asociada a nivel de la expresión de los genes. Además de esta respuesta primaria de carácter inmediato que se produce en las plantas sometidas a estrés hídrico, existen otros mecanismos mediante los cuales ciertas plantas logran adaptarse y soportar los cambios que ocurren en su potencial hídrico a consecuencia de la escasez de agua o la salinidad elevada. El estrés hídrico incrementa la concentración de carbohidratos solubles en las plantas (Tilahun, 2003). El análisis de metabolitos asociados al estrés en hojas de *Arabidopsis*, mostró altos niveles de sacarosa y otros azúcares como son maltosa, melibiosa, gulosa y manitol (Rizhsky, 2004).

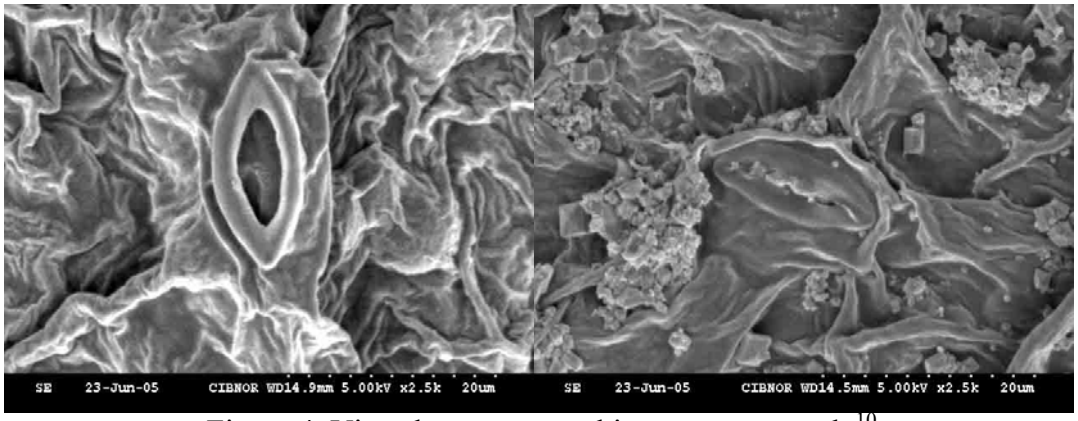


Figura 4. Vista de un estoma abierto y uno cerrado[10].

Los mecanismos adaptativos son variados e incluyen la síntesis de ciertos metabolitos como aminoácidos, aminas cuaternarias, azúcares solubles, polioles, poliaminas, compuestos de sulfonio, fructanos y pigmentos (carotenoides, antocianos, betalaínas)[11]. En general, se trata de compuestos de peso molecular bajo y amplia distribución, cuya acumulación en la célula no resulta incompatible con la estabilidad de las proteínas presentes en el citoplasma, lo que ha llevado a denominar a dichas sustancias como osmolitos compatibles.

[10] Imagen del envés de una hoja de chiltepin, tomada en el Laboratorio de Microscopía Electrónica del CIBNOR S.C. Cortesía del Tec. Ariel Arturo Cruz Villacorta y del Dr. Vladimir Lebsky K.
[11] http://www.condensan.org/publicacion/Libro05/index.html.

La acumulación de un determinado osmolito no parece estar restringido a ningún grupo taxonómico en particular, lo cual descarta un origen evolutivo común. No obstante, en algunos casos la presencia de un cierto metabolito parece ser específica para un orden o familia vegetal, tal como ocurre con la acumulación de compuestos cuaternarios de amonio (glicin-betaína) en las *Chenopodiaceae*. Además de los compuestos mencionados, algunas especies son capaces de acumular ciertos iones, como el potasio. Rabbani *et al.* (2003) identificaron 62 genes responsables en la inducción de ABA, en plantas de arroz, bajo condiciones de estrés.

A nivel metabólico las plantas alteran dos rutas metabólicas, la glucólisis y el ciclo del ácido cítrico, en las mismas se encuentra la viabilidad de continuar con otras rutas, sea para metabolismo de otras moléculas primarias o bien para producir metabolitos secundarios.

La glucólisis es la primera vía de aporte de energía al sistema metabólico, a través de la degradación de azúcares y liberación de ATP. El ciclo del ácido cítrico es la parte media y central del proceso de respiración, clave de la supervivencia metabólica de la célula, en donde los intermedios del ciclo son utilizados también como precursores en la biosíntesis de aminoácidos y otras biomoléculas (Grajales, 2004).

En investigaciones recientes se ha relacionado al ácido abscísico (ABA) como un elemento clave en la resistencia a la sequía por parte de los vegetales (Koiwai, 2004; Grajales, 2004). Iuchi *et al*. (2000) encontraron en *Vigna unguiculata*, que la VuNCED1 cDNA codifica a 9-cis-epoxicarotenoide dioxigenasa, que ejerce un papel importante en la síntesis de ABA en condiciones de estrés hídrico, localizado en los plastidos.

1.2. Objetivos.

General

- Estimar la evapotranspiración potencial y el déficit hídrico en un agostadero representativo de matorral sarcocaule en La Paz, Baja California Sur.

Particulares

- Describir la tendencia intranual de los elementos del clima registrados en las estaciones climáticas de la zona de La Paz, Baja California Sur.

- Estimar la evapotranspiración potencial con datos climáticos de temperatura, evaporación y precipitación, en La Paz, Baja California Sur.

- Caracterizar el régimen hidrológico y la disponibilidad de humedad ambiental (Índice hidro-ambiental) presente en el agostadero de la región de La Paz, Baja California Sur, a partir de los datos de precipitación y evapotranspiración potencial promedio mensual.

1.3. Hipótesis.

a) A través de la aplicación y adaptación de modelos hidro-matemáticos, se logrará comprobar que la evapotranspiración potencial es mayor que la precipitación durante la mayor parte del año.

b) Se reconoce la tendencia bi-estacional de la precipitación y mediante análisis estocástico y multivariado se dilucidara su variabilidad e impacto sobre el proceso de evapotranspiración.

c) La evapotranspiración potencial influye en la respuesta del balance hidrológico expresado mediante el déficit hídrico.

d) El déficit hídrico es mayor de cero para la mayor parte del año y mas acentuado para los meses con mayor expresión de aridez (febrero-julio), lo cual puede modelarse mediante correlaciones con indicadores de humedad.

e) El índice de De Martonne refleja una baja sensibilidad numérica ante las condiciones extremas de sequía por lo cual el uso de un coeficiente escalar resulta apropiado para su aplicación en estas regiones

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Localización del área de estudio.

La Paz, Baja California Sur se encuentra al sureste de la Península de Baja California, en la región de la cuenca La Paz-Carrizal, con una extensión de 4,500 km^2; en su colindancia tiene las características de una laguna costera. Abarca al norte hasta el ejido Chametla y El Centenario, al sur San Pedro y el Valle de Los Planes, El Sargento, San Juan de los Planes y Juan Domínguez Cota (Figura 5).

Ante la falta de agua superficial, se ha tenido la necesidad de perforar pozos para extraer agua del acuífero y como en la mayoría de los acuíferos del Estado de Baja California Sur, el de La Paz se encuentra sobreexplotado y además con intrusión salina; el área está caracterizada por suelos arenosos profundos, con escasa pendiente disectada por numerosos arroyos que conducen aguas pluviales intensas al término de lluvias copiosas.

Figura 5. Ubicación de la zona de estudio. La Paz, BCS.

2.2. Clima y vegetación.

El clima en la zona de La Paz es del tipo BW(h')hw(e) es decir, muy árido, seco, cálido, con precipitación invernal superior a 10% del total anual. Enero y agosto presentan los valores extremos de temperatura ambiental, 12° C mínima y 24° C máxima, así como 26° C mínima y 44° C máxima, respectivamente. Los datos de la precipitación pluvial revelan niveles máximos de 460 mm de precipitación total anual y mínimos de solo 20 mm; el promedio es de 180 mm. El período estival, abril a julio, se caracteriza por los elevados niveles de radiación solar que favorecen el registro de las mayores temperaturas ambientales del año de hasta 45° C a la sombra[12].

Desde el punto de vista florístico, el área silvestre es representativa de la comunidad reconocida como Matorral Sarcocaule. En el paisaje, las cactáceas y leguminosas son las familias que aportan un considerable número de especies que dominan fisonómicamente el paisaje. A nivel de asociación vegetal, el área de La Paz puede designarse como "cardonal" por la dominancia del cardón *Pachycereus pringlei*. Sin embargo otras especies que aportan sus atributos al paisaje son el mezquite *Prosopis articulata*, la pitaya agria *Stenocereus gummosus*, la pitaya dulce *Stenocereus thurberi*, el garambullo *Lophocereus schottii* var. *australis*, la choya *Opuntia cholla*, el palo fierro *Olneya teosota*, el torote *Bursera microphylla*, el palo brea *Cercidium praecox*, el ciruelo *Cyrtocarpa edulis* y otras más. El término "sarcocaule" se refiere al aspecto grueso, suculento y hasta tortuoso de los tallos de los dominantes fisonómicos. Las cactáceas constituyen una familia importante en esta superficie; además de algunas arriba citadas, también se encuentran otras menos comunes, como el viejito *Cochemia poselgeri*, la biznaga *Ferocactus peninsulae* y la rajamatraca *Wilcoxia striata*[13].

Ubicada dentro de una planicie costera aluvial, la comunidad vegetal se encuentra en dos condiciones topográficas: la más extendida en superficie es la planicie aluvial propiamente,

[12] http://www.cibnor.mx/colecciones/reserva/ereserva.html
[13] Idem.

en donde el espaciamiento entre los individuos es mayor y su cobertura es notoriamente menor. En relación con aquellos ubicados en el borde de los arroyos, esta segunda condición es la más restringida en superficie, aquí los componentes arbóreos son más robustos y tienden a retener las hojas por más tiempo que aquellos sobre la planicie. Además, bajo el dosel de los vegetales de los arroyos, el micro-ambiente que se crea permite que tanto las especies anuales como las perennes de consistencia herbácea, prolonguen su ciclo de vida en relación con las encontradas en la planicie.

Entre las especies anuales más comunes se encuentra el mochito *Boerhaavia* spp., la hierba de la chinche *Pectis multiseta*, el quelite *Amaranthus palmeri*, la verdolaga *Trianthema portulacastrum* y la manzanilla *Perityle* spp.

Asimsmo, el grupo de trepadoras caracterizan el paisaje al término de las temporada de lluvias, entre estas destacan por su abundancia el san miguel *Antigonon leptopus*, la tronadora *Cardiospermum corindum*, el melón de coyote *Ibervillea sonorae*. Entre las parasitas destacan el tojí *Phrigyllanthus sonorae* y *Phoradendron diguetianum*.

Entre la vegetación costera característica de las inmediaciones, se encuentra la correspondiente de las asociaciones de salitrales o saladares, así como dunas costeras y manglar. Cabe señalar que la vegetación de ambientes costeros prácticamente ha desaparecido de la Bahía de La Paz; únicamente en el sector próximo al Comitán se sostiene como una superficie poco alterada (dunas de El Mogote y estero Zacatecas)[14].

2.3. Suelo.

El suelo predominante es del tipo Yermosol, denominado en la nueva clasificación de suelos de FAO (2000) como Arenosol. Son de color claro, de textura arenosa, con pH que tiende a la alcalinidad. Suelos de baja capacidad de retención de humedad, lo que los hace de baja productividad agropecuaria, en tanto no sean manejados bajo condiciones de riego.

[14] Idem.

La profundidad del suelo varía entre los 30-100 cm, y en algunos puntos puede ser un poco mayor. Son suelos que se encuentran dentro de una planicie costera, aunque en algunos puntos se elevan unos metros originando pendientes que favorecen la formación de cárcavas de baja profundidad[15].

2.4. Materiales.

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizaron los datos climáticos de cuatro estaciones climáticas (Anexo 1). La primera estación climática fue la del Aeropuerto de la Ciudad de La Paz, la cual pertenece al Servicio a la Navegación del Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM) y que cuenta con un archivo de 1998 a la fecha. La segunda estación se encuentra ubicada en la Ciudad de La Paz, cuenta con datos desde 1940. La tercera estación, Alfredo V. Bonfil, se encuentra a 28 km al norte de la Ciudad de La Paz, que también cuenta con datos desde 1940 y la última fue el Observatorio de la Ciudad de La Paz, con datos del año de 1997 a la fecha. Estas tres últimas estaciones pertenecen al Sistema Meteorológico Nacional (SMN-CNA). Es importante señalar que dichas estaciones se encuentran a una distancia no mayor de 25 km y su posición geográfica no sobrepasa el minuto de latitud y/o longitud de diferencia, así como los 70 m de altitud entre ellas (Figura 6).

[15] Idem.

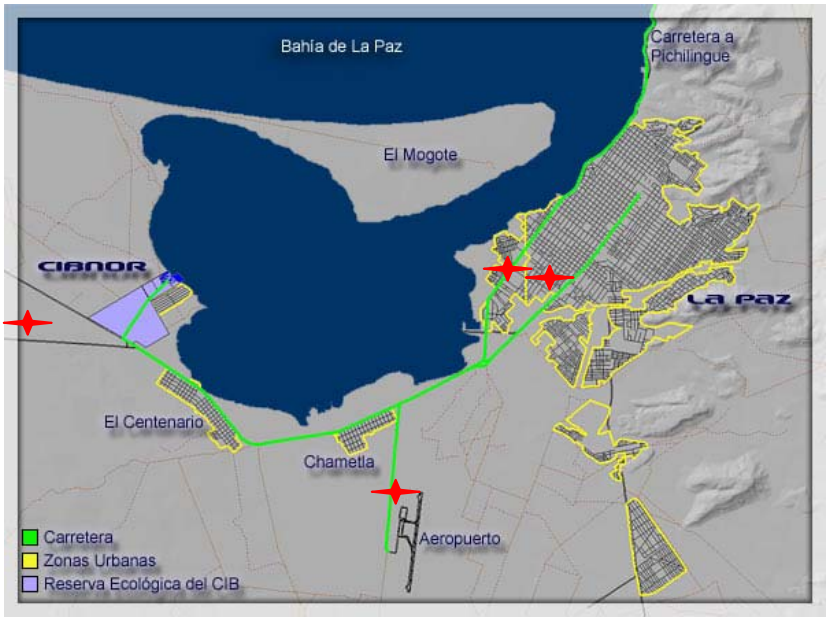


Figura 6. Ubicación de la las estaciones climáticas analizadas. La Paz, BCS.(✦)

De la información recabada, se calcularon los datos diarios de temperatura: máxima, mínima y media; precipitación y evaporación. Sólo de la estación climática del Aeropuerto no se tuvieron datos de evaporación. Asimismo los datos de radiación solar, presión atmosférica y velocidad del viento, estuvieron disponibles únicamente en el Observatorio de La Paz.

Posteriormente se calculó el valor diario y mensual de evapotranspiración y se estableció el valor del índice de disponibilidad hidro-ambiental, de acuerdo al método de De Martonne, modificado por Troyo-Diéguez *et al.* (2004).

2.5. Métodos.

2.5.1. Variables.

a) Temperatura.

b) Evaporación.

c) Precipitación.

d) Evapotranspiración potencial.

La determinación de la evapotranspiración se realizó por los siguientes métodos:

1) Método del tanque de evaporación: Este método consiste en utilizar los datos diarios o promedio mensual de evaporación obtenidos en la tina de evaporación y multiplicarlos por un factor adimensional, que depende de la humedad ambiental, velocidad del viento y cobertura del terreno, mediante la siguiente fórmula:

$$ETP = Evaporación * C$$

Donde *C* toma valores de 0.35 hasta 0.85 (Aguilera y Martínez, 1990).

Para el caso del presente estudio, se utilizó el coeficiente C = 0.8.

2) Método de Thornthwaite: El autor propuso su fórmula en base al efecto que tiene la temperatura sobre la pérdida de agua en los organismos vivos. La fórmula es la siguiente.

$$ETP = 1.6 * \left[\frac{10*t}{I}\right]^{a}$$

Donde: t = temperatura media mensual.

I = Índice térmico de la zona.

$a = 0.675I^3 * 10^{-6} - 0.771I^2 * 10^{-4} + 0.01792I + 0.49239$

El índice térmico de la zona (I) es un valor anual que se obtiene mediante la suma de los doce índices de calor (*i*):

$$i = \left[\frac{t}{5}\right]^{1.514} \qquad I = \sum_{1}^{12} i$$

3) Método de Penmann: La ecuación de Penmann incluye dos términos, el primero es un término de radiación y el segundo constituye un término aerodinámico, a través de la siguiente fórmula.

$$ETP = \frac{\Delta \left[(1\text{-}r)\ Rs\text{-}OTK^4\ \ (0.56\text{-}0.09\ 1d)\ (0.1\text{+}0.9\ n/N)\right] + y\left[0.35\ (1_a\ \text{-}1_d)\ (1.0U_2\ /100)\right]}{\Delta\ +\ y}$$

Donde:

r = Coeficiente de reflexión del agua = 0.05
Rs = Radiación solar de onda corta estimada a partir de:
$Rs = a + b\ (n/N)\ Ra$
Donde Ra es la radiación extraterrestre.
n/N = Relación entre insolación y duración máxima del día.
1_d = Presión de vapor.
1_a = Presión de vapor a saturación.
U_2 = Velocidad del viento a 2 m.
T = Temperatura media del aire K^4
O = Constante de Stejan Blizman.
Δ = Tasa de cambio de presión saturación con la temperatura.
y = Constante psicrométrica.

4) Método de Penmann-Montieth: Entre los diversos modelos basados en variables micro-meteorológicas y fisiológicas, el más conocido y de aplicación general es el modelo de evaporación de Penmann-Montieth derivado de la ecuación de combinación (Domingo, 2003). Se llama así porque combina la ecuación del balance de energía y los gradientes de humedad, temperatura y velocidad del viento. Con ella se elimina la necesidad de medidas en la superficie evaporante y medidas a diversas alturas sobre la superficie como requieren los métodos del 'gradiente' y del 'perfil de viento', respectivamente, muy usados hasta la aparición de esta ecuación.

Se recomienda este método cuando se dispone de información sobre la temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar. Este método se representa por la siguiente ecuación (Villaman, 2003):

$$ETo = (1/\lambda)\left[\left[\Delta / \Delta + \gamma'\right](R_n - S) + \left[\gamma / \Delta + \gamma'\right]\left[0.622 * (K_1\, \lambda\rho) / P\right](e_s - e_a)/r_a\right]$$

Donde:
ETo = Evapotranspiración del cultivo de referencia (cm día^{-1}).
λ = Calor latente de vaporización del agua (cal cm^{-1}).
Rn = Radiación neta (cal cm^{-2} día^{-1}).
S = Flujo de calor del suelo (cal cm^{-2} día^{-1}).
Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor (mbar º C^{-1}).
γ = Constante psicrométrica (mbar º C^{-1}).
γ' = Constante psicrométrica ajustada (mbar º C^{-1}).
K_1 = Coeficiente de proporcionalidad para asegurar que ambos términos tienen las mismas unidades.
P = Presión barométrica media (mbar).
e_s = Presión de vapor media a saturación (mbar).
e_a = Presión de vapor actual (mbar).
r_a = Resistencia aerodinámica al calor sensible y la transferencia de vapor (día km^{-1}).

e) Déficit hídrico.

Se estableció la estación de crecimiento de acuerdo al método de la FAO (1978) citado por (Ortiz, 1988), que correlaciona los valores promedio mensual de precipitación y ETP en forma gráfica. Asimismo se calcularon los índices de aridez de acuerdo a los métodos propuestos por el PNUMA, De Martonne y Lang, que fueron explicados anteriormente.

f) Índice de disponibilidad hidro-ambiental**.**

Se calculó este índice de acuerdo al método de De Martonne, modificado por Troyo-Diéguez *et al.* (2004), bajo la consideración siguiente:

$$\text{Índice de aridez} = \frac{P}{T + 10}$$

Donde:

P: Precipitación anual (cm).

T: Temperatura media anual (° C).

El planteamiento surge ante la necesidad de contar con un índice que muestre un valor con mayor sensibilidad para la interpretación, cuya escala este limitada de 0 a 10 unidades, donde aplique sólo a condiciones de precipitación menor a 90 mm mensuales, característico de las zonas áridas. Dicha función fue definida de la siguiente forma:

$$IDHA = Ke * \left[(Pp*12) / (T^{o}C+10)\right] \qquad \textbf{\textit{Ecuación (1)}}$$

Donde:
IDHA: Índice de disponibilidad hidro-ambiental.
Pp: Precipitación mensual (mm).
T: Temperatura media mensual (º C).
Ke: Coeficiente adimensional de ajuste de escala con valor 0.33.

Por consiguiente se obtiene:

$$IDDH = 10 - IDHA \qquad \textbf{\textit{Ecuación (2)}}$$

Donde: IDDH es el índice de déficit hidro-ambiental.

Cabe aclarar que el **Ke** de la ***Ecuación 1*** propuesto para modificar el índice de De Martonne, fue establecido con el valor de 0.33, dado que bajo las condiciones de aridez de la zona de estudio, ajusta con mayor sensibilidad numérica a la variación de los periodos de sequía. Dichos cálculos se realizaron para cada estación climática analizada de manera individual.

2.5.2. Pruebas estadísticas.

Con la información de las estaciones climáticas de La Paz, Alfredo V. Bonfil y Observatorio La Paz (SMN-CNA) y del Aeropuerto de La Paz (SENEAM) (datos de temperatura, precipitación, evaporación), se realizó el cálculo de la evapotranspiración potencial para su análisis.

Al contar con mayor número de variables climáticas en el Observatorio La Paz, se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP), para encontrar el efecto que sobre la evapotranspiración potencial presentan las distintas variables climáticas evaluadas en el presente estudio. Posteriormente se realizó un Análisis de Regresión Múltiple empleando para tales casos, el Paquete Estadístico STATGRAPHICS[16].

El ACP se realizó en virtud de que las investigaciones de campo, donde se presenta el efecto de un número significativo de factores, como es el caso del estudio de la ETP, no es adecuado realizar inferencias con análisis uni-variados, porque además de individualizar los resultados, éstos pueden conducir a conclusiones falsas (Escobar-Hernández, 2005). El ACP es quizás la técnica más antigua de análisis multivariante. Su introducción se debe, como en innumerables ocasiones en estadística, a Pearson (1901), pero su verdadero desarrollo y aplicabilidad se le debe a Hotelling (1933) (Almenara-Barrios, 2002).

Este tipo de análisis ha sido utilizado en investigación exploratoria, donde las variables a estudiar son numerosas. Se considera que un componente principal (CP) es una representación de la estructura de los datos en observación que resulta de una matriz de análisis de número *k* de variables, con *n* observaciones. En este método se obtienen tantos componentes como variables se analicen. Como parte de los resultados se generan nuevas variables derivadas de las variables originales, con dimensionalidad reducida pero con la mínima pérdida de información. Según el análisis secuencial de la disgregación de la varianza numérica, el CP más importante es aquél que presenta la mayor varianza lo que significa que constituye la mejor representación para explicar el objeto de estudio. En cada CP resultante, se valora la participación de cada variable en estudio para la construcción de una función lineal (eje vector) en el objeto de estudio. Además de lo anterior, el método proporciona los valores correspondientes a coordenadas, que al ser graficados, sugieren las tendencias de dispersión y agrupamiento con lo que es posible realizar las clasificaciones y caracterizaciones de las observaciones tomando en cuenta la influencia de las variables que las componen (Escobar-Hernández, 2005).

16 STATGRAPHICS Plus 5.1. (Statistical Graphics Corp., 2000) DR.

La idea central del ACP es conseguir la simplificación de un conjunto de datos, generalmente cuantitativos, procedentes de un conjunto de variables interrelacionadas. Este objetivo se alcanza obteniendo, a partir de combinaciones lineales de las variables originalmente medidas, un nuevo conjunto de igual número de variables, no correlacionadas, llamadas componentes principales en las cuales permanece la variabilidad presente en los datos originales, y que al ordenarlas decrecientemente por su varianza, permite explicar el fenómeno de estudio con los primeros CP. Con ello se consigue: (a) sintetizar la información procedente de un volumen importante de datos recogidos en una investigación en particular; (b) crear nuevos indicadores o índices, representados por los CP y (c) utilizar el ACP como paso previo a otras técnicas.

Los supuestos teóricos del ACP se centran en suponer que X es un vector de *p* variables aleatorias, definidas en una población. Y que el vector X se mide en *n* individuos, generando una matriz de datos con *n* filas que representan las variables en los que se han obtenido los datos que representan las *p* columnas.

Se buscan las combinaciones lineales del tipo: $Y_k = a_{k1}\, x_1 + ... + a_{kp}\, x_p = a\, a_{kj}\, x_j$, $k = 1,...,p$, donde $a_{k1},...,a_{kp}$ son constantes numéricas, de tal forma que las nuevas variables Y_k o CP tengan varianza máxima en orden decreciente y ausencia de correlación entre sí. Los CP Y_k se obtienen diagonalizando la matriz de covarianzas S o la de correlaciones R de las variables medidas originalmente, de forma que las constantes $a_{k1},...,a_{kp}$ se obtienen con las coordenadas de los vectores propios asociados a los valores propios de S o R, ordenados de forma decreciente, que representan las varianzas de los CP (Almenara-Barrios, 2002).

Para la derivación de los CP se parte del supuesto que $\mathbf{X}^T = [X_1, ..., X_p]$ es una variable aleatoria *p*-dimensional con media $\boldsymbol{\mu}$ y matriz de covarianzas $\sum$. El problema es encontrar un nuevo conjunto de variables, digamos $Y_1, Y_2, ..., Y_p$, las cuales son no correlacionadas y cuyas varianzas son decrecientes de la primera a la última. Cada Y_j será una combinación lineal de las *X*'s, de manera que

$$Y_j = a_{1j}X_1 + a_{2j}X_2 + \ldots + a_{pj}X_p$$
$$= \mathbf{a}_j^T \mathbf{X}$$

Donde $\mathbf{a}_j^T = [a_{1j,\ldots,} a_{pj}]$ es un vector de constantes. La ecuación anterior contiene un factor de escala arbitrario. Por lo tanto, se impone la condición $\mathbf{a}_j^T \mathbf{a}_j = \sum_{k=1}^{p} a_{kj}^2 = 1$. Esta normalización asegura que las distancias en el *p*-espacio se preservan.

El primer componente principal, Y_1, se encuentra eligiendo $\mathbf{a}_1$ de manera tal que la varianza de Y_1 se maximiza. En otras palabras, se elige $\mathbf{a}_1$ de manera tal que se maximice la varianza de $\mathbf{a}_1^T \mathbf{X}$ sujeta a la condición $\mathbf{a}_1^T \mathbf{a}_1 = 1$. Se puede demostrar que el valor máximo de la varianza de $\mathbf{a}_1^T \mathbf{X}$ entre todos los vectores $\mathbf{a}_1$ que satisfacen $\mathbf{a}_1^T \mathbf{a}_1 = 1$ es igual a λ_1, el eigenvalor más grande de Σ, y que este máximo ocurre cuando $\mathbf{a}_1$ es un eigenvector de Σ correspondiente al eigenvalor λ_1.

El segundo componente principal, Y_2, se encuentra eligiendo $\mathbf{a}_2$ de manera tal que Y_2 tenga la mayor varianza posible para todas las combinaciones de la forma de la ecuación inicial, las cuales no están correlacionadas con Y_1. Es decir, $\mathbf{a}_2$ se elige de modo que la varianza de $\mathbf{a}_2^T \mathbf{X}$ sea un máximo entre todas las combinaciones lineales de $\mathbf{X}$ que no están correlacionadas con la primera variable componente principal y tenga $\mathbf{a}_2^T \mathbf{a}_2 = 1$. Se puede demostrar que el máximo indicado arriba es igual a λ_2, el segundo eigenvalor más grande de Σ, y que este máximo ocurre cuando $\mathbf{a}_2$ es un eigenvector de Σ correspondiente al eigenvalor λ_2.

De manera similar, pueden definirse los componentes principales restantes $Y_3,\ldots,Y_p$. La *j*-ésima componente principal (j = 3,4,..., p) se expresa por $\mathbf{a}_j^T \mathbf{X}$ en donde $\mathbf{a}_j$ se elige de modo que $\mathbf{a}_j^T \mathbf{a}_j = 1$ y de forma que la varianza de $\mathbf{a}_j^T \mathbf{X}$ sea un máximo entre todas esas combinaciones lineales de $\mathbf{X}$ que no estén correlacionadas con las j-1 componentes

principales restantes. Es posible demostrar que este máximo es igual a λ_j, el *j*-ésimo eigenvalor más grande de $\sum$ correspondiente al eigenvalor λ_j y que satisface $\mathbf{a}_j^T \mathbf{a}_j = 1$.

De esta manera $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq ... \geq \lambda_p$ los eigenvalores ordenados de $\sum$ y $\mathbf{a}_1$, $\mathbf{a}_2$,..., $\mathbf{a}_p$ denotan los eigenvectores normalizados correspondientes. Nótese que los *p* eigenvalores de $\sum$ deben ser todos no negativos debido a que $\sum$ es semidefinida positiva[17].

En definitiva, tras aplicar el ACP se crean unas nuevas variables, los CP's. Pero además cada dato climático, obtiene una puntuación en cada una de los CP seleccionadas, que permite resolver la interrelación y peso de cada variable climática en el proceso evapotranspirativo. Por otro lado, estos CP ayudan a desentrañar un modelo subyacente en el conjunto de datos iniciales. En el presente estudio se partió de la matriz de covarianzas.

En consecuencia, el ACP constituye también una de las técnicas estadísticas más utilizada en trabajos de investigación climatológica de los últimos años, principalmente para el estudio de variables físicas observadas en el tiempo y el espacio. Esta metodología puede aplicarse de diversas formas a los datos estudiados, siendo uno de los modos más empleados aquel que permite la discriminación de patrones temporales de entre un conjunto de variables físicas observadas sobre un espacio dado, lo cual posibilita la determinación de áreas de homogeneidad temporal (Araneo, 2006)[18].

Si las variables analizadas muestran una varianza temporal semejante a lo largo de toda la extensión espacial, se puede efectuar el estudio a partir de la matriz de covarianza de las variables, en caso contrario las variables deberían estandarizarse, lo que equivale a confeccionar el análisis en base a la matriz de correlaciones (*idem*).

---

[17] www.dpye.iimas.unam.mx/PCA.doc. consultado el 26 de mayo de 2006.

[18] Diego C. Araneo y R. H. Compagnucci. Perfeccionamiento de la entrada de datos en el análisis de componentes principales mediante la equidensificación areal de enrejados regulares. En: http://www.copa.org.ar/climatologia.htm#2. consultado el 12 de julio de 2006

Por tanto la utilidad del ACP es múltiple porque:

- Permite representar óptimamente en un espacio de dimensión pequeña, observaciones de un espacio general p-dimensional. Es el primer paso para identificar posibles variables escondidas o no observadas, que están generando la variabilidad de los datos.
- Permite transformar las variables, en general correlacionadas, en nuevas variables incorrelacionadas, facilitando así la interpretación de los datos (Carvajal, 2005).

III. RESULTADOS

a) Análisis de componentes principales.

A partir de los datos climáticos sólo del Observatorio de La Paz, Baja California Sur (BCS) (Anexo 2), se realizó un análisis de componentes principales con el propósito de obtener un número de combinaciones lineales de las nueve variables que explican la mayoría de la variabilidad en los datos y establecer las relaciones y significancias de cada elemento en relación a su efecto en el proceso de pérdida de agua, así como aquellos elementos que favorecen el incremento de la humedad atmosférica; reportándose los datos en la Tabla V.

Tabla V. Análisis de componentes principales. Observatorio La Paz, B.C.S.

Componente Número	Autovalor	Porcentaje de Varianza	Porcentaje Acumulado
1	**5.8789**	**65.321**	**65.321**
2	**2.4307**	**27.007**	**92.328**
3	0.3663	4.070	96.398
4	0.2233	2.481	98.879
5	0.0811	0.901	99.871
6	0.0134	0.149	99.929
7	0.0048	0.053	99.982
8	0.0016	0.018	100.000
9		0.000	100.000

De acuerdo al análisis de componentes principales se extrajeron dos componentes (Tabla VI), que juntos explican el 92.33% de la variabilidad en los datos originales.

Tabla VI. Estructura de los dos componentes principales obtenidos en el ACP con las variables originales. Observatorio La Paz, B.C.S.

Variable	Componente 1	Componente 2
Evaporación	0.392	-0.191
Humedad	-0.155	0.573
Precipitación	0.106	0.531
Presión	-0.383	-0.182
Rad. Solar	0.340	-0.335
Temperaturas		
máxima	0.408	0.055
media	0.385	0.204
mínima	0.329	0.357
Viento	0.354	-0.188

De la Tabla VI se elaboraron las ecuaciones de los componentes principales. Por ejemplo, el primer componente principal tiene la ecuación que se puede denominar *Factor anual de estrés evaporante* (FAEE):

FAEE = 0.391986*Evaporación - 0.155448*Humedad + 0.106086*Precipitación - 0.383233*Presión + 0.340014*Rad Solar + 0.408405*Tmáxima + 0.385025*Tmedia + 0.329123*Tmínima + 0.353681*Viento ***Ecuación (3)***

Sin embargo, la naturaleza de la sequía reflejada en la aridez mostrada por el ecosistema motiva a la consideración de variables relacionadas en principio con el calor disponible, por lo que se procedió a eliminar las variables presión, precipitación y humedad, reduciendo la función a una expresión de variables termo-dependientes:

FAEE = 0.391986*Evaporación + 0.340014*Rad Solar + 0.408405*Tmáxima + 0.385025*Tmedia + 0.329123*Tmínima + 0.353681*Viento ***Ecuación (4)***

Con el segundo componente se obtuvo el *Factor anual de fluctuación de la humedad (*FAFH*)*:

FAFH = -0.191404*Evaporación + 0.573403*Humedad + 0.531404*Precipitación - 0.181859*Presión - 0.335103*Rad Solar + 0.0553539*Tmáxima + 0.203651*Tmedia + 0.356526*Tmínima - 0.187529*Viento ***Ecuación (5)***

Donde los valores de las variables en la ecuación están estandarizados substrayendo sus medias y dividiéndolos por sus desviaciones típicas.

Posteriormente se realizó un análisis de regresión múltiple (Tabla VII) entre la evapotranspiración y las nueve variables climáticas, así como su respectivo análisis de varianza (Tabla VIII) obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla VII. Análisis de regresión múltiple entre la ETP y nueve variables climáticas. Observatorio La Paz, B.C.S.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	P-Valor
Constante	74.3837	10.4214	7.1376	0.0191
Evaporación	0.8015	0.0008	1066.4400	0.0000
Humedad	-0.0099	0.0029	-3.3889	0.0771
Precipitación	-0.0015	0.0002	-6.9571	0.0200
Presión	-0.0713	0.0100	-7.1624	0.0189
Rad. Solar	0.0005	0.0003	1.5595	0.2592
T. máxima	-0.4846	0.1016	-4.7696	0.0413
T. media	0.7673	0.1794	4.2769	0.0506
T. mínima	-0.3295	0.0846	-3.8945	0.0601
Viento	0.0000004	0.0000003	1.7481	0.2226

Nota: Variable dependiente: ETP

Tabla VIII. Análisis de varianza para la ETP y las nueve variables climáticas. Observatorio La Paz, B.C.S.

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Coeficiente F	P-Valor
Modelo	34364.4	9	3818.26	44192481	0.000
Residuo	0.0002	2	8.64E-05		
Total	34364.4	11			

R^2 = 100.0 %
R^2 (ajustado para g.l.) = 100.0 %
Error estándar de est. = 0.0093
Error absoluto medio = 0.0029
Estadístico de Durbin-Watson = 2.9829 (P=0.0002)
Autocorrelación residual en Lag 1 = -0.5067

Los resultados muestran un ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre ETP y las nueve variables independientes, consideradas en el presente estudio y dado que el p-valor (Tabla VIII) es inferior a 0.01, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99%. La ecuación del modelo ajustado resultante fue:

ETP = 74.3837 + 0.801489*Evaporación - 0.00994582*Humedad - 0.00146454*Precipitación - 0.071289*Presión + 0.000509369*R Solar - 0.484568*Tmax + 0.76733*Tmed - 0.329525*Tmin + 4.38648E-7*Viento ***Ecuación (6)***

El estadístico R^2 indicó que el modelo explica el 100.0% de la variabilidad en la ETP. El estadístico R^2 ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferente número de variables independientes fue 100.0%. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos de 0.0093. El error absoluto medio (MAE) de 0.0029 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si existe alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero. Dado que el p-valor fue inferior a 0.05, hay indicio de una posible correlación serial.

Para decidir la simplificación del modelo, se tuvo en cuenta el p-valor más alto en las variables independientes; en este análisis fue 0.2592, perteneciendo a la radiación solar. Puesto que el p-valor fue superior o igual a 0.10, este término no es estadísticamente significativo para un nivel de confianza del 90% o superior. Por tanto, se eliminó a la radiación solar del modelo. Una vez eliminada la radiación solar la ecuación obtenida al final del análisis (Anexo 3 y 4) fue la siguiente:

ETP = 79.8284 + 0.801939*Evaporación - 0.0112402*Humedad - 0.00152705*Precipitación - 0.0763932*Presión - 0.445572*Tmáxima + 0.690069*Tmedia - 0.293576*Tmínima + 2.50092E-7*Viento ***Ecuación (7)***

Para continuar la simplificación del modelo, se tomó en cuenta que el p-valor más alto en las variables independientes fue 0.4184, perteneciendo al viento. Puesto que el p-valor es superior o igual a 0.10, este término no es estadísticamente significativo para un nivel de confianza del 90% o superior. Por tanto, se consideró eliminar la variable viento del modelo.

El análisis (Anexo 5 y 6) muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre ETP y siete variables independientes. La ecuación resultante del modelo ajustado fue la siguiente:

ETP = 78.8727 + 0.802345*Evaporación - 0.00919186*Humedad - 0.00153907*Precipitación - 0.0755447*Presión - 0.461159*Tmáxima + 0.719289*Tmedia - 0.310138*Tmínima ***Ecuación (8)***

Dado que el p-valor obtenido en el análisis correspondiente fue inferior a 0.01, existió relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99%.

Para decidir la simplificación final del modelo, se tomó nuevamente en cuenta que el p-valor más alto en las variables independientes que fue 0.0318, perteneciendo a la temperatura mínima. Puesto que el p-valor fue inferior a 0.05, este término fue estadísticamente significativo para un nivel de confianza del 95%. Por tanto, se decidió no eliminar ninguna variable más del modelo, quedando como está enunciado en la ***Ecuación (8)*.**

Posteriormente se obtuvo la matriz de correlación de coeficientes de Pearson, entre las variables climáticas y la ETP, la cual se muestra en la Tabla IX.

Tabla IX. Matriz de correlación de los coeficientes de Pearson. Observatorio La Paz, B.C.S.

	Constante	Evaporación	Humedad	Precipitación	Presión	Radiación Solar	Temp. Máxima	Temp. Media	Temp. Mínima	Viento
Constante	1.00	0.6224								
Evaporación	0.62	1.00								
Humedad	-0.36	0.33	1.00							
Precipitación	-0.75	-0.58	0.04	1.00						
Presión	-0.99	-0.63	0.35	**0.75***	1.00					
Radiación Solar	-0.34	-0.38	0.28	0.19	0.33	1.00				
Temperatura Máxima	-0.55	-0.51	-0.01	0.38	**0.55***	-0.25	1.00			
Temperatura Media	0.47	0.45	0.02	-0.30	-0.47	0.28	-0.99	1.00		
Temperatura Mínima	-0.43	-0.44	-0.06	0.26	0.43	-0.27	**0.98***	-0.99	1.00	
Viento	-0.09	-0.60	-0.40	0.14	0.09	0.48	-0.01	0.01	0.02	1.00

n= 9

La Tabla IX muestra las correlaciones estimadas entre los coeficientes de Pearson en el modelo ajustado. Estas correlaciones pueden utilizarse para detectar la presencia de una seria multicolinealidad, i.e., correlación entre las variables independientes. En este caso, hay tres correlaciones con valores absolutos superiores a 0.5 (no incluido el término constante). Dichas correlaciones son las siguientes:

- Presión *vs* Precipitación: 0.75
- Presión *vs* Temperatura Máxima: 0.55
- Temperatura Mínima *vs* Temperatura Máxima: 0.98

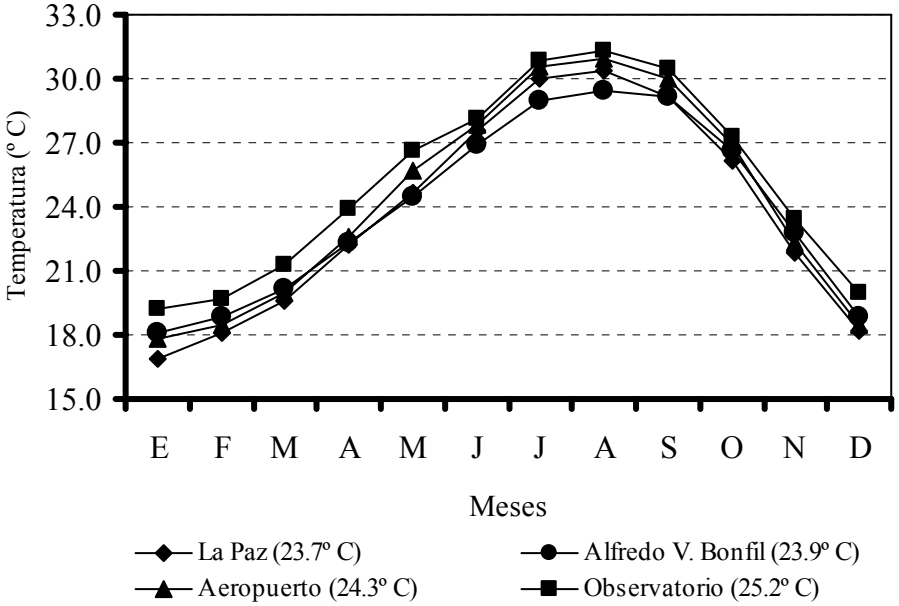
Con valores absolutos mayores a 0.5 se puede inferir una explicación numérica en relación con la dinámica atmosférica en general, en este sentido, como se esperaba se encontraron valores muy relacionados entre las temperaturas máxima y mínima.

b) Descripción de las tendencias de las variables climáticas a través del año.

Basado en los resultados anteriores y con la información de las estaciones climáticas de La Paz, Observatorio La Paz, Alfredo V. Bonfil y del Aeropuerto de la Ciudad de La Paz, en Baja California Sur, se procedió a analizar las variables climáticas a través del año en forma gráfica, obteniéndose lo siguiente:

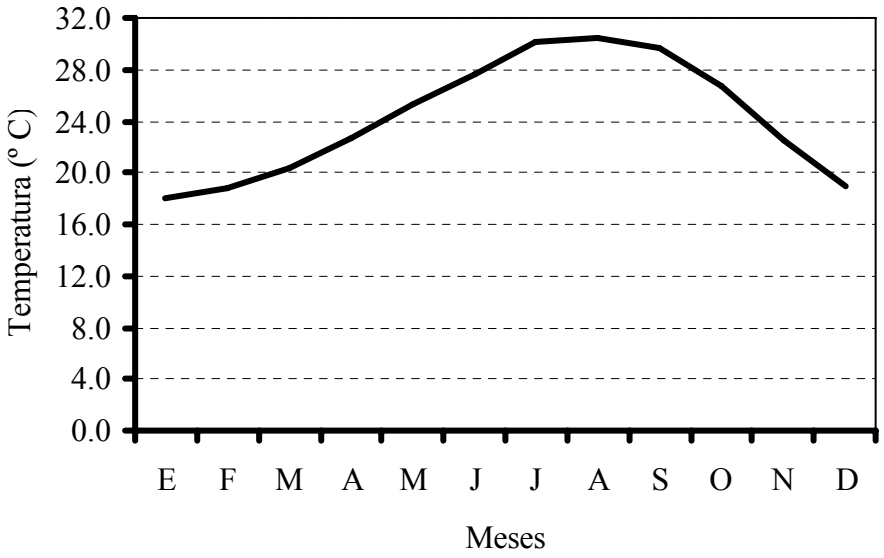
1. Temperatura.

La temperatura en la zona de estudio sigue la tendencia normal de las latitudes subtropicales, presentándose las mayores temperaturas en la mitad caliente del año y las menores en la época fría del año. Todas las estaciones siguen un mismo patrón (Gráfica 1), aunque se observó que la estación del Observatorio de La Paz presentó los valores mayores de temperatura media anual con respecto a las otras estaciones, influenciado ello a la mayor capa de asfalto y construcciones que circundan a la estación señalada. La temperatura media del Observatorio de La Paz fue de 25.2º C; 1.5º C más que la estación La Paz que presentó 23.7º C.



Gráfica 1. Temperatura media mensual en cada estación analizada.

En la Gráfica 2 se presentan los valores promedio mensual de las estaciones analizadas, observándose que agosto es el mes más caliente con 30.5º C y el mes más frío es enero con 18.0º C. La temperatura media anual en la zona de estudio es de 24.3º C.



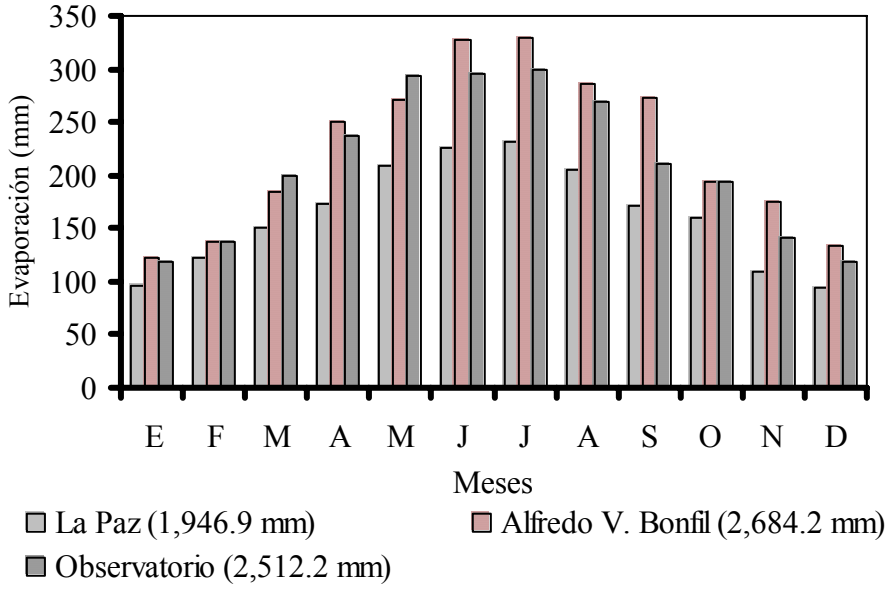
Gráfica 2. Temperatura media mensual en la zona de estudio.

2. Evaporación media mensual.

Los valores de la evaporación promedio mensual se presentan en la Tabla X y su tendencia en la Gráfica 3 para cada estación estudiada. Cabe aclarar que no se tuvieron datos de la estación Aeropuerto, en virtud de que estas variables no son parte de la rutina diaria de observación de dicha estación.

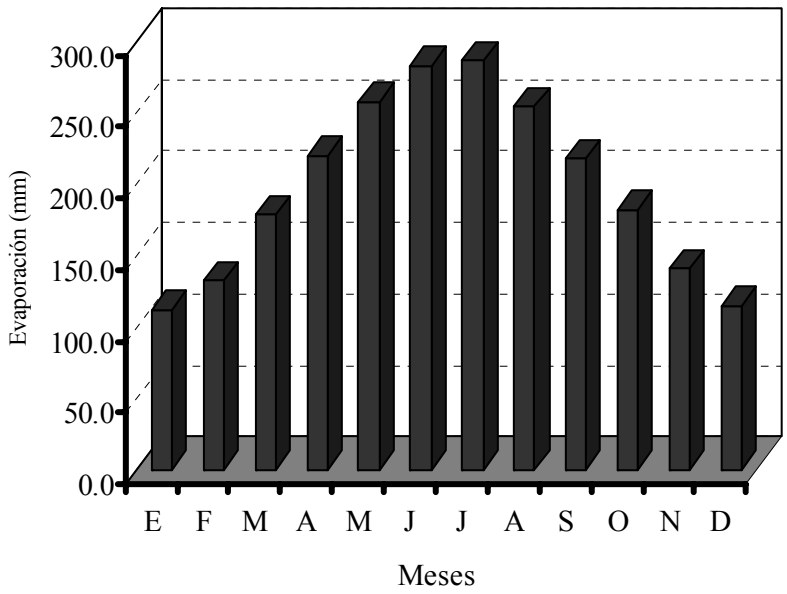
Tabla X. Datos de evaporación promedio mensual en las estaciones analizadas en el presente trabajo.

Mes	La Paz	Alfredo V. Bonfil	Observatorio	Promedio
E	95.4	122.4	118.9	112.3
F	122.9	137.9	137.3	132.7
M	151.3	184.0	200.2	178.5
A	172.3	250.3	236.7	219.8
M	208.3	271.3	293.0	257.5
J	226.3	327.6	295.1	283.0
J	231.8	328.9	299.4	286.7
A	205.6	286.9	270.0	254.2
S	170.4	273.2	209.9	217.8
O	159.6	193.9	193.2	182.2
N	109.3	174.2	140.4	141.3
D	93.8	133.8	118.1	115.2
Total	1946.9	2684.2	2512.2	2381.1



Gráfica 3. Evaporación media mensual en cada estación climática analizada.

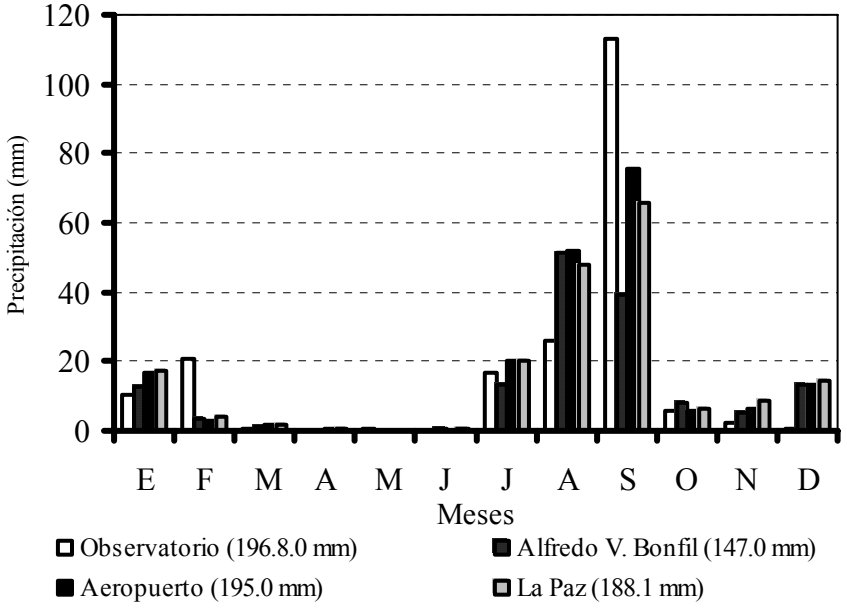
El promedio anual de la evaporación en la zona fue de 2,381.1 mm al año, siguiendo su tendencia el proceso de calentamiento global de la zona a través del año (Gráfica 4). Los meses de junio y julio presentan los valores más altos de evaporación mensual con 283.0 y 286.7 mm respectivamente. El menor valor correspondió al mes de enero con 112.3 mm.



Gráfica 4. Evaporación media mensual en la zona de estudio.

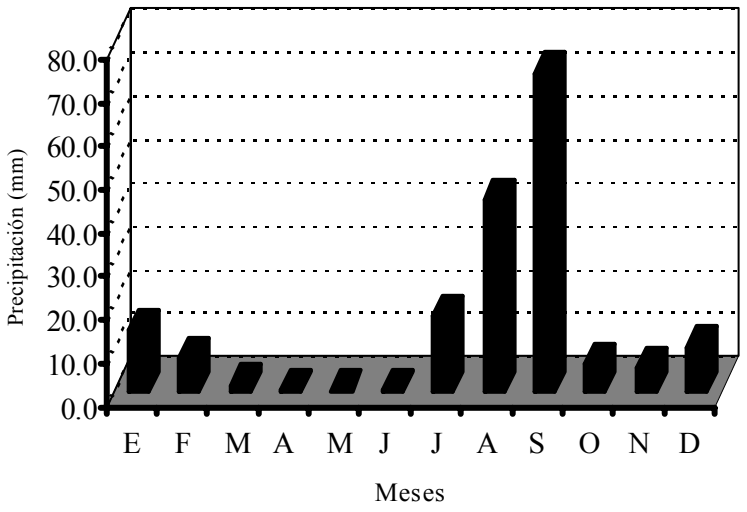
3. Precipitación promedio mensual.

La zona se caracteriza por tener escasas precipitaciones, de carácter torrencial, de alta intensidad y corta duración. En la Gráfica 5 se muestran los datos de precipitación promedio mensual de las cuatro estaciones evaluadas, las cuales presentan dos picos de precipitación al año, una en verano que es la más importante y otra en invierno (más del 20% de lluvia invernal).



Gráfica 5. Precipitación media mensual por estación climática analizada.

En la Gráfica 6 se presenta el promedio de la precipitación de las estaciones evaluadas, observándose que septiembre fue el mes más lluvioso con 73.4 mm y mayo el mes más seco con 0.1 mm. El total anual promedio es de 181.7 mm.



Gráfica 6. Precipitación promedio mensual en la zona de La Paz.

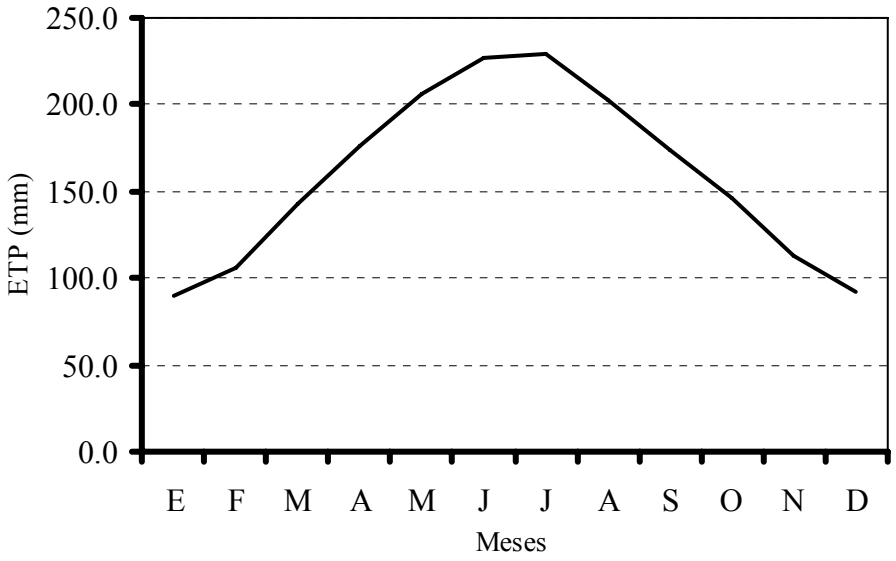
4. Evapotranspiración potencial.

Para calcular la evapotranspiración potencial (ETP) se consideró el dato diario de evaporación obtenido en el tanque de evaporación de cada estación y se multiplicó por 0.8, (Aguilera y Martínez, 1990). Los valores promedio mensuales se presentan en la Tabla XI.

Tabla XI. Evapotranspiración potencial promedio mensual con datos del tanque de evaporación Tipo A.

Mes	Observatorio	Alfredo V. Bonfil	La Paz	Promedio
E	95.1	97.9	76.3	89.8
F	109.8	110.3	98.3	106.1
M	160.2	147.2	121.1	142.8
A	189.4	200.3	137.8	175.8
M	234.4	217.0	166.6	206.0
J	236.1	262.0	181.1	226.4
J	239.5	263.1	185.4	229.3
A	216.0	229.5	164.4	203.3
S	167.9	218.5	136.3	174.2
O	154.6	155.1	127.7	145.8
N	112.3	139.3	87.4	113.0
D	94.5	107.0	75.0	92.2
Total	2009.8	2147.4	1557.5	1904.9

En la Gráfica 7 se puede observar que en la zona de La Paz la mayor ETP corresponde a la época caliente del año, mientras que los valores menores mensuales son en la época fría, en la cual la intensidad de la radiación solar y la temperatura disminuyen sensiblemente, sin embargo, como se comentó anteriormente la ETP es alta.



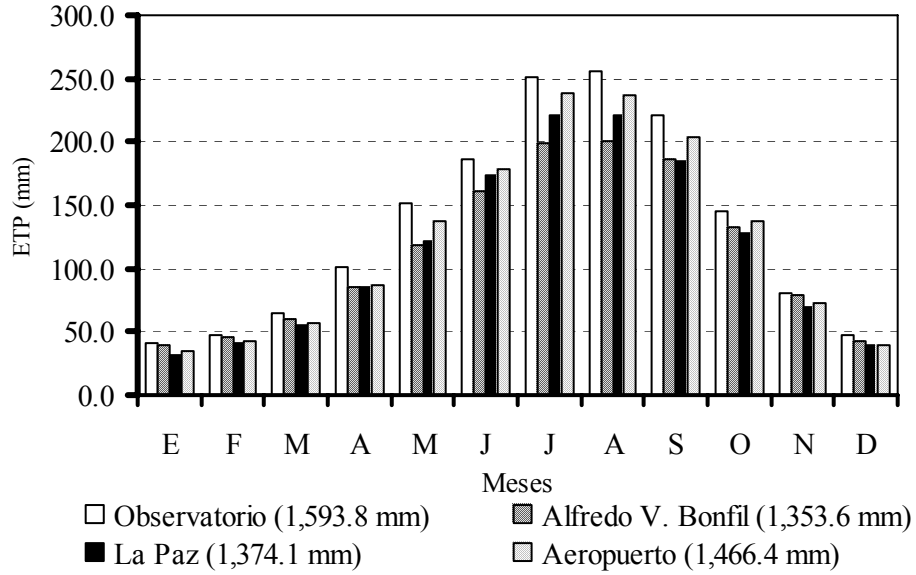
Gráfica 7. ETP promedio mensual en la zona de estudio.

Se calculó también la ETP por el método de Thornthwaite (Aguilera y Martínez, 1990), considerando el valor de la temperatura media mensual para todas las estaciones incluyendo la del Aeropuerto de La Paz. En la Tabla XII se muestran dichos valores.

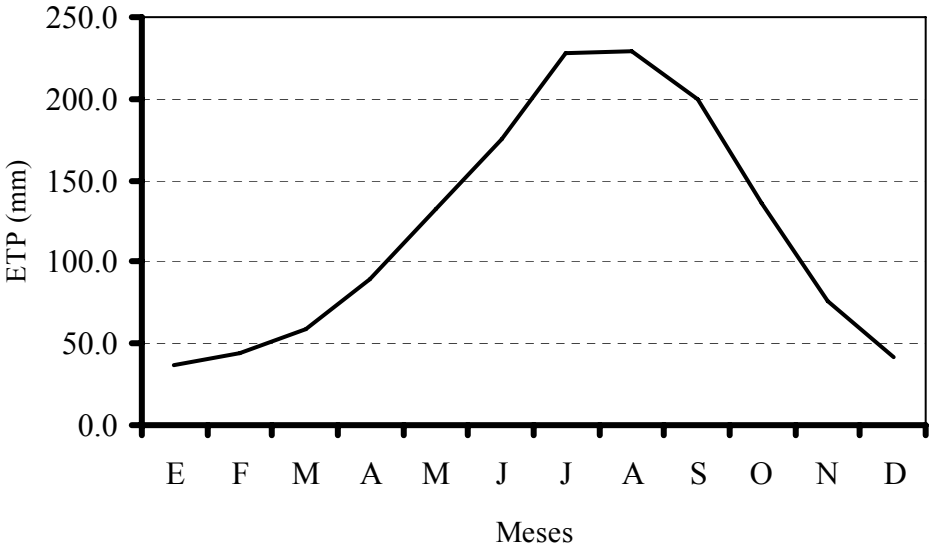
Tabla XII. Evapotranspiración potencial promedio mensual por el método de Thornthwaite.

Mes	Observatorio	Alfredo V. Bonfil	La Paz	Aeropuerto	Promedio
E	41.2	39.1	32.2	35.3	37.0
F	47.3	46.1	41.5	42.0	44.2
M	64.9	60.3	55.5	56.4	59.3
A	101.0	85.8	85.0	87.4	89.8
M	151.7	119.2	122.3	136.8	132.5
J	186.3	161.0	173.7	178.5	174.9
J	251.1	199.7	220.4	238.5	227.4
A	256.1	201.0	221.5	237.5	229.0
S	221.4	185.7	185.4	204.3	199.2
O	144.9	133.4	127.6	138.1	136.0
N	81.3	79.2	69.5	72.4	75.6
D	46.6	43.1	39.5	39.2	42.1
Total	1593.8	1353.6	1374.1	1466.4	1447.0

Las Gráficas 8 y 9 muestran la tendencia de la ETP calculada por el método de Thornthwaite para cada estación y el promedio de ellas para la zona de La Paz, respectivamente. Se reconoce el efecto de la temperatura porque la tendencia de la ETP es aumentar en la época caliente del año y disminuir en la época fría.

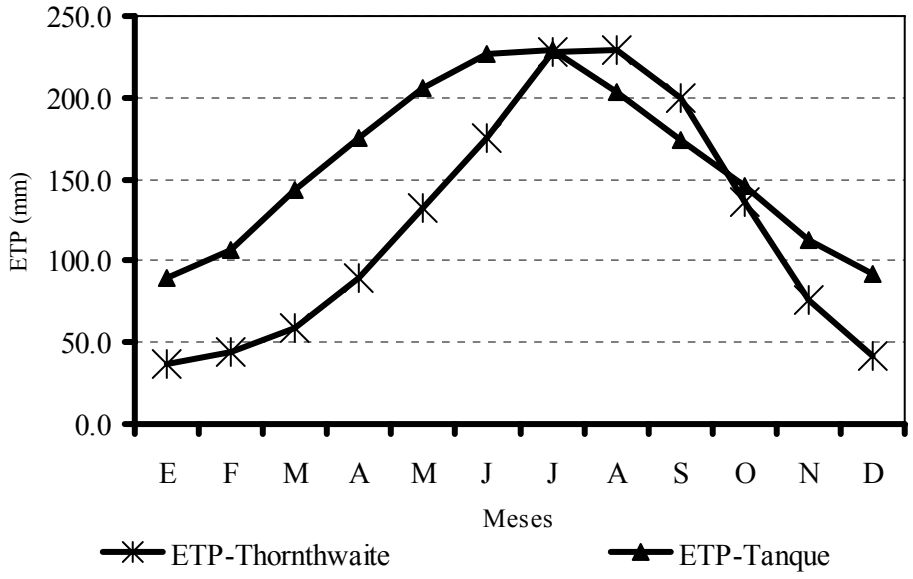


Gráfica 8. ETP por el Método de Thornthwaite, promedio mensual por estación climática.



Gráfica 9. ETP por el Método de Thornthwaite, promedio mensual en la zona de estudio.

Al comparar los valores del método del tanque de evaporación con el método de Thornthwaite (Gráfica 10), se observó una tendencia mayor de este último método en los meses de agosto y septiembre, debido a un incremento de la temperatura media, que alcanza valores de 30º C, situación que de acuerdo con Aguilera y Martínez (1990), hace impropio el manejo de este método en las zonas áridas afectadas por corrientes cálidas en la época de verano como es la región de La Paz. En tal situación, se deberá buscar otro método para evaluar la ETP y contrastarla con la obtenida en el tanque de evaporación, la cual se considera como la ETP de referencia.



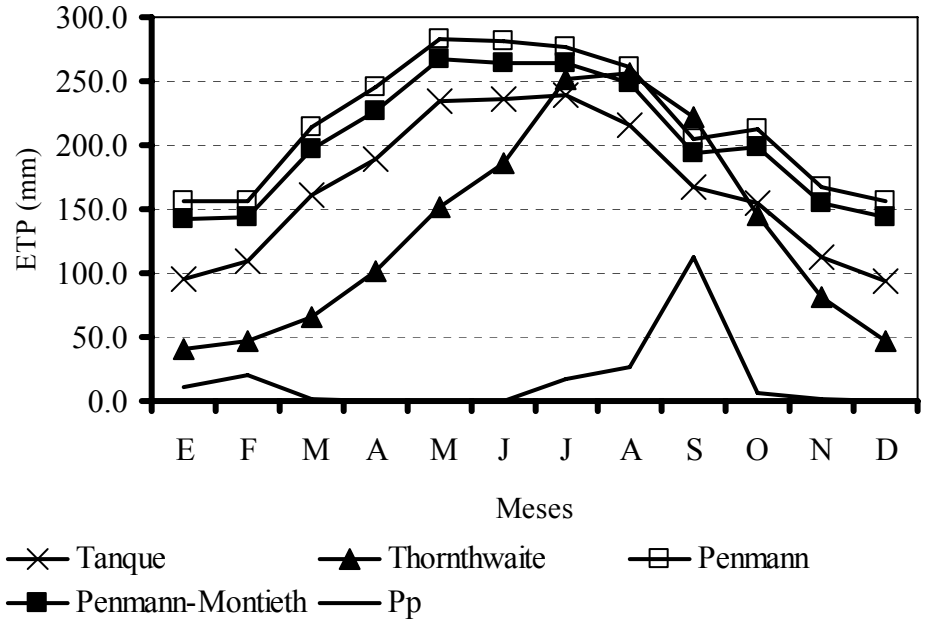
Gráfica 10. Comparación de métodos.

Para ello, se calculó la ETP por los métodos de Penmann y Penmann-Montieth (Tabla XIII) con los datos del Observatorio La Paz, ya que este cuenta con mayor número de variables climáticas necesarias para su cálculo.

Se compararon los datos y existieron diferencias positivas del orden de 400 a 600 mm de ETP al año, entre dichos métodos y el valor calculado por el método del tanque de evaporación; aunque siguen una tendencia semejante estos tres últimos métodos a través del año (Gráfica 11).

Tabla XIII. ETP promedio mensual, calculada por varios métodos.
Observatorio La Paz, B.C.S.

Mes	ETP Tanque	ETP Thornthwaite	ETP Penmann	ETP Penmann-Montieth	Precipitación
E	95.1	41.2	156.7	142.6	10.0
F	109.8	47.3	156.9	143.2	21.0
M	160.2	64.9	214.5	196.4	1.0
A	189.4	101	244.8	227.1	0.0
M	234.4	151.7	283.4	266.6	0.0
J	236.1	186.3	281.7	263.6	0.0
J	239.5	251.1	275.8	263.9	17.0
A	216	256.1	260.7	248.6	26.0
S	167.9	221.4	205.4	193.8	113.0
O	154.6	144.9	212.4	198.9	6.0
N	112.3	81.3	167.8	155.4	2.0
D	94.5	46.6	156.2	143.2	1.0
Total	2009.8	1593.8	2616.3	2443.3	196.8



Gráfica 11. Comparación de 4 métodos para el cálculo de la ETP.

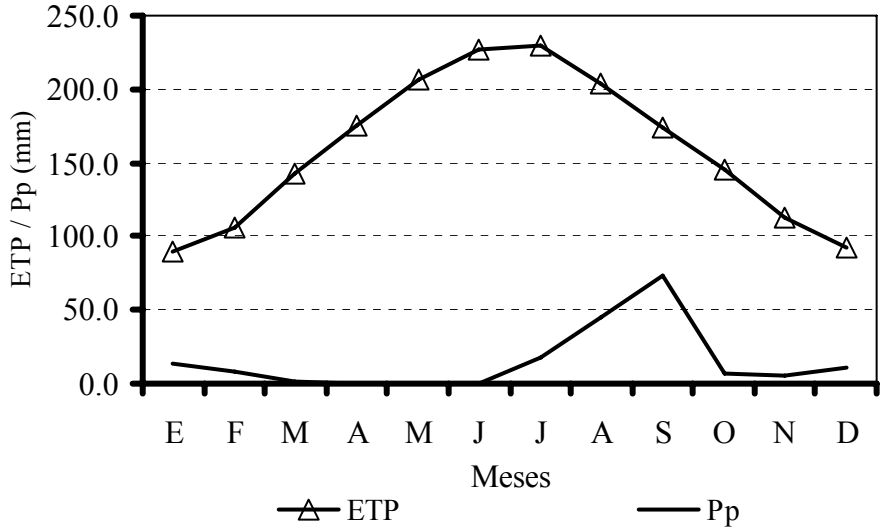
Se observa en la Gráfica 11, que el método de Thornthwaite reporta un mayor valor en el mes de septiembre que los otros métodos, considerando a este método impropio para ser utilizado en las zonas con características climáticas similares a la zona de La Paz.

5. Déficit hídrico.

La diferencia Pp-ETP proporciona una valiosa información acerca del balance hídrico del área estudiada y sus implicaciones en su manejo. Si Pp>ETP el escurrimiento será probablemente grande y la regulación hídrica local será pobre. Por el contrario, si Pp<ET será indicativo de que hay otras fuentes de agua adicional aparte de la Pp local.

Construyendo la gráfica con los datos de ETP (obtenida por el método del tanque) y Pp (Gráfica 12) de acuerdo al método de la FAO (1978) citado por (Ortiz, 1988), se obtiene la estación de crecimiento, la cual establece los límites de crecimiento de las plantas por disponibilidad de humedad. En este método se establece que si la Pp sobrepasa la línea de la ETP se tendrá almacenada agua en el suelo y se satisfacen los requerimientos de agua de los cultivos. Sin embargo, se observa que nunca rebasa la línea de Pp a la ETP durante el año, considerándose una estación de crecimiento *siempre seca*, que mantiene un déficit hídrico continuo a las plantas en general, salvo en aquellas ocasiones en que se presenta la precipitación y el suelo pueda almacenar un poco de agua.

La zona de La Paz, enfrenta un déficit hídrico todo el año, lo que obliga a plantear programas de irrigación a los pastizales y el manejo de los agostaderos para no agotar los recursos, sobre todo en aquellas zonas de libre pastoreo que se encuentran actualmente sobre pastoreadas.



Gráfica 12. Estación de crecimiento para la zona de La Paz.

Considerando las ecuaciones para los índices de aridez propuestos por el PNUMA, De Martonne y Lang (anteriormente explicados), se calcularon sus valores en función de los valores promedio para todas las estaciones en conjunto (Tabla XIV).

Tabla XIV. Índices de aridez para la zona de La Paz, B.C.S.

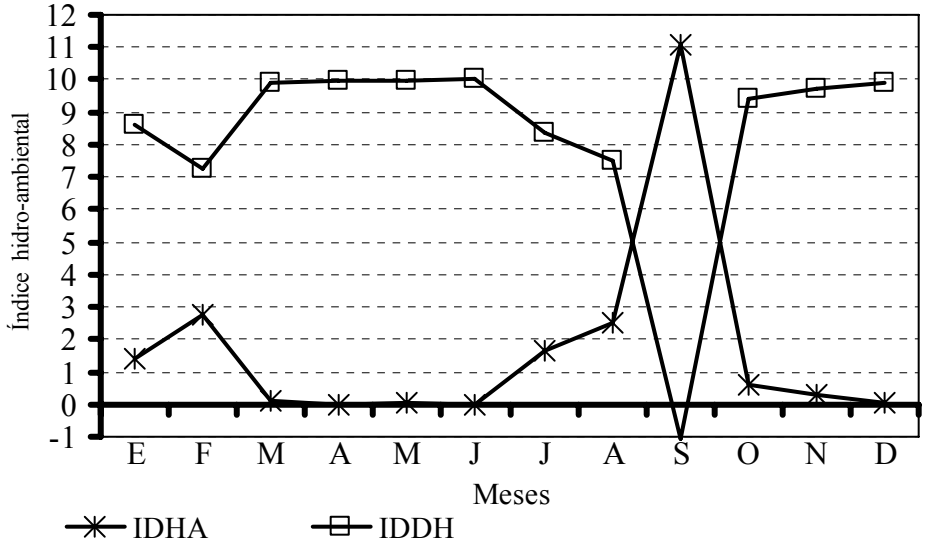
Método	Fórmula	Índice
PNUMA	Pp / ETP	0.1
Martonne	Pp / (T+10)	5.3
Lang	Pp / T	7.5

Se observa que los valores caracterizan a la zona de La Paz como zona árida, donde la baja disponibilidad de agua es la condición normal durante el año.

6. Índice de disponibilidad hidro-ambiental.

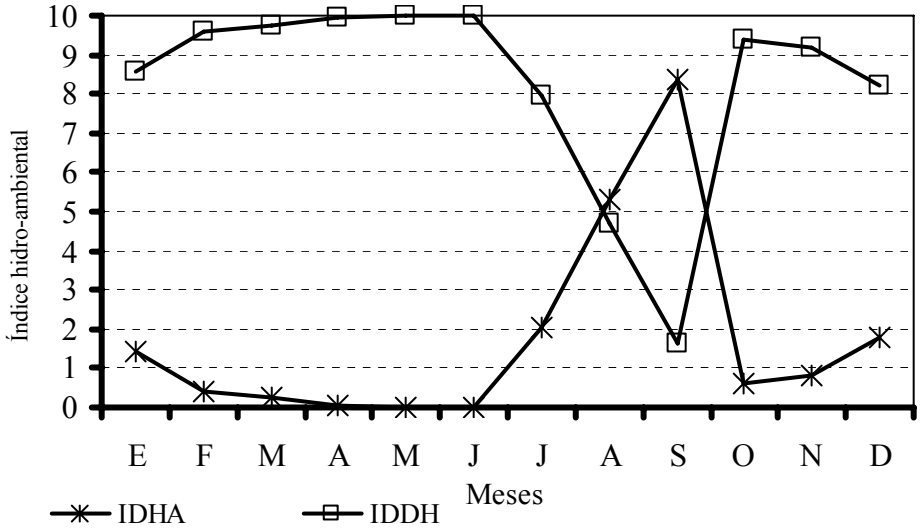
Este índice se determinó para cada estación climática; reportándose los resultados en las Gráficas 13 a la 16.

Con los datos del Observatorio La Paz, se observa sólo un mes (septiembre) en el cual existe disponibilidad hidro-ambiental (IDHA) para las plantas en general, asociado esto a la presencia de tormentas tropicales que llegan a las costas de la Península de Baja California. Los restantes 11 meses, presentan un déficit hidro-ambiental (IDDH) lo que motiva a diseñar estrategias para mejorar el uso del agua existente en el acuífero en general.



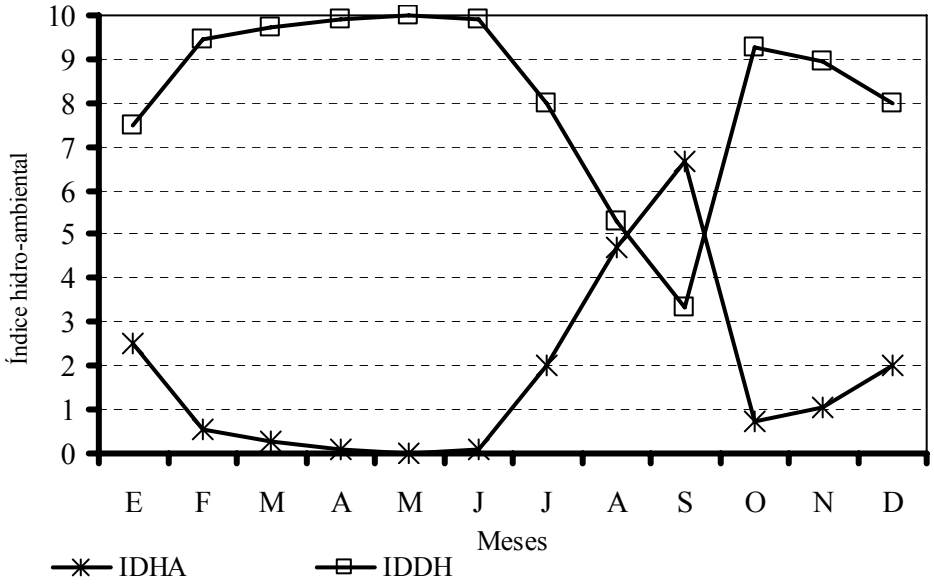
Gráfica 13. IDHA, Observatorio La Paz, B.C.S.

Para el caso de la zona de influencia del Aeropuerto de La Paz, se observa un IDHA semejante al Observatorio de La Paz, lo que permite ver el déficit de humedad existente en la zona de La Paz, que limita el desarrollo y crecimiento de las plantas del ecosistema en su conjunto.



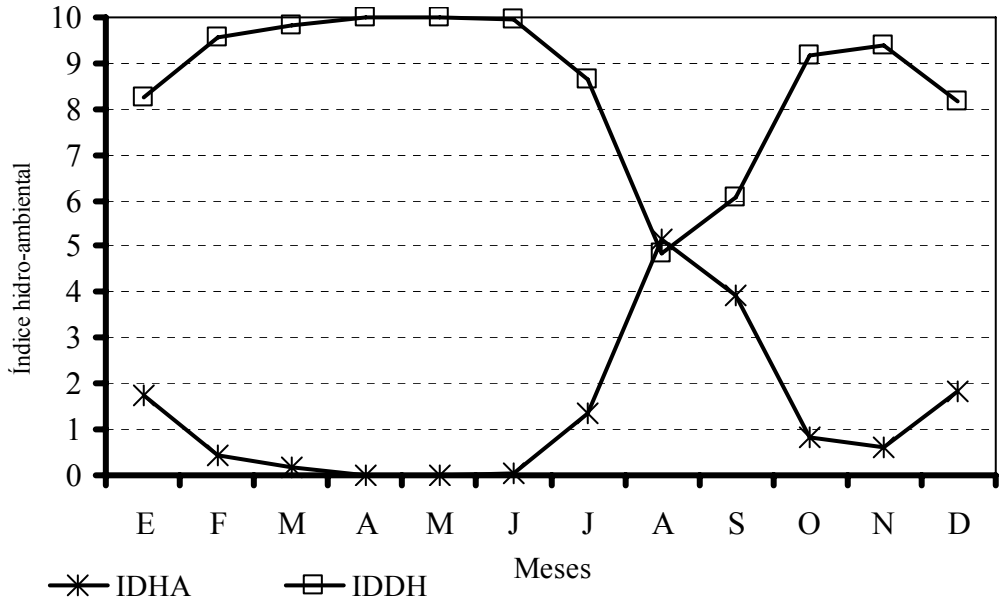
Gráfica 14. IDHA, Aeropuerto La Paz, B.C.S.

La estación climática La Paz, también muestra una tendencia similar a las dos estaciones anteriores, donde sólo el mes de septiembre presenta la posibilidad de un mayor IDHA, que beneficia a la vida de los vegetales en su conjunto.



Gráfica 15. IDHA, estación climática La Paz, B.C.S.

Sin embargo, para la estación Alfredo V. Bonfil se observó un IDHA menor que el IDDH, durante el año, dejando ver que el IDHA disminuyó conforme se avanza al norte de la ciudad de La Paz, presumiblemente disminuyendo más este IDHA conforme se avanza al Norte del Estado de Baja California Sur y de la Península de Baja California en su conjunto.



Gráfica 16. IDHA, estación climática Alfredo V. Bonfil, B.C.S.

Para establecer la importancia de la precipitación sobre la respuesta del IDHA, se realizó un análisis de regresión lineal simple considerando a la precipitación como variable independiente y al IDHA como variable dependiente (Tabla XV), así como el análisis de varianza correspondiente (Tabla XVI) obteniendo los siguientes resultados.

Tabla XV. Análisis de regresión - Modelo Lineal Y = a + b∗X.
La Paz, B.C.S.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	P-Valor
Ordenada	0.1079	0.0415	2.5972	0.0126
Pendiente	0.1007	0.0015	66.4965	0.0000

Nota: Variable dependiente: IDHA. Variable independiente: Precipitación

Tabla XVI. Análisis de varianza entre la precipitación y el IDHA. La Paz, B.C.S.

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Coeficiente F	P-Valor
Modelo	254.451	1	254.45	4421.79	0.000
Residuo	2.64707	46	0.058		
Total	257.099	47			

Coeficiente de Correlación = 0.9948
R^2 = 98.97 %
R^2 (ajustado para g.l.) = 98.97 %
Error estándar de est. = 0.2399
Error absoluto medio = 0.1665
Estadístico de Durbin-Watson = 1.1198 (P=0.0005)
Auto correlación residual en Lag 1 = 0.3961

Los datos anteriores muestran los resultados del ajuste al modelo lineal para describir la relación entre IDHA y precipitación. La ecuación del modelo ajustado obtenida fue:

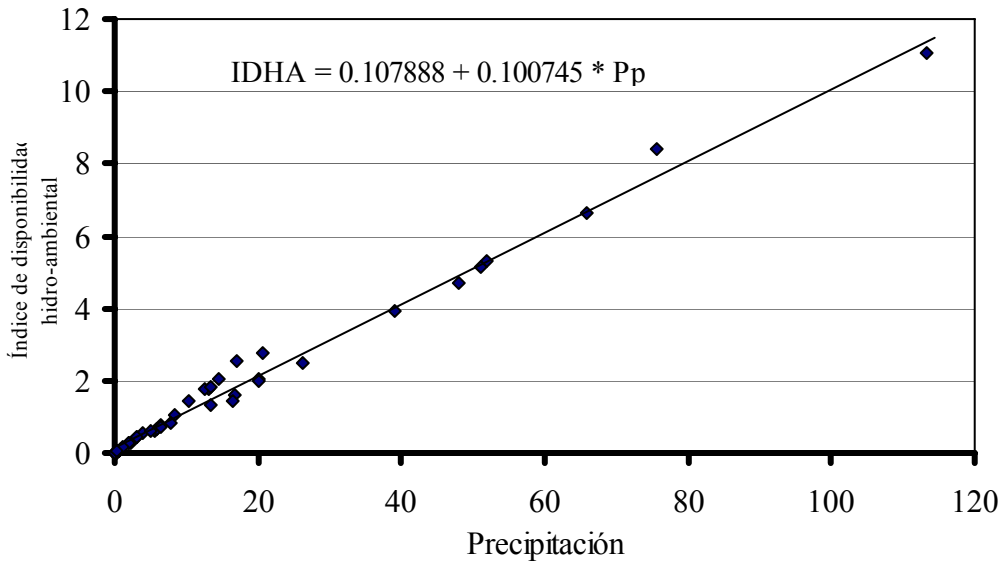
IDHA = 0.107888 + 0.100745*Pp ***Ecuación (9)***

Dado que el p-valor en el análisis de varianza (Tabla XVI) fue inferior a 0.01, existió relación estadísticamente significativa entre IDHA y precipitación para un nivel de confianza del 99%, por lo que se afirma que el efecto de la precipitación sobre el índice de disponibilidad hidro-ambiental es muy impactante.

El estadístico R^2 indicó que el modelo lineal explica un 98.97 % la tendencia de los datos observados en la variabilidad de IDHA. El coeficiente de correlación fue igual a 0.99 indicando una relación fuerte y positiva entre las variables. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que fue 0.2399.

El error absoluto medio (MAE) de 0.1665 fue el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el programa estadístico.

En la Gráfica 17 se presenta el modelo ajustado con las variables precipitación e IDHA, corroborando los datos anteriores.



Gráfica 17. Modelo ajustado de la precipitación-IDHA. La Paz, B.C.S.

IV. DISCUSIÓN

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica estadística de síntesis de información o reducción de la dimensión (número de variables), que permite ante un conjunto de numerosas variables, reducirlas a un menor número perdiendo la menor cantidad de información posible (Terrádez-Gurrea, 2006).[19] De este modo los nuevos componentes principales o factores serán una combinación lineal de variables originales y además serán independientes entre sí. El mismo autor señala que para que el factor sea fácilmente interpretable debe tener las siguientes características:

- Los coeficientes factoriales deben ser próximos a 1.
- Una variable debe tener coeficientes elevados sólo con un factor.
- No deben existir factores con coeficientes similares.

Con estas consideraciones y de acuerdo a los resultados obtenidos, es preciso señalar que el proceso evapotranspirativo está influenciado por múltiples factores, tanto climáticos como de la planta misma y de la naturaleza del suelo. En este caso, la interrelación de los elementos del clima define en gran medida la velocidad y volumen evapotranspirado durante el día y el año.

La temperatura máxima representó el valor más alto que influye sobre la ETP como se muestra en la ***Ecuación (3)***, donde además se observa que la radiación solar realiza un papel importante para esta. En tales condiciones, a partir de las condiciones de aridez que presenta la zona de influencia, se puede inferir que la alta radiación solar durante casi todo el año, determina directamente la tasa de evaporación y la temperatura en general.

Así el f*actor anual de estrés evaporante* (FAEE) está determinado por la radiación solar, la temperatura, la evaporación y el viento.

[19] Terrádez-Gurrea, Manuel. Análisis de Componentes Principales. En www.uoc.edu. Consultado en junio de 2006.

En lo que respecta al segundo componente del análisis, *factor anual de fluctuación de la humedad (*FAFH) el cual está representado en la ***Ecuación (5)***, se observó una mayor influencia de la humedad ambiental, la precipitación y la temperatura mínima, los cuales determinan en gran medida, de manera interrelacionada, el incremento de la disponibilidad de humedad en la zona, puesto que al enfriarse el vapor de agua aumenta la probabilidad de condensación y por lo tanto de precipitación. Sin embargo, los valores de humedad ambiental fueron menores del 70 % promedio mensual la mayor parte del año, excepto en el mes de septiembre que presentó un porcentaje mayor, producto de la influencia de corrientes cálidas y húmedas del Pacífico Tropical que arriban a las costas de la Península de Baja California.

El análisis de regresión múltiple mostró que la ETP está directamente determinada desde el punto de vista climático y en orden de importancia, por la evaporación, la temperatura media, la temperatura máxima, la temperatura mínima, la presión, la humedad, la precipitación y el viento, como se muestra en la E***cuación (7)***. Dicho modelo se ajusta a las condiciones propias de la zona de estudio, representada por un clima árido, extremoso, en el cual se desarrolla el matorral sarcocaule.

Al hablar del clima, definido como las condiciones ambientales que caracterizan a un punto geográfico y que son producto de su respuesta a través del tiempo (Moran, 1991), la tendencia de cada elemento que lo compone es de suma importancia para el desarrollo de programas que vayan encaminados al manejo y conservación de los recursos naturales, así como a la planeación de las actividades productivas en general, desde la planeación de los sistemas agropecuarios, hasta la selección del tipo de vestimenta de la población en general. Asimismo, el desarrollo de las poblaciones vegetales está influenciado por el clima.

Con los datos obtenidos en el presente estudio, se puede caracterizar el clima de la zona de estudio como árido, extremoso, donde la temperatura sigue una tendencia propia de las latitudes subtropicales, donde el mes más caliente es agosto con 30.5º C de temperatura media y el mes más frío enero con 18.0º C, con una oscilación térmica de 12.5º C, lo que

evidencia el estrés térmico que sufren los vegetales, que promueve la modificación de sus estructuras morfológicas, por ejemplo, existir vegetales donde las hojas son pequeñas, inexistentes o bien, se han transformado en espinas, como es el caso de varias especies que se encuentran en el matorral sarcocaule de la región de estudio.

Cuando a este efecto térmico se le suma la alta evaporación la cual alcanza valores promedio de 2,381.1 mm al año, producto de las altas temperaturas que se presentan en la región de La Paz, se deduce que el matorral se encuentra en condiciones de estrés hídrico la mayor parte del año. En este sentido la estación Alfredo V. Bonfil es donde se obtuvo la mayor evaporación total promedio anual, (2,684.2 mm), resaltando la influencia de las condiciones de mayor aridez de la zona, además la influencia de corrientes de aire más cálidas se acentúan en esta zona. Puede plantearse que las condiciones de aridez se van incrementando hacia la parte norte de la región de La Paz, B.C.S.; lo que vislumbra un panorama más extremoso para el desarrollo de sistemas agropecuarios sustentables.

Adicionalmente, dichas condiciones de aridez son producto también de una menor precipitación que se presenta en la zona de estudio. La precipitación promedio anual fue de 181.7 mm, siendo el mes de septiembre el más lluvioso con 73.4 mm y el mes de mayo el más seco con 0.1 mm; con un porcentaje de lluvia invernal mayor del 20 %. Estas lluvias de invierno son producto de la afluencia de masas de aire fría modificadas de la zona del Pacífico Nororiental hacia las costas de la Península de Baja California en su conjunto, las cuales se caracterizan por tener una temperatura superficial (aire y agua) del orden de 0º C a 10º C, con contenido alto de humedad, siendo masas de aire inestables (Reyes, 2001). Mosiñó-Alemán (1966) citado por Troyo-Diéguez (1990) agregó que la interacción océano-atmósfera provoca la falta de condensación y por lo consiguiente la disminución de lluvia, condiciones típicas de una zona árida costera.

Las lluvias en la región están marcadas por la presencia de tormentas tropicales, las cuales aportan la mayor parte de precipitación en verano, (en ocasiones es la única fuente de agua). La zona de la estación Alfredo V. Bonfil es la más seca (147.0 mm), la cual se

encuentra al norte de la ciudad de La Paz, donde el panorama fisiográfico es más seco y la escasez de agua es mayor durante el año. Aquí predominan las áreas de agostadero y de matorral sarcocaule.

Sin embargo, esta disminución de precipitación no esta limitado solamente a la zona de La Paz. De acuerdo al boletín informativo mensual-anual de la SAGARPA (2006), de la superficie total del estado (7'367,700 hectáreas), se tiene una superficie potencial para el desarrollo agropecuario de 108,438 hectáreas, pero debido a la limitante que presenta el recurso hidráulico, se tienen en uso sólo 61,725 hectáreas o sea el 0.8 % de la extensión total, cifra que se juzga sumamente baja sí se compara con algunas entidades del país; razón por la cual representa la principal limitante para la producción y para el desarrollo económico y social de la entidad.

La SAGARPA (2006) reporta que la ganadería se desarrolla en el estado de Baja California Sur, en 4.7 millones de hectáreas de agostadero con un coeficiente ponderado promedio de 44.0 hectáreas por unidad animal. Las especies principales explotadas son bovino para carne, bovino para leche, caprinos, ovinos, porcinos, aves de postura y abejas; y el soporte alimenticio se basa en la producción forrajera y situación de los agostaderos: producción de alfalfa, verde y henificada, maíz y sorgo forrajeros, granos, praderas perennes y anuales, esquilmos de cosechas, rastrojos, y subproductos agroindustriales (grasas, melazas, harinas). Estos cultivos se producen bajo condiciones de riego dado que la precipitación presente en la zona de estudio y en el estado mismo, no satisface los requerimientos hídricos de estos.

Es importante recalcar que la zona de La Paz se caracteriza por tener un clima árido, donde la precipitación además de ser torrencial es sumamente localizada. Se han observado precipitaciones[20] a menos de 2 km entre los eventos, concordando con las características de las zonas áridas que señala Evenari (1985). Asimismo, se han registrado extremos de

[20] Observaciones personales de las precipitaciones ocurridas en la zona de La Paz entre los meses de septiembre de 2004 a diciembre de 2005.

precipitación en 24 horas que varían desde 0.0 mm hasta 75.0 mm en el Aeropuerto; 173.0 mm en Alfredo V. Bonfil; La Paz con 136.0 mm y en Observatorio de La Paz 101.4 mm.

La ETP promedio en la zona fue de 1,904.9 mm, el cual al compararlo con el valor de precipitación (181.7 mm), se deduce la falta de agua en la zona, pues esta precipitación no alcanza a sufragar las necesidades de agua de las plantas, como se señaló anteriormente, recurriendo la vegetación natural a mecanismos fisiológicos que las hacen adaptarse a condiciones de sequía. En tal situación, el manejo de los animales en agostadero silvestre debe considerar que durante el año las condiciones de humedad en el suelo son bajas, lo que obliga a disminuir la presión animal sobre las plantas forrajeras ahí existentes.

Para el manejo sustentable de los pastizales en zonas áridas se debe promover el uso racional de los recursos naturales, manteniendo la producción hasta el nivel de carga natural del terreno y estabilizarla. El manejo de pastizales debe considerarse bajo un esquema de administración integral de recursos; es decir, el concepto y filosofía del manejo, debe considerar de manera integral y racional la apreciación, manejo, tratamiento y consideración de los elementos, componentes o partes del ecosistema como un todo o 'entero ecosistémico' (Troyo-Diéguez, 2005). En este sentido, las condiciones climáticas tienen un papel primordial para el concepto sustentable de la producción agropecuaria.

Existen diferencias fundamentales entre el manejo de un hato bajo condiciones silvestres y uno domesticado; por un lado, los animales domésticos están confinados en áreas reducidas por cercas, en las que se pastorean por largos periodos de tiempo, seleccionando las mejores plantas y consumiendo las más jóvenes, volviendo a ellas en repetidas ocasiones e impidiendo su crecimiento normal, creando problemas en el desarrollo natural en la comunidad vegetal.

Por su parte, en condiciones silvestres se tiene la necesidad de protección contra el ataque de depredadores u otros peligros, por lo que los hatos están obligados a permanecer o actuar en forma congregada o de 'manada', pastoreando intensamente una cierta área y

compitiendo por la comida e impactando fuertemente al suelo y la vegetación. Con esto, al formarse grandes hatos, el recurso forrajero es consumido rápidamente, lo que a su vez los presiona a desplazarse hacia otros agostaderos. Debido al instinto animal y al "reloj biológico" de las especies, al cabo de cierto plazo regresan al mismo sitio o agostadero, permitiendo así que los pastizales que habían sido pastoreados y/o pisoteados se recuperen (Troyo-Diéguez, 2005).

La ETP calculada por el método de Thornthwaite fue menor que la ETP obtenida a partir de datos de evaporación, debido a que el método de Thornthwaite sólo considera el efecto de la temperatura sobre la evapotranspiración, siendo este último un proceso además influenciado por la temperatura, la evaporación, la precipitación, la presión atmosférica, básicamente, como fue reportado en la ***Ecuación (8)***, los cuales están implícitos en el proceso de evaporación que se registra en el tanque de evaporación. Esto último concuerda con las observaciones de Roderick (2005), quien concluyó que el proceso de evaporación está influenciado por la radiación solar, velocidad del viento y además por el déficit de presión de vapor de agua. Asimismo, Hashemi (1979) determinó que el método de Thornthwaite subestimó el valor de ETP en condiciones de aridez en Irán.

Al comparar los valores del método del tanque de evaporación con el método de Thornthwaite (Gráfica 10), se observó una tendencia mayor de este último método en los meses de agosto y septiembre, debido a un incremento de la temperatura media, que alcanza valores de 30º C, situación que de acuerdo con Aguilera y Martínez (1990), hace impropio el manejo de este método en las zonas áridas afectadas por corrientes cálidas en la época de verano como es la región de La Paz. En tal caso se empleó otro método para evaluar la ETP y contrastarla con la obtenida en el tanque de evaporación, la cual se considera como la ETP de referencia.

Esta evaluación incluyó a los métodos de Penmann y al de Penmann-Montieth, los cuales en sus modelos incluyen un mayor número de variables climáticas, no sólo la temperatura. En la Gráfica 11 se observa que la ETP obtenida por estos métodos sigue la tendencia

similar a la ETP obtenida por el tanque de evaporación; sin embargo, el valor es más alto, sobreestimando su tendencia con respecto a la ETP de referencia. Por tal situación se sugiere este último valor como referencial para la zona de estudio con 1,904.9 mm al año.

Es importante señalar que las tendencias anuales de la ETP, obtenidas en el presente trabajo empleando los métodos de Penmann, Penmann-Montieth y el del tanque de evaporación, concuerdan con los resultados de Makhdum (2001) donde la ETP obtenida en el tanque es menor que las otras. Esto puede explicarse porque dichos métodos dan un peso mayor al efecto de la radiación solar y al flujo térmico en el aire a través de la presión de vapor, como también lo señala Chong-yu (206). Para López (2006) el método de Penmann sobreestimó también el valor de ETP, cuando la calculó en una pradera de *Festuca arundinacea* en una zona semiárida de Albacete, España.

De acuerdo al PNUMA (1992), la zona se clasifica como árida por tener un cociente P/ETP= 0.1, donde el pastoreo es posible pero es altamente vulnerable a la variabilidad climática anual o a la disponibilidad de recursos de agua; situación que es visible en la región y que limita los sistemas de pastoreo semi intensivo y extensivo.

La sustitución de animales por animales domésticos de los hatos migrantes de caza mayor significa que, por ejemplo, el agua potable debe proporcionarse para su subsistencia ya que las especies domesticadas carecen de la capacidad para obtener agua suficiente de los tejidos de la planta, o para abastecerse por largos períodos. Esto garantiza una estampida hacia áreas mejores cuando la sequía golpea con la destrucción resultante de los suelos y la vegetación alrededor del mismo.

Por lo que respecta a los índices de aridez adicionales que se evaluaron en el presente trabajo, el índice de De Martonne clasifica a la zona de La Paz como árido (estepario), pues el valor obtenido (5.3) se encuentra en el rango de 15-5.

Según el índice de Lang obtenido (7.5), la zona es propia de los climas esteparios puesto que el índice se encuentra en el rango de 0-40 de dicha clasificación.

Las tendencias de estos índices obtenidos en el presente trabajo, coinciden con la tendencia del índice propuesto por Troyo-Diéguez *et al.* (1990) quienes clasificaron la zona de La Paz como extremadamente árido empleando el índice de Budyko, estableciendo mayor aridez en el mes de mayo y menor en el mes de septiembre, correspondiendo a los meses con menor y mayor precipitación respectivamente, como se ha determinado en el presente estudio.

Ante tales resultados, el manejo sustentable del recurso hídrico, se vuelve prioritario en la región, sobre todo en las explotaciones ganaderas semi-intensivas y en los sistemas agrícolas en general.

Se reconoce adicionalmente a lo anterior que existe en la zona de estudio un índice de déficit hidro-ambiental mayor que el índice de disponibilidad hidro-ambiental (el cual es el inverso del IDHA) para todas las estaciones, excepto durante el mes de septiembre en las estaciones La Paz, Aeropuerto y Observatorio, causado por el incremento en la ocurrencia de precipitación por las causas anteriormente explicadas. La estación Alfredo V. Bonfil presenta un IDHA menor que el IDDH todo el año, corroborando más lo explicado sobre el incremento de la aridez y por ende del estrés hídrico y térmico que sufren los vegetales ante tales condiciones climáticas, lo que incrementa la incertidumbre de llevar a cabo un manejo sustentable de cualquier explotación ganadera.

Cabe señalar que el modelo de cálculo de IDHA no se ajustó de igual manera a la escala 0-10 en el Observatorio La Paz, que en las otras estaciones climáticas. La causa principal es que el modelo sólo incluye a los meses con precipitación menor de 90 mm y en dicho Observatorio se cuenta con un dato mensual de 113.0 mm de precipitación. Sin embargo, muestra la tendencia del IDHA que es marginal bajo las condiciones climáticas de la zona de estudio en general.

El análisis de regresión entre el IDHA y la precipitación muestra la relación directa entre los volúmenes de precipitación en la zona de estudio y la respuesta del IDHA, lo cual permite definir un modelo para establecer la tendencia del IDHA con sólo el valor de la precipitación promedio mensual como se mostró en la ***Ecuación (9)***, eximiendo el valor de la temperatura para dicho cálculo en condiciones similares a la región de La Paz, Baja California Sur.

Son las zonas áridas y semiáridas, las que mayor heterogeneidad del ambiente físico presentan, comparadas con otros ecosistemas, pero se considera que la regularidad de esa heterogeneidad, ha hecho posible la diversidad biológica y el alto proceso de adaptación, tolerancia y/o resistencia de las especies. Es evidente que esta baja disponibilidad de agua, ha promovido modificaciones en la fisiología de las plantas del desierto. La alta tasa de evapotranspiración, la alta radiación solar y la baja nubosidad, juegan un papel importante en el balance hídrico de la planta.

Uno de los elementos que le han conferido la forma de vida a este planeta Tierra, es sin duda el agua, que sin ella, no estarían presentes organismos superiores ni inferiores, como hoy se conocen. Por ende, en las actividades agropecuarias en general, el agua es de vital importancia, porque sin ella no habría posibilidades de desarrollar sistemas de producción alguna que permitan sostener a la población humana en su conjunto. Asimismo, la economía humana, especialmente aquella derivada de otras áreas, como muchas formas de agricultura están frecuentemente mal adaptadas a las realidades de la zonas áridas. Esto es especialmente cierto durante períodos de sequía severa.

En este sentido, Carabias (2002) señaló que la segunda mitad del siglo XX quedará registrada en la historia como la época en que la sociedad generó la mayor cantidad de alteraciones en el planeta. Una de las que ha tenido mayor impacto es la pérdida de los ecosistemas naturales y de sus servicios ambientales, ya que se trata de modificaciones en las bases estructurales propias del planeta: cambio de temperatura, pérdida de agua dulce, oxígeno, suelo y especies biológicas.

Son varias las causas vinculadas a un desarrollo rural no planificado que ha utilizado extensivamente los recursos naturales con la concepción de que son ilimitadamente renovables entre los que se encuentran:

- Demográficos: crecimiento poblacional, dispersión espacial, migración.
- Productivos: agricultura y ganadería extensiva, tecnologías inadecuadas y contaminantes, asistencia técnica incorrecta.
- Ambientales: sistemas productivos y ocupación territorial en espacios que deben estar destinados a la conservación.

El mismo autor además señaló que debido a la falta de planeación con una visión de sustentabilidad, estos procesos sociales, económicos y ambientales generaron impactos severos en la naturaleza, intensificándose profundamente a partir de la segunda mitad del siglo pasado.

Para la FAO (2006)[21] la agricultura es el sector que consume más agua dulce, en virtud de que utiliza alrededor del 70% del total extraído. En este sentido, conforme los recursos hídricos disminuyen y se intensifica la competencia de otros sectores por el agua, el sector agrícola enfrenta un complejo desafío: producir más alimentos de mejor calidad usando menos agua y asegurar la sostenibilidad del medio ambiente. Asimismo, señala Pasquale Steduto, Jefe del Servicio de Recursos, Fomento y Aprovechamiento de Aguas de la FAO (2006), 'es necesario instaurar estrategias de gestión de los recursos hídricos cuidadosamente estudiadas, junto con programas destinados a mejorar la eficacia y la productividad en la utilización del agua... la mejor ordenación del agua es el motor de crecimiento del desarrollo rural'.

Pauw (2000) señaló que las zonas áridas presentan una gran diversidad de nichos agroecológicos, los cuales ofrecen gran productividad agrícola, al mismo tiempo que son vulnerables a los procesos naturales de salinización, erosión del suelo por el viento y agua.

[21] FAO (2006). Gestión del agua: clave para satisfacer la necesidad mundial creciente de alimentos, en http://www.fao.org/newsroom/es/focus/2006/1000252/index.html. Consultado el 15 de junio de 2006.

El incremento de la población y de la producción ganadera, hace que estos ambientes naturales sean propensos a una degradación acelerada y disminución de las fuentes de agua y suelo.

En este sentido, el estudio de la evapotranspiración pretende a aportar elementos para la toma de decisiones sobre aspectos de irrigación, que conlleven a un manejo sustentable del recurso agua. En consecuencia, los indicadores de sustentabilidad al considerar al recurso agua como un elemento de evaluación, hacen necesario y justificable aportar dichos elementos.

De acuerdo a las evidencias alcanzadas y resultados obtenidos, se establecen las siguientes conclusiones:

- La temperatura media anual en la zona de La Paz es de 24.3º C.
- La precipitación media anual es 181.7 mm, principalmente en verano con un porcentaje de lluvia invernal mayor de 20 %.
- La evaporación promedio anual es de 2,381.11 mm, incrementándose su valor mensual en la época de verano.
- La evapotranspiración anual es de 1,904.9 mm de acuerdo al método del tanque de evaporación y se encuentra influenciado directamente por la temperatura, la evaporación, la precipitación y la presión atmosférica.
- El empleo del índice hidro-ambiental permite el manejo numérico más práctico sobre la determinación de los períodos de déficit y/o disponibilidad de humedad hidro-ambiental y su consecuente impacto en el manejo sustentable del recurso agua.
- En la zona de La Paz existe un déficit hidro-climático todo el año que obliga el uso de agua para sustentar una producción agropecuaria satisfactoria, dado que la aridez es la condición normal durante el año en esta zona.
- El *índice de disponibilidad hidro-ambiental* es un método práctico en la evaluación de la aridez, en condiciones semejantes a la región de La Paz.

- El análisis de componentes principales representa una herramienta útil para la identificación de las variables climáticas que más influyen en el proceso evapotranspirativo.
- Los datos aquí expuestos deben ser considerados en la planeación del uso y manejo sustentable del recurso agua en los campos agrícolas y a su vez del recurso vegetal en los agostaderos de la región.

V. LITERATURA CITADA

1. Aguilera, C.M. y Martínez, E.R. 1990. Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera. 3ª edición. U.A.Ch. Texcoco, México.

2. Almenara-Barrios J, García-Ortega C, González-Caballero JL, Abellán-Hervás MJ. 2002. Creación de índices de gestión hospitalaria mediante análisis de componentes principales. Salud Pública de México 2002. 44:533-540.

3. Ayllón, T. 1996. Elementos de Meteorología y Climatología. Edit. Trillas. Méx.

4. Bawa, A. K.; Sen, D. N. 1993. Moisture stress-induced proline accumulation in ephemeral grasses from the arid zone of India. Journal of Arid Environments, 1993, 24 (2) 135-137.

5. Cabreras, R. A.L. 1995. Un modelo matemático para estimar la evapotranspiración de la caña de azúcar bajo las condiciones cubanas. Vol.13 (01): 03-22 Caña de Azúcar.

6. Carabias, L.J. 2002. Conservación de los ecosistemas y el desarrollo rural sustentable en América Latina: condiciones, limitantes y retos. en: La Transición Hacia el Desarrollo Sustentable. Perspectivas de América Latina y el Caribe. Compiladores: Ricardo Sánchez (PNUMA), Patricia Romero Lankao (UAM-X) y Exequiel Ezcurra (INE-SEMARNAT). SEMARNAT. México.

7. Carvajal O.P.; Carpintero T., A.A. y Soto M., J.. 2004. Búsqueda de la relación entre áreas ICFES en Matemáticas, Física, Lenguaje y rendimiento en Matemáticas I y Matemáticas II a través del análisis de componentes principales. Scientia et Technica. Año X, No 26, Diciembre 2004. UTP. ISSN 0122-1701. Colombia.

8. Chong-yu X. B.; Lebing G,; Tong J.; Deliang Ch. And V.P. Singhe. 2006. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Chagjiang (Yangtze River) catchment. Journal of Hydrology. Article in Press. doi: 10.1016/j.hydrol.2005.11.029.

9. De Martonne, E., 1925. Traité de Géographie Physique. Paris

10. Domingo, F., Villagarcía, L., Boer, M.M., Alados-Arboledas, L. y Puigdefábregas, J. 2001. Evaluating the long-term water balance of arid zone stream bed vegetation using evapotranspiration modelling and hillslope runoff measurements. Journal of Hydrology 243: 17-30.

11. Domingo, F.; Villagarcía, L. y Were, A. 2003. ¿Cómo se puede medir y estimar la evapotranspiración?: estado actual y evolución. Ecosistemas 2003/1 (URL: http//www.aeet.org/ecosistemas/031/informe1.htm).

12. Escobar, H.A. *et al*. 2005. Potencial forrajero del paso salado *Distichlis spicata* L. (Greene) en ecosistemas costeros de Baja California Sur, México por el método de "componentes principales". Tec. Pec. Méx. 2005; 43(1): pp 13-25.

13. Evenari, M., I. Noy-Mier and D.W. Goodall. 1985. Hot deserts and arid shrublands. Tomos 12A y 12B. Elseiver, N.Y. USA.

14. García, M.E. 1988. Modificaciones al Sistema Climático de Köppen, para adaptarlo a las condiciones de México. Instituto de Geografía, UNAM. México.

15. Gay, L. W. 1981. Potential evapotranspiration for deserts. In: Water in Desert Ecosystems. D. D. Evans and J. L. Thames, Editors. School of Renewable Natural Resources, University of Arizona, Tucson, Arizona USA. pp 172-194

16. Grajales, M. O. 2004. Fisiología Vegetal. Edit. FES-C, UNAM. México.

17. Hashemi, F.; Habibian, M. T. 1979. Limitations of temperature-based methods in estimating crop evapotranspiration in arid-zone agricultural development projects. Agricultural Meteorology vol. 20 (3): pp 237-247.

18. Holdridge, L.R. 1967. Life Zone Ecology. Tropical Science Center. San José, Costa Rica.

19. Iuchi, Satoshi; Masamoto Kobayashi, et. al. 2000. A Stress-Inducible Gene for 9-cis-Epxycarotenoid Dioxygenase Envolved in Abscisic Acid Biosynthesis Under Water Stress in Drought-Tolerant Cowpea. Plant Physiology. 2000 Vol. 123. pp 553-562.

20. Koiwai, Hanae; Kentaro Nakaminami; Mitsunori Seo; Wataru Mitsuhashi; Tomonobu Toyomasu, and Tomokazu Koshiba. 2004. Tissue-Specific Localization of an Abscisic Acid Biosynthetic Enzyme, AAO3, in Arabidopsis. Plant Physiology, April, 2004. Vol. 134, pp 1697-1707.

21. López, U.R.; F. Martín de Santa O.; C. Fabeirob and A.Moratallab. 2006. Testing evapotranspiration equations usig lysimeter observations in a semiarid climate. Agricultural Water Management. Article in Press. doi: 10.1016/j.agwat.2006.03.014

22. Makhdum, I.M.; Muhammad Nawaz Malik, Fiaz Ahmad, Fazal Ilahi Chaudhry and Shabab-ud-Din. 2001. Investigation on the physical parameters of environment and their impact on cotton crop production in the southern Punjab, Pakistan. Journal of Research (Science), Bahauddin Zakariya University, Multan, Pakistan. Vol.12, No.2, December 2001, pp 147-154. ISSN 1021-1012.

23. Moran, J.M. and Morgan M.D. 1991. Meteorology. The Atmosphere and The Science of Weather. Edit. MacMillan Publishing Company. NY, USA.

24. Nicholson, S.E. 1999. The physical-biotic interface in arid and semi-arid systems: A Climatologist's view. In Arid Lands Management. Toward Ecological Sustainability. Thomas W. Hoekstra and Moshe Shachak editors. University of Illinois Press. Chicago, USA.

25. Ortiz, S. C.A. 1988. Elementos de Agrometeorología Cuantitativa. Edit. U.A.Ch. Texcoco, México.

26. Pauw, E. de; Gobel, W.; Adam, H. 2000. Agrometeorological aspects of agriculture and forestry in the arid zones. Conference Title: Agrometeorology in the 21st century: needs and perspectives. Papers from the International Workshop on Agrometeorology, Accra, Ghana, 15-17 February 1999. Agricultural and Forest Meteorology Vol. 103 (1/2): pp 43-58

27. Pozo, A. del; Ovalle, C.; Aronson, J.; Avendano, J. 2002. Ecotypic differentiation in Medicago polymorpha L. along an environmental gradient in central Chile. I. Phenology, biomass production and reproductive patterns. Plant Ecology Vol. 159 (2): pp 119-130

28. Rabbani, M. Ashiq; K. Maruyama, et. al. 2003. Monitoring Expression Profiles of Rice Genes Under Cold, Drought, and High Salinity Stresses and Abscisic Acid Application Using cDNA Microarray and RNA Gel-Blot Analyses. Plant Physiology. 2003 Vol. 133. pp 1755-1767.

29. Reyes, C.S. 2001. Introducción a la Meteorología. Edit. U.A.B.C.S. México.

30. Rizhsky, Ludmila; Hongjian Liang; Joel Shuman; Vladimir Shulaev; Sholpan Davletova and Ron Mittler. 2004. When Defense Pathways Collide. The Response of Arabidopsis to a Combination of Drought and Heat Stress. Plant Physiology, April 2004. Vol. 134, pp 1683-1696.

31. Roderick, M.L. & Graham D. Farquhar. 2005. An analysis of pan evaporation changes in relation to possible explanatory factors. In: Pan evaporation: An example of the detection and attribution of trends in climate variables. Edited by Roger M Gifford. Proceedings of a workshop held at the Shine Dome, Australian Academy of Science, Canberra 22-23 November 2004. pp 79-81.

32. SAGARPA. 2006. Avance Agropecuario Febrero 2006. Boletín Informativo de la SAGARPA. México.

33. Sánchez-Toribio, M.I. 1992. Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración. Geoforma Ediciones. España.

34. Terrádez G., Manuel. 2006. Análisis de Componentes Principales. http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Componentes_principales.pdf. Consultado en junio de 2006.

35. Tilahun Abebe, Arron C. Guenzi, Bjorn Martin, and John C. Cushman. Tolerance of Mannitol-Accumulating Transgenic Wheat to Water Stress and Salinity. Plant Physiology, April, 2003. Vol. 131, pp 1748-1755.

36. Torres R.E. 1990. Agrometeorología. Edit. Diana, México.

37. Troyo, D., E.; Francisco de Lachica, B. & José L. Fernández, Z. 1990. A simple aridity equation for agricultural purposes in marginal zones. Journal of Arid Enviroments (1990) 19, 353-362.

38. Troyo D., E.; J.L. García H.; B. Murillo G.; B. Zamora S.; L. Fenech L.; Orona C. I.; A. Beltrán M.; F.H. Ruiz E. 2004. Modificación al Índice de Aridez de Martonne para su adecuación al estudio del balance del agua en cuencas de zonas áridas. XXXII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. 8 al 10 de noviembre de 2004. León, Guanajuato. México.

39. Troyo D., E.; B. Murillo-A., J.L. García-H., A. Nieto-G., L. Fenech-L., A. Beltrán-M., G. Mercado-M., F.H. Ruiz Espinoza. 2005. Consideraciones metodológicas para el manejo sustentable de pastizales en zonas áridas. Ponencia presentada en el Foro de Investigación en Ciencias Agropecuarias Noviembre de 2005. U.A.B.C.S. La Paz, B.C.S.

40. Velasco-Molina, H. A. 1991. Las zonas áridas y semiáridas. Sus características y manejo. Edit LIMUSA. Méx.

41. Villaman, P.R.; L. Tijerina, C.; A. Quevedo, N. y G. Crespo, P. 2001. Comparación de algunos métodos micrometeorológicos para estimar la evapotranspiración, en el área de Montecillo, México. TERRA Vol. 19 Número 3, 2001. 281-291.

42. Whitford, W. 2002. Ecology of Deserts Systems. Academic Press. N.Y. USA.

ANEXOS

Anexo 1. Coordenadas geográficas de las estaciones climáticas evaluadas en el presente trabajo.

Número	Nombre	Latitud	Longitud	Altura
00003110	ALFREDO V. BONFIL, LA PAZ.	24º 08’	110º 33’	78 msnm
00003074	LA PAZ, LA PAZ.	24º 08’	110º 20’	8 msnm
	OBSERVATORIO LA PAZ	24º 07’	110º 19’	19 msnm
	AEROPUERTO LA PAZ	24º 04’	110º 21’	18 msnm

Anexo 2. Promedios mensuales de las variables climáticas. Estación Observatorio La Paz. La Paz, Baja California Sur.

Mes	T. máxima	T. mínima	T. media	Humedad	R. Solar	Presión	Viento	Pp	Evap	ETP
E	25.5	12.8	19.2	64	351.87	1014.7	155.52	10.4	118.9	95.1
F	26.1	13.4	19.7	62	399.73	1014.1	129.60	20.6	137.3	109.8
M	29.2	13.4	21.3	56	470.21	1012.4	155.52	0.8	200.2	160.2
A	32.2	15.6	23.9	51	522.58	1011.7	172.80	0.1	236.7	189.4
M	36.1	17.1	26.6	49	546.94	1009.8	207.36	0.3	293.0	234.4
J	37.4	18.8	28.1	55	548.13	1008.4	250.56	0.0	295.1	236.1
J	38.5	23.1	30.8	57	506.53	1009.6	224.64	16.8	299.4	239.5
A	38.3	24.3	31.3	61	490.53	1009.1	198.72	26.1	270.0	216.0
S	36.3	24.7	30.5	70	418.31	1007.4	172.80	113.2	209.9	167.9
O	33.8	20.8	27.3	65	433.11	1009.7	155.52	5.7	193.2	154.6
N	29.6	17.1	23.4	66	378.72	1012.4	120.96	2.3	140.4	112.3
D	25.9	14.1	20.0	64	347.38	1014.1	146.88	0.5	118.1	94.5
Media	32.4	17.9	25.2	60.0	451.2	1011.1	174.2	196.8	2512.2	2009.8

Donde:

T. máxima: Temperatura máxima (º C)
T. mínima: Temperatura mínima (º C)
T. media: Temperatura media (º C)
Humedad: Humedad Atmosférica (%)
R. Solar: Radiación Solar (cal/cm^2/día)
Presión: Presión Atmosférica de la estación (mb)
Viento: Velocidad del Viento (km/día)
Pp: Precipitación (mm)
Evap: Evaporación (mm)
ETP: Evapotranspiración Potencial con datos de Evaporación (mm).

Anexo 3. Análisis de regresión múltiple entre la ETP y ocho variables climáticas. Observatorio La Paz, B.C.S.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	P-Valor
Constante	79.828	11.935	6.689	0.007
Evaporación	0.802	0.001	950.811	0.000
Humedad	-0.011	0.003	-3.285	0.046
Precipitación	-0.002	0.000	-6.079	0.009
Presión	-0.076	0.011	-6.686	0.007
T. máxima	-0.446	0.120	-3.723	0.034
T. media	0.690	0.210	3.292	0.046
T. mínima	-0.294	0.099	-2.967	0.059
Viento	0.0000003	0.0000003	0.936	0.418

Nota: Variable dependiente: ETP.

Anexo 4. Análisis de varianza entre la ETP y ocho variables climáticas. Observatorio La Paz, B.C.S.

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Coeficiente F	P-Valor
Modelo	34364.4	8	4295.55	33651918	0.000
Residuo	0.00038	3	0.00013		
Total	34364.4	11			

R^2 = 100.0 %
R^2 (ajustado para g.l.) = 100.0 %
Error estándar de est. = 0.01129
Error absoluto medio = 0.00444
Estadístico de Durbin-Watson = 2.83871 (P=0.0053)
Autocorrelación residual en Lag 1 = -0.47789

Anexo 5. Análisis de regresión múltiple entre la ETP y siete variables climáticas. Observatorio La Paz, B.C.S.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	P-Valor
Constante	78.873	11.705	6.738	0.003
Evaporación	0.802	0.001	1127.460	0.000
Humedad	-0.009	0.003	-3.551	0.024
Precipitación	-0.002	0.000	-6.233	0.003
Presión	-0.076	0.011	-6.739	0.003
T. máxima	-0.461	0.117	-3.953	0.017
T. media	0.719	0.204	3.526	0.024
T. mínima	-0.310	0.096	-3.236	0.032

Nota: Variable dependiente: ETP.

Anexo 6. Análisis de varianza entre la ETP y siete variables climáticas. Observatorio La Paz, B.C.S.

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Coeficiente F	P-Valor
Modelo	34364.4	7	4909.23	9692777.2	0.00
Residuo	0.0005	4	0.0001		
Total	34364.4	11			

R^2 = 100.0 %
R^2 (ajustado para g.l.) = 100.0 %
Error estándar de est. = 0.01112
Error absoluto medio = 0.00525
Estadístico de Durbin-Watson = 3.12382 (P=0.0014)
Autocorrelación residual en Lag 1 = -0.61016