



VARIABLES EDAFOCLIMÁTICAS ASOCIADAS A LA DESERTIFICACIÓN

[EDAFOCLIMATICS VARIABLES ASSOCIATED TO DESERTIFICATION]

G. Mercado-Mancera^{1, 2*}, E. Troyo-Diéguez^{1*}, A. Aguirre-Gómez³,
B. Murillo-Amador¹, M. S. Trasviña-Casto¹, L.F. Beltrán-Morales¹,
J. L. García-Hernández⁴

¹ Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. La Paz, B.C.S.
etroyo04@cibnor.mx;bmurillo04@cibnor.mx; trasvina04@cibnor.mx;
lbeltran04@cibnor.mx.

² Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Departamento de Ciencias Agrícolas, UNAM. Estudiante de Doctorado del Programa de Posgrado, CIBNOR. La Paz, B.C.S. gmancera@cibnor.mx.

³ Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Departamento de Ciencias Agrícolas, UNAM; aag@unam.mx

⁴ Facultad de Agricultura y Zootecnia, Universidad Juárez del Estado de Durango; luis_garher@hotmail.com

*Corresponding Author

RESUMEN

La desertificación es el proceso de degradación de las tierras por las variaciones climáticas y las actividades humanas. México presenta un 64% del territorio deteriorado, causado por la deforestación, el sobrepastoreo, y el cambio de uso del suelo. Los objetivos de esta investigación fueron establecer el grado de desertificación de cuencas agrícolas en Baja California Sur y correlacionarlo con las variables climáticas y las físico-químicas del suelo. Se realizó el muestreo de suelo a dos profundidades (0-10cm y 10-30cm); se determinó la textura, pH, materia orgánica, conductividad eléctrica, sodio, nitrógeno, potasio y fósforo. Se calculó la evapotranspiración y las tendencias de la temperatura media y la precipitación de 1978 al 2008. Los suelos son franco arenoso, de color claro, pH entre 7.10 y 8.05. El contenido de materia orgánica es bajo, tienden a la salinidad con valores que oscilan de 33 hasta 8100 $\mu\text{S cm}^{-1}$. Los demás elementos químicos son bajos excepto el sodio que ha incrementado sus valores por mal manejo del riego agrícola. La temperatura media anual oscila entre 21.7 y 25.4°C. Se concluye que los suelos de estas cuencas tienden al deterioro como consecuencia de la sobreexplotación de los recursos, asimismo la baja precipitación que oscila entre 150 y 180 mm al año, y la alta evapotranspiración anual.

Palabras clave: desertificación; química del suelo; clima; índice de disponibilidad hidro-ambiental.

SUMMARY

Desertification is a land degradation process generated by climatic variations and human activities. Mexico evidences a 64 % of degraded land, caused by deforestation, overgrazing, and change of land use. The aims of this research were to determine the degree of desertification of agricultural watershed in Baja California Sur and to correlate it with climatic variables and soil physical-chemistries. Samples of soil at two depths were collected (0-10 cm and 10-30 cm) and analyzed to determine texture, pH, organic matter, electrical conductivity, sodium, nitrogen, potassium and phosphorus. We calculated evapotranspiration and estimated the tendencies for average temperature and precipitation from 1978 to 2008. Soils are sandy loam, clear color, pH from 7.10 to 8.05. Organic matter content was low, with salinity varying from 33 to 8100 $\mu\text{S cm}^{-1}$. The content of other chemical elements were low except for sodium, which values were high because of inadequate management of agricultural irrigation. Annual average temperature oscillates between 21.7 and 25.4 °C. It is concluded that the agricultural lands of these watershed tend to deteriorate as a consequence of resources overexploitation, and also due to low precipitation, which oscillates from 150 to 180 mm per year, with high annual evapotranspiration.

Key words: Desertification; chemistry of soil; climate; index of hydro-environmental availability.

INTRODUCCIÓN

La desertificación es el proceso de degradación de las tierras en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, donde las tierras son sumamente vulnerables, la vegetación es escasa y el clima es particularmente hostil; dichas áreas están habitadas por una quinta parte de la población mundial. La desertificación es uno de los procesos de degradación ambiental más alarmantes del mundo (UN, 1994).

Las causas de la degradación ambiental pueden ser naturales o antropogénicas. Entre los factores antropogénicos que desencadenan un proceso de desertificación, se incluyen: cultivo en suelos frágiles, reducción del tiempo de descanso de la tierra, sobrepastoreo y un inadecuado manejo del agua de riego y maquinaria agrícola, entre otros (UN, 1996).

La degradación antrópica de las tierras es un proceso dinámico que puede ser reversible, dentro de límites marcados por la posibilidad de recuperación del suelo, sustrato fundamental no renovable, dada la longitud del periodo necesario para esa recuperación. Puede afirmarse que los problemas ambientales son teóricamente reversibles, a excepción de la pérdida de los recursos genéticos y del suelo. Cuando la degradación de la tierra alcanza un estado irreversible, se dice que se ha desertificado; cabe mencionar que en ocasiones no muestra evidencias de ser un proceso abrupto, dado que por el contrario, es gradual y puede ocurrir en cualquier condición climática, en donde son aplicables los conceptos y acciones relativos a la desertificación (Congreso de la Unión, 2001).

México tiene alrededor del 64% de su territorio con algún grado de degradación; particularmente el estado de Baja California Sur en el noroeste de México, caracterizado por tener climas áridos y semiáridos, presenta una alta vulnerabilidad a la desertificación de sus tierras.

El avance de la desertificación es un desafío internacional y nacional, en el que deben involucrarse organizaciones gubernamentales y no gubernamentales, asimismo las instituciones competentes en el tema, pues se ha demostrado que la prevención es más eficaz y menos costosa que la rehabilitación de las tierras afectadas por la desertificación.

Pauw *et al.* (2000) señaló que las zonas áridas del mundo están caracterizadas por un déficit de precipitación (pp) en relación a la evapotranspiración potencial (ETp). Dicha precipitación presenta dos aspectos de suma importancia para la vida de los organismos: su tendencia espacial y temporal. A su vez, la intensidad de la misma ejerce un papel importante en el proceso de desertificación, toda vez

que acelera la erosión del suelo en los terrenos agrícolas, sobre todo en aquellos que presentan pendientes mayores a 10%.

Desde su origen, la desertificación ha sido asociada a condiciones de aridez, motivo de un análisis sistematizado sobre las características del proceso, causas y consecuencias, lo que proporciona un marco conceptual de carácter integral, lo que permite construir propuestas programáticas completas y radicales (UN, 1994). De acuerdo al Programa Ambiental de las Naciones Unidas (UNEP, 1992), las regiones en donde la tasa anual pp/ETp es de 0.05 a 0.65, pueden considerarse vulnerables a la desertificación.

Mainquet (1994) caracterizó a la desertificación como el "último paso de degradación e irreversible de la tierra a tierra estéril". Dicha definición ignora el conjunto complejo de procesos que gradualmente se desarrollan (que antes de un determinado tiempo, se consideran aún reversibles) en tasas diferentes. Más bien, el término se refiere a la condición final que es la culminación extrema de esos procesos. Un enfoque alternativo sería la definición de los procesos por sí mismos y caracterizar la intensidad de degradación, en que sus efectos separados o combinados pueden ser considerados las causas irreversibles del fenómeno.

Hernández *et al.* (2000) determinaron un indicador de desertificación para zonas agrícolas, el cual se estima por la relación entre la producción agrícola total y el consumo de fertilizantes inorgánicos (N, P, K); el mismo se ha aplicado en la agricultura de la región de Murcia, España, e indica la respuesta de la tierra a la fertilización con el tiempo. El indicador está basado en la observación temporal de la pérdida de fertilidad de los suelos agrícolas cuantificada por la tasa de consumo de fertilizantes inorgánicos, respecto de la producción agrícola total. Los resultados validan al citado indicador para determinar procesos de desertificación provocados por prácticas agrícolas insostenibles e inducir estudios más profundos de degradación de suelo. En las etapas iniciales de degradación, la productividad de un agroecosistema puede estar enmascarada por el incremento de la aplicación de abonos, insecticidas, agua y costos de cosecha. En consecuencia, si los efectos destructivos como la pérdida de materia orgánica, erosión, lixiviado de nutrimentos y salinización continúa, la degradación es probable que alcance un punto en que sus efectos sean difíciles de mitigar ecológica o económicamente (Hillel y Rosenzweig, 2002).

Un elemento de importancia es la salinización del suelo en las zonas áridas, la cual conduce a la desertificación; dicho proceso reduce la calidad del suelo y limita el crecimiento de los cultivos. El control de este problema implica el inventariado, mapeo y

valoración de la salinidad del suelo, que requiere de métodos rentables, rápidos y confiables, para determinar la salinidad del suelo en campo (Amezketta, 2006).

En pastizales áridos y semiáridos, algunos modelos sugieren que la desertificación conduce a la sustitución de la vegetación por matorral. Respecto a lo anterior, Li *et al.* (2006) condujeron en la región de Qinghai-Tíbet, al noroeste de China, un estudio en cuatro sitios con diferente estado de desertificación: leve, moderado, severo y muy severo. Asimismo, (Danfeg *et al.* 2006) evaluaron la cubierta vegetal, biomasa, especies dominantes y algunos parámetros del suelo. Sus resultados mostraron que la proporción de limo decreció de 12 a 1% del estado leve al muy severo, arcilla de 71 a 42% y de arena de 17 a 93%. La materia orgánica se redujo con la desertificación, evidencia que indica la destrucción de la estabilidad en la estructura física y el contenido nutrimental del suelo, con la disminución progresiva de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). Dichos autores señalaron que en respuesta al cambio en las propiedades del suelo y por tanto al avance de la desertificación, las especies herbáceas (principalmente pastos) disminuyen en la composición vegetal de la zona y gradualmente son reemplazadas por matorral xerófilo.

Por otra parte, en regiones agrícolas semiáridas, la sequía como fenómeno relacionado con la desertificación, es un término subjetivo que designa años en los que un cultivo llega a ser una actividad improductiva; en este contexto, los cultivos fallan y la productividad de pastos disminuye significativamente. La sequía es una amenaza constante, un proceso de la naturaleza con el cual los habitantes rurales en regiones áridas deben enfrentarse continuamente. Aún bajo las condiciones de incertidumbre, paradójicamente la ocurrencia de sequía es una certeza; eventualmente, sólo el tiempo, la duración y la severidad son variables. Durante una sequía, la degradación del ecosistema en la forma de erosión del suelo y en pérdida de vegetación, ocurre en un ritmo acelerado (Hillel y Rosenzweig, 2002).

Cuando la superficie explotada por el hombre es reducida (pequeños enclaves dentro de un dominio ecológico grande y continuo), el ecosistema en general no es afectado gravemente. Sin embargo, como la población crece progresivamente y el manejo humano llega a ser extenso y más intensivo, la integridad ecológica de regiones enteras es amenazada. Especialmente las áreas que comprenden las regiones semiáridas y áridas, que a causa de la escasez de agua y la fragilidad del suelo, típicamente pobres en materia orgánica, estructuralmente inestables y con una elevada erodabilidad, son más vulnerables a la degradación, a la vez que son de baja capacidad de resiliencia (Hillel y Rosenzweig, 2002).

En un periodo de tiempo significativo (siglos) y en ausencia de actividad humana, eventualmente los suelos erosionados podrían recuperarse, pero en escalas de tiempo menor, años o décadas, y si la actividad humana continua sobreexplotando los recursos, la condición degradada de un suelo erosionado puede ser irreversible. Por lo anterior, medir la productividad de un área en constante cambio de un año a otro o de una década a otra, es un problema complejo y a la vez multifactorial, dado que la recuperación del sistema depende de diversos factores (Dregne, 1994).

Ante este escenario, es importante referenciar las relaciones entre las condiciones edáficas y climáticas para entender el impacto de las actividades humanas y su relación con el proceso de desertificación en una zona agrícola. Tal comprensión puede contribuir al control de la desertificación y la restauración de tierras degradadas. En este trabajo se exponen los resultados de la investigación sobre las tendencias climáticas, la calidad del suelo y el estatus que guarda el proceso de desertificación, en dos cuencas agrícolas subtropicales de las zonas semiáridas del noroeste de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se condujo en las cuencas agrícolas de Comondú y de La Paz, Baja California Sur, localizadas en el noroeste de México. La cuenca de Comondú se localiza entre los paralelos 24° 54' y 25° 16' N y los meridianos 111° 32' y 111°52' W, con una elevación entre 30 y 80 m. La cuenca de La Paz, por su parte, se ubica entre 23° 55' y 24° 11' N, y entre 110° 11' y 110° 34' W, con una elevación de 25 a 380 m. El clima de las cuencas varía del tipo semiárido a árido, con vegetación de tipo sarcocaula, matorral espinoso y algunas gramíneas. Los suelos son de color claro, con textura predominante franco arenoso, en ambas cuencas (Cardona *et al.*, 2004; Mercado, 2006). La agricultura en la región es de riego, con cultivos anuales (hortalizas y granos) y perennes (alfalfa y cítricos) (SAGARPA-INIFAP, 2009).

Se realizó el análisis climático y edáfico para correlacionarlos con el proceso de desertificación en dichas cuencas agrícolas. Para el análisis climático se utilizaron las series de datos climáticos diarios de 1978 a 2008, de las estaciones ubicadas en las cuencas de La Paz y Comondú, Baja California Sur (SMN-CONAGUA, 2009), (Tabla 1); con dicha información se determinaron las tendencias de la temperatura, evaporación, evapotranspiración y precipitación. Asimismo, para cuantificar la disponibilidad hidrodinámica se aplicó el Índice de disponibilidad hidrodinámica por el método de De Martonne, modificado por Troyo *et al.* (2004), mediante la siguiente expresión:

$$\text{Índice de Aridez} = 0.33 * [(pp * 12) / (t + 10)] \longrightarrow (1)$$

Donde: pp es la precipitación mensual (mm) y t es la temperatura media anual (°C), registradas en una determinada estación climática.

Con la finalidad de encontrar un ajuste apropiado a la ecuación de De Martonne, mediante el método de mínimos cuadrados se eligió un modelo numérico alternativo que estuviese altamente correlacionado con el déficit hídrico y que a la vez fuese sensible a valores bajos de precipitación. El modelo elegido fue una función polinomial donde X_1 y X_2 son la temperatura media mensual (°C) y la precipitación mensual (mm), respectivamente: $A_{\text{mod}} f(t, pp)$ (Mercado, 2006).

El índice utilizado propone una escala limitada de 0 a 10 unidades, que aplica sólo a condiciones de precipitación menor a 100 mm mensuales, característico de las zonas áridas. Dicha función fue definida de la siguiente manera (ecuación 2):

$$IDHA = Ke * [(pp * 12) / (t + 10)] \longrightarrow (2)$$

Donde: IDHA es el Índice de disponibilidad hidro-ambiental, pp es la precipitación mensual en mm, t es la temperatura media mensual en °C y Ke es un coeficiente adimensional de ajuste de escala con valor 0.33.

De manera complementaria, se obtuvo la siguiente relación (ecuación 3):

$$IDDH = 10 - IDHA \longrightarrow (3)$$

Donde: IDDH es el Índice de déficit hidro-ambiental. El Ke en la ecuación 2, propuesto para modificar el Índice de De Martonne, fue establecido con el valor de 0.33, dado que las condiciones de aridez de la zona 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 y posteriormente en conjunto para cada cuenca.

Para el análisis edáfico se realizaron muestreos de suelo a 10 y 30 cm de profundidad, para determinar las características físico-químicas en tres ambientes, suelo presumiblemente afectado, suelo natural inalterado y suelo agrícola en aparente estabilidad, en cada cuenca. Los análisis se realizaron en el laboratorio de edafología del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, en La Paz, Baja California Sur, bajo los requisitos establecidos en la Norma NMX-EC-17025-IMNC-2006 (ISO/IEC 17025:2005) (CENAM, 2007). Se determinó el pH, textura, color, conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$), densidad aparente (gr cm^{-3}), bicarbonatos, calcio, magnesio, fósforo, azufre, fierro, sodio, potasio y nitrógeno (kg ha^{-1}) y materia orgánica (%).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

a) Análisis climático.

A partir de los resultados obtenidos, en las Figuras 1, 2 y 3 se observa, que la cuenca de La Paz presenta temperatura y precipitación mayores que la cuenca de Comondú, con valores de precipitación de 170.2 y 166.2 mm anuales, y temperaturas de 24.3 y 22.2°C promedio anual, respectivamente. Sin embargo, las tendencias de dichas variables son semejantes entre las dos cuencas, aunque, la precipitación presenta diferencias, principalmente en el período de lluvia invernal. La cuenca de Comondú tiene mayor lluvia invernal, que son producto del arribo de los vientos a la costa oeste de la península de Baja California Sur. Las dos cuencas presentan su mayor porcentaje de lluvia anual en la época de verano, específicamente en los meses de agosto y septiembre, temporada de mayor frecuencia de tormentas tropicales en la región.

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

Cuenca	Nombre de la Estación	Latitud	Longitud	Elevación
LA PAZ	ALFREDO V. BONFIL.	24° 09'	110° 33'	78 m
LA PAZ	LA PAZ.	24° 08'	110° 20'	8 m
LA PAZ	OBSERVATORIO LA PAZ.	24° 07'	110° 19'	19 m
COMONDÚ	Cd. CONSTITUCIÓN.	25° 00'	111° 40'	45 m
COMONDÚ	Cd. INSURGENTES.	26° 05'	111° 55'	52 m
COMONDÚ	LEY FEDERAL DE AGUAS #5.	25° 12'	111° 33'	45 m
COMONDÚ	VILLA MORELOS.	24° 56'	111° 37'	56 m

Fuente: CONAGUA (2009).

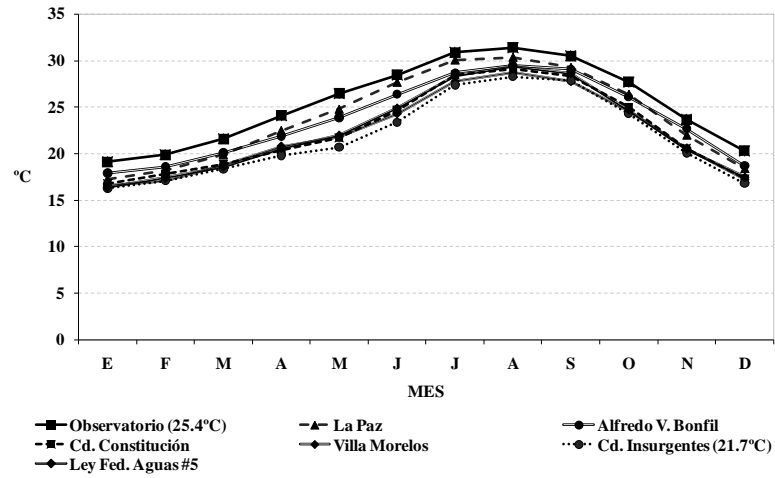


Figura 1. Tendencia de la temperatura media mensual (°C) por estación climática, el valor mayor se observó en la estación Observatorio y el menor en la estación Cd. Insurgentes.

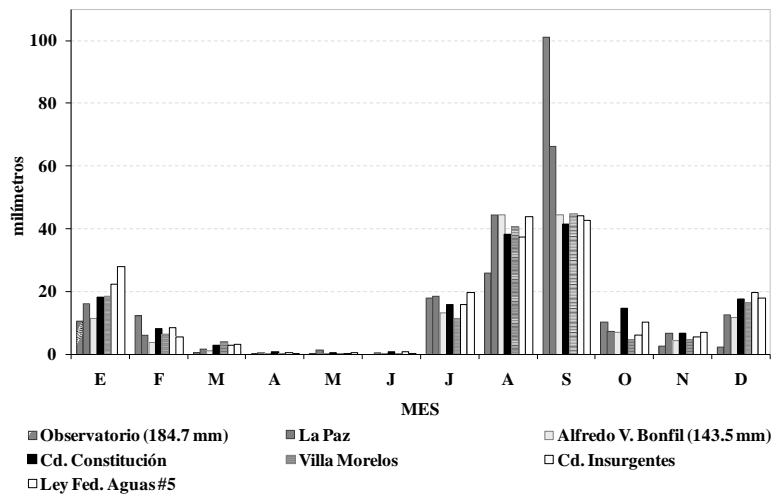


Figura 2. Tendencia de la precipitación mensual (mm), por estación climática, el valor mayor se observó en la estación Observatorio y el menor en la estación Alfredo V. Bonfil.

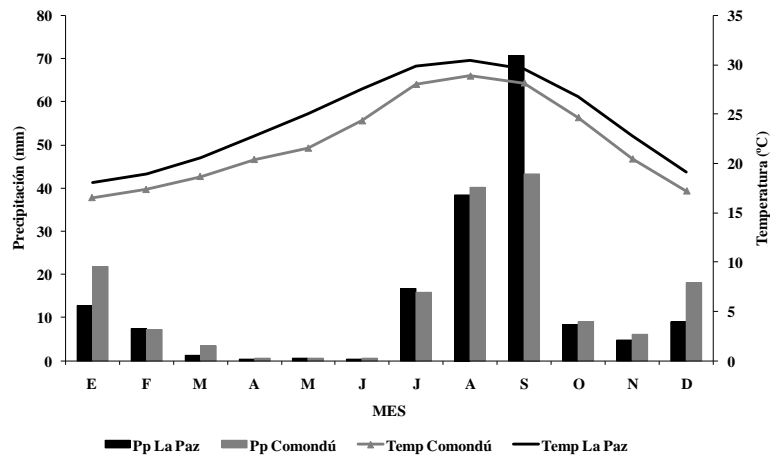


Figura 3. Tendencia de la temperatura (°C) y precipitación (mm) media mensual por cuenca.

Las diferencias de temperatura entre las cuencas de La Paz y Comondú, B.C.S, se deben al efecto del proceso de urbanización que está ocurriendo en La Paz, la cual ha reducido la superficie de cultivo y de vegetación natural. La cuenca de Comondú presenta mayor superficie de cultivo y vegetación natural que atenúa la acumulación del calor producido por las superficies cubiertas con asfalto y concreto, como ocurre en la ciudad de La Paz.

La evaporación es de 2373.7 y de 1967.5 mm anuales en las cuencas de La Paz y Comondú, (Figura 4), lo cual refleja la elevada pérdida de humedad del ambiente, principalmente por las altas temperaturas diurnas y la intensa radiación solar. En estas condiciones, la evaporación favorece la pérdida de agua y disminuye la disponibilidad para la vegetación natural, en tanto que los sistemas de riego deficientes en la región incrementan las pérdidas de agua.

El cálculo de la evapotranspiración potencial (ETp) se realizó por el método del tanque evaporímetro (Figura 5), considerando el valor de 0.8 para el coeficiente *C* en la fórmula correspondiente. Los valores totales anuales fueron de 1901.7 y de 1543.8 mm para las cuencas de La Paz y Comondú. El proceso evapotranspirativo se incrementa en la mitad caliente del año, cuando ocurren mayores pérdidas del agua que se aplica en los riegos agrícolas. Es claro que estas condiciones climáticas han favorecido el crecimiento y desarrollo de comunidades de matorral xerófilo que se han adaptado a las condiciones de aridez que predominan en la región noroeste de México.

A diferencia de la ETp obtenida por el método del tanque evaporímetro, la ETP obtenida por el método de Thornthwaite (Aguilar y Martínez, 1996) (Figura 6) tiende a incrementarse en los meses de julio a

septiembre, lo cual obedece al método de cálculo, puesto que sólo emplea la temperatura media, la cual sigue una tendencia similar. La ETp obtenida por este método también presentó valores elevados, 1446.5 y 1156.1 mm en La Paz y Comondú.

A partir de los datos de temperatura y precipitación promedio mensual de las series de datos disponibles para cada estación climática, mediante las fórmulas 2 y 3 se construyeron los índices de disponibilidad hidroambiental (IDHA) y de déficit hidro-ambiental (IDDH) que se muestran en las Figuras 7 y 8.

El IDHA en todas las estaciones analizadas es bajo. La mayoría de los meses presentan un déficit hidroambiental lo que motiva a diseñar estrategias para eficientizar el uso del agua de los acuíferos de las regiones de estudio. Asimismo, muestra la fragilidad que tiene el ecosistema natural a la falta de agua, el cual está caracterizado por ecosistemas de matorral espinoso y crassicaule.

Para la cuenca de La Paz, el IDHA (Figura 7) muestra que sólo en el mes de septiembre existe un valor mayor que el IDDH lo que representa una oferta o disponibilidad hídrica ambiental, causada por el arribo de tormentas tropicales a la región de estudio durante esta época.

La cuenca de Comondú (Figura 8) presenta condiciones de menor IDHA que la cuenca de La Paz, donde el valor numérico del IDHA es menor todo el año con respecto al IDDH, por lo que no es posible detectar oferta o disponibilidad hídrica ambiental en ninguna época del año. En la misma figura se muestra el efecto de la mayor aridez que se encuentra hacia el norte del estado de Baja California Sur, lo que debe motivar a un uso más eficiente del recurso hídrico.

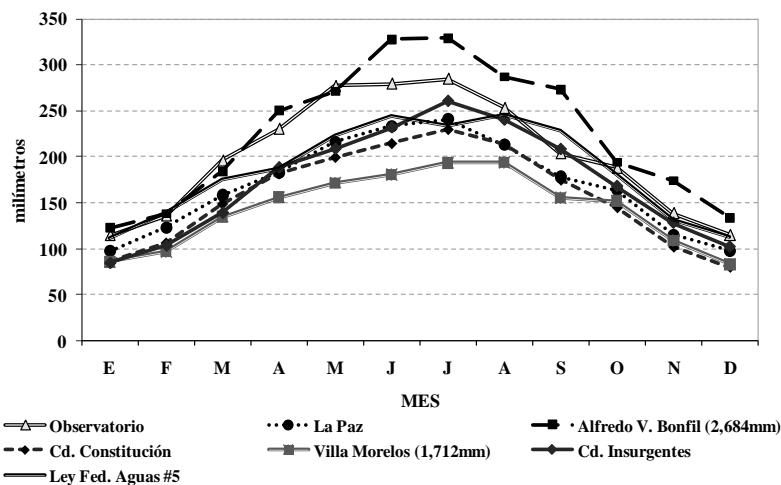


Figura 4. Evaporación promedio mensual (mm), por estación climática; el valor mayor se observó en la estación Alfredo V. Bonfil y el menor en la estación Villa Morelos.

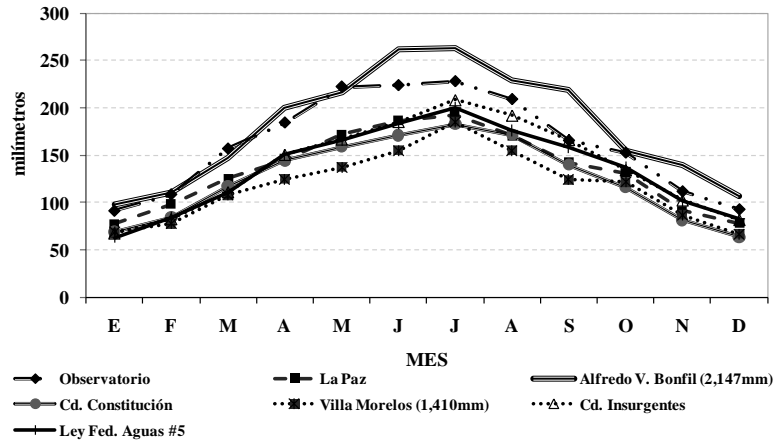


Figura 5. ETP por el método del tanque evaporímetro (mm) por estación climática, el valor mayor se observó en la estación Alfredo V. Bonfil y el menor en la estación Villa Morelos.

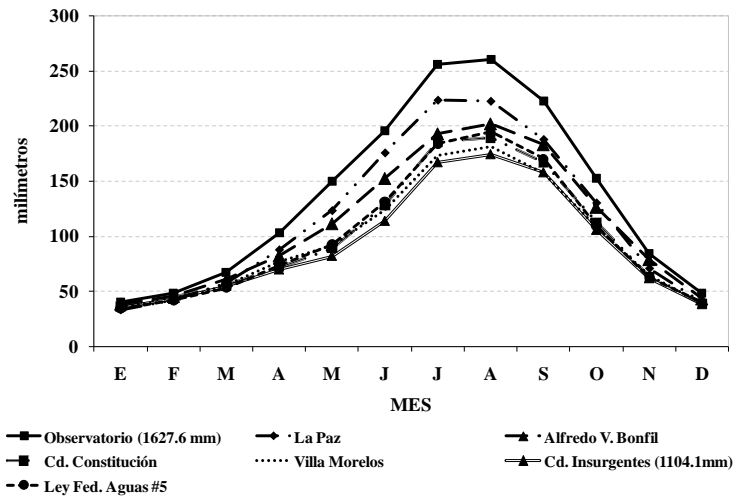


Figura 6. ETp por el método de Thornthwaite (mm), por estación climática; el valor mayor se observó en la estación Observatorio y el menor en la estación Cd. Insurgentes.

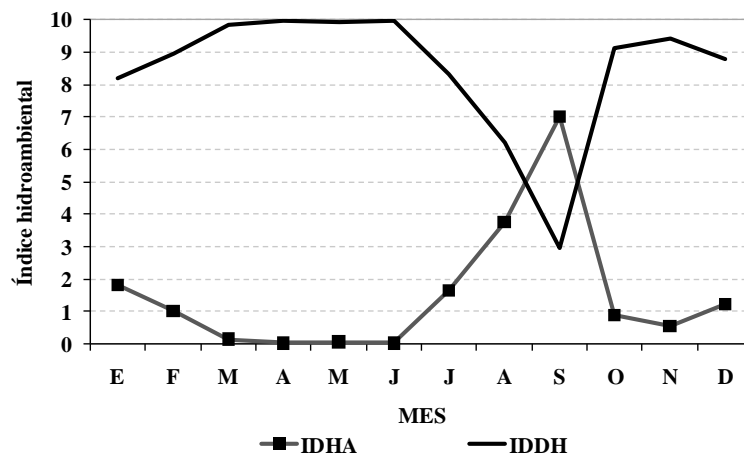


Figura 7. IDHA e IDDH promedio mensual, cuenca de La Paz, Baja California Sur.

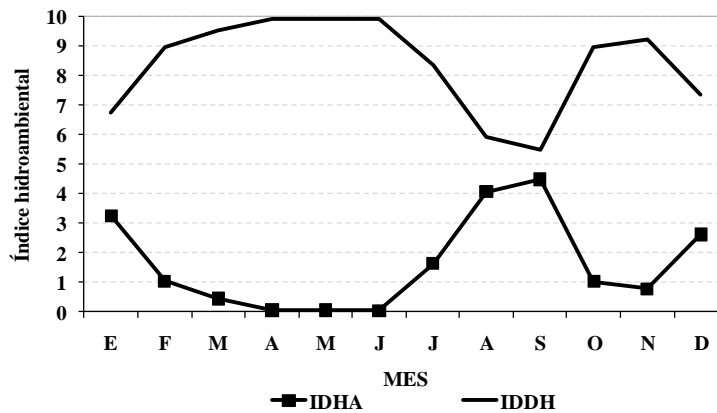


Figura 8. IDHA e IDDH promedio mensual, cuenca de Comondú, Baja California Sur.

La aplicación de los mencionados indicadores, así como la estimación y uso de índices de aridez, permitirá ampliar las herramientas en la lucha contra la desertificación (Herrmann y Hutchinson, 2005), puesto que el agotamiento del recurso hídrico genera una mayor perturbación en la vegetación y en la eventual alteración de hábitats de numerosas especies de fauna, entre otros efectos adversos para los ecosistemas.

Los procesos de producción primaria, sean agropecuarios o forestales, están determinados por las condiciones climáticas, aunado a otros factores, que determinan el éxito y la sustentabilidad de los procesos. Es evidente que las interacciones de los seres humanos, con la tierra y el agua, han causado la desertificación en áreas extensas (Sharma, 1998). En este sentido, las cuencas de La Paz y de Comondú han sufrido el deterioro causado por la sobreexplotación de los recursos naturales y el cambio del uso del suelo. Por tal motivo, debe existir una planeación más efectiva del uso y manejo del recurso hídrico en los sistemas de producción agropecuarios y forestales, para disminuir el riesgo de incrementar la degradación ambiental (Herrmann y Hutchinson, 2005; UN, 1996; Chapela, 2003).

b) Análisis edáfico.

A partir del análisis físico-químico del suelo en las cuencas de La Paz y Comondú, considerando los tres ambientes de análisis, suelo presumiblemente afectado, suelo natural inalterado y suelo agrícola en aparente estabilidad, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 2.

Para el caso de los suelos del ambiente natural inalterado, la mayoría de los elementos químicos cuantificados mostraron baja concentración (kg ha^{-1}), típica de suelos de zonas áridas que sustentan vegetación escasa de hojas y donde el aporte de materia orgánica y otros elementos es reducido. Los

suelos son de baja capacidad de retención de humedad, que no han tenido manejo agrícola ni recibido aporte de fertilizantes químicos, razón por la que fueron utilizados de referencia para entender si existe o no un proceso de degradación de los suelos que están y han sido sometidos a cultivo de diversas especies vegetales.

Los suelos presumiblemente afectados se consideraron con base al estado de abandono de las fincas y su infraestructura dañada. Dichos predios presentaron pozos para agua de riego abandonados, ya sea porque se agotaron o bien porque la conductividad eléctrica del agua era elevada, inapropiada para cultivos agrícolas. Es importante aclarar que los predios de este ambiente sólo se muestrearon en la cuenca de Comondú, ya que en La Paz la tierra tiene un uso más intensivo, sea para actividades agropecuarias o para el desarrollo de infraestructura urbana. La agricultura en estas dos cuencas es de riego y está basada en la producción de hortalizas, granos, forrajes y cítricos, principalmente naranja.

En este sentido, es claro que los suelos que tienen y han tenido manejo agronómico (ambiente A y C, respectivamente), presentan mayores concentraciones de macro elementos, comparados con los suelos inalterados (ambiente B). Sin embargo, se encontró que la concentración de Na^+ se ha incrementado entre el 100 y 250% en los ambientes A y C, respectivamente, causa por la cual se han dejado de producir cultivos en dichos predios. Los valores de la conductividad eléctrica presentan una tendencia similar a la del Na^+ , motivado por la sobreexplotación del acuífero en la región, que se presume ha provocado intrusión salina al acuífero, especialmente en la cuenca de Comondú (CONAGUA-UABCS, 2009).

En la cuenca de La Paz se presenta el mismo problema pero debido a otras causas. Actualmente, el uso de agua residual tratada para riego agrícola se ha

incrementado en la última década, lo que ha favorecido la acumulación de sales en el suelo presentando valores hasta de $8070.0 \mu\text{S cm}^{-1}$. En esta región se producen principalmente pastos para alimento de ganado y hortalizas, aunque estas últimas se riegan con agua de pozo. Sin embargo, el crecimiento de la ciudad continúa presionando e incrementando la explotación del acuífero de La Paz, puesto que el agua del mismo se destina cada día más para el consumo urbano (Cruz, 2007).

Sin duda, el porcentaje de materia orgánica es un buen indicador de la productividad agrícola del suelo (Hernández *et al.* 2000) y un importante criterio para estimar la degradación del suelo en el ecosistema (Hillel y Rosenzweig, 2002). Los ambientes analizados presentan un porcentaje bajo de materia orgánica, 0.7, 0.3 y 0.4% en el ambiente A, B y C, respectivamente (Figura 9).

Los resultados ratifican que el aporte de fertilizantes químicos es necesario para mantener la productividad

de los sistemas agrícolas, asimismo, se confirma que debe promoverse el cálculo preciso de las necesidades nutrimentales de cada cultivo para no acelerar los procesos de contaminación y degradación de los suelos de las dos cuencas de estudio. De igual forma, debe fomentarse la reforestación de los predios abandonados con especies nativas tolerantes a salinidad y/o sodicidad, para mitigar a mediano y largo plazo el daño realizado en el ecosistema árido de las dos cuencas.

La clase textural dominante en las cuencas de La Paz y Comondú fue franco arenosa (arena mayor de 60 %, arcilla y limo entre 15 y 20 %) (Figura 9), que favorece una alta infiltración y a la vez un bajo aprovechamiento del agua de riego por las plantas, que aunado a las altas temperaturas, incrementa las necesidades hídricas en los agroecosistemas de las cuencas estudiadas.

Tabla 2. Análisis físico-químico del suelo por ambiente analizado.

Ambiente	pH	HCO_3^- (kg ha^{-1})	Ca (kg ha^{-1})	Mg (kg ha^{-1})	N (kg ha^{-1})	P (kg ha^{-1})
A	7.0	2148.8	2346.0	1213.8	23.8	238.0
B	7.5	1717.0	472.6	462.4	13.6	238.0
C	7.7	2074.0	2417.4	1268.2	17.0	34.0
Ambiente	K (kg ha^{-1})	Fe (kg ha^{-1})	S (kg ha^{-1})	Na (kg ha^{-1})	M. O. (%)	C. E. ($\mu\text{S cm}^{-1}$)
A	975.8	91.8	2352.8	7231.8	0.7	844.21
B	476.0	81.6	1394.0	3811.4	0.3	408.59
C	676.6	71.4	1016.6	9564.2	0.4	1039.62

Ambiente A: Suelo agrícola en aparente estabilidad, B: Suelo natural inalterado, C: Suelo presumiblemente afectado. HCO_3^- : ión bicarbonato, Ca: calcio, Mg: magnesio, N: nitrógeno, P: fósforo, K: potasio, Fe: fierro, S: azufre, Na: sodio, M.O.: materia orgánica, C.E.: conductividad eléctrica.

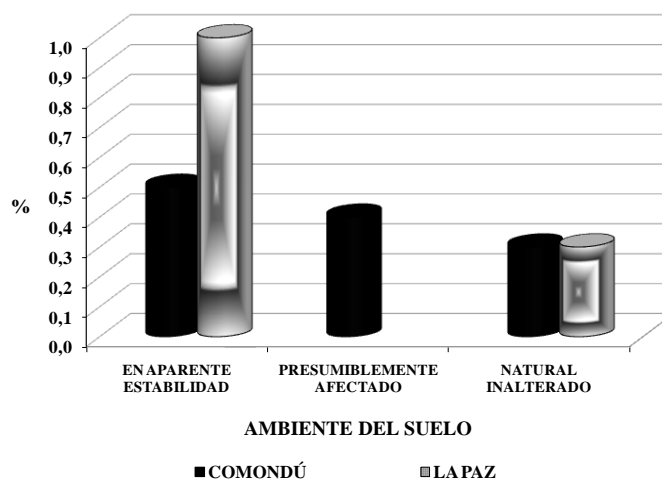


Figura 9. Porcentaje de materia orgánica, por cuenca y ambiente analizado.

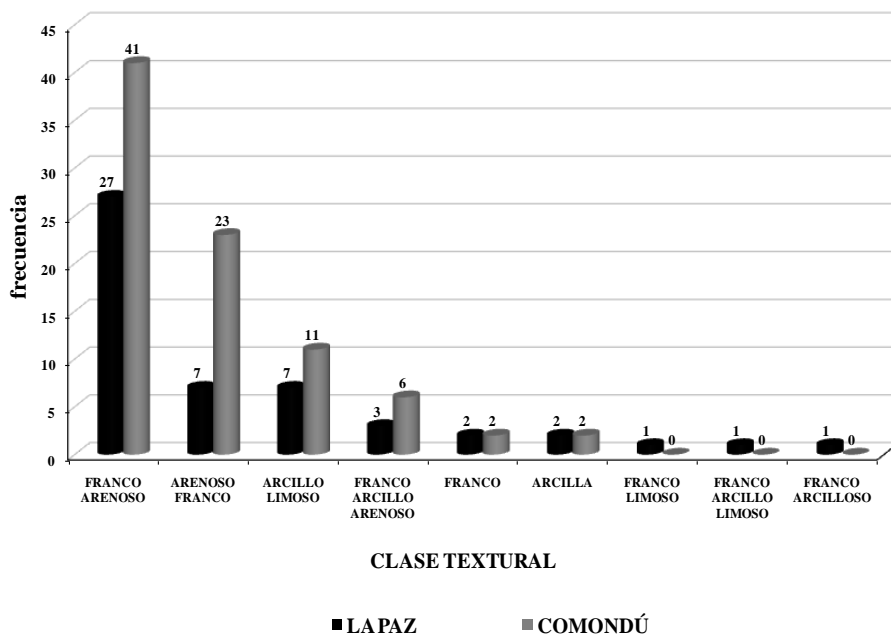


Figura 10. Frecuencia de las clases texturales del suelo, por cuenca.

De acuerdo a lo anterior, la disminución de la fertilidad del suelo a través de la reducción de la materia orgánica, el mayor porcentaje de arena y la disminución de los nutrimentos del suelo (Danfeg *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2006), muestran el avance del proceso de desertificación en las dos cuencas, aunque se hace más evidente en la cuenca de Comondú. Por su parte, en la cuenca de La Paz, el empleo de aguas tratadas para el riego agrícola pone en riesgo la calidad del suelo, por el inadecuado tratamiento químico de ella.

Se realizó una regresión múltiple con los datos obtenidos en el análisis químico de las muestras de suelo recolectadas en las cuencas de La Paz y Comondú., considerando a la materia orgánica como variable dependiente, en tanto que las variables independientes fueron la densidad, pH, conductividad eléctrica, bicarbonatos, calcio, magnesio, fósforo, azufre, hierro, sodio, potasio, nitrógeno y porcentaje de arcilla. En la Tabla 3 se presentan los resultados del análisis de regresión múltiple. En la Tabla 4, se muestra el análisis de varianza correspondiente.

Tabla 3. Estadísticos del análisis de regresión múltiple entre la materia orgánica y trece variables edáficas independientes.

Parámetro	Estimación	Error Estadístico		
		Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	0,449216	1,09821	0,409045	0,6832
Densidad	-0,458535	0,23274	-1,97016	0,0510
pH	0,0381244	0,125291	0,304286	0,7614
CE	-0,000107	0,000126	-0,84707	0,3985
Bicarbonato	0,0008638	0,0013856	0,623437	0,5341
Ca	0,0001881	0,0003623	0,519411	0,6044
Mg	-0,000537	0,0008308	-0,64591	0,5195
P	-0,000931	0,0009401	-0,98975	0,3242
S	0,0011058	0,0003319	3,33124	0,0011
Fe	0,0013908	0,0116665	0,119211	0,9053
Na	0,0002967	0,0003208	0,924905	0,3568
K	0,0061770	0,0017039	3,62505	0,0004
N	0,64699	0,0777016	8,3266	0,0000
% de arcilla	0,0010165	0,0029412	0,345606	0,7302

Nivel de confianza: 95.0 %.
 $R^2 = 79.5039\%$

Tabla 4. ANOVA entre la materia orgánica y trece variables edáficas independientes.

Fuente	Suma de Cuadrados	de Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	30,0342	13	2,31032	38,19	0,0000
Residuo	7,74283	128	0,0604908		
Total	37,777	141			

(Corr.)
 $R^2 = 79.5039 \%$
 R^2 (ajustado para g.l.) = 77.4222 %
 Error estándar del estadístico = 0.245949
 Error absoluto medio = 0.18162
 Estadístico Durbin-Watson = 1.28856 (P=0,0000)
 Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0.355282

El resultado de ajuste a un modelo de regresión múltiple para describir la relación entre la materia orgánica (MO) y 13 variables independientes se muestra en la ecuación siguiente:

$$MO = 0.4492 - 0.4585 * d + 0.0381 * pH - 0.00011 * CE + 0.00086 * HCO_3 + 0.00019 * Ca - 0.00054 * Mg - 0.00093 * P + 0.0011 * S + 0.0014 * Fe + 0.0003 * Na + 0.0062 * K + 0.647 * N + 0.0010 * Ar \rightarrow (4)$$

Donde: MO= Materia orgánica; d=densidad; pH= pH; CE= conductividad eléctrica; HCO₃= bicarbonato; Ca= calcio; Mg= magnesio; P= fósforo; S= azufre; Fe= fierro; Na= sodio; K= potasio; N= nitrógeno; Ar= porcentaje de arcilla.

Toda vez que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95.0 %. El estadístico R² indica que el modelo así ajustado explica 79.5% de la variabilidad en la materia orgánica. A su vez, R² ajustada fue 77.4 %, siendo más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0.245949 y el error absoluto medio (MAE) de 0.18162, que representa el valor promedio de los residuos. Puesto que el valor-P es menor que 0.05, hay evidencias de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95.0 %.

Al reducir la ecuación 4 a una expresión simplificada, se obtuvo el siguiente modelo:

$$MO = 0.90439 - 0.52373 * d + 0.0011015 * S + 0.0045822 * K + 0.69226 * N \rightarrow (5)$$

Donde: MO= materia orgánica; d= densidad; S= azufre; K= potasio; N= nitrógeno.

Los valores resultantes del ajuste a un modelo de regresión múltiple para describir la relación entre la materia orgánica y cuatro variables edáficas independientes se muestran en Tablas 5 y 6.

Tabla 5. Estadísticos del análisis de regresión múltiple entre la materia orgánica y cuatro variables edáficas independientes.

Parámetro	Error		Estadístico	
	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	0,904393	0,29781	3,03681	0,0029
Densidad	-0,523726	0,159419	-3,28523	0,0013
Azufre	0,00110151	0,000305326	3,60764	0,0004
Potasio	0,00458222	0,00115379	3,97144	0,0001
Nitrógeno	0,692255	0,068166	10,1554	0,0000

Nivel de confianza: 95.0 %
 $R^2 = 78.5793 \%$

Tabla 6. ANOVA entre la materia orgánica y cuatro variables edáficas independientes.

Fuente	Suma de Cuadrados	de Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	29,6849	4	7,42123	125,64	0,0000
Residuo	8,09208	137	0,0590663		
Total	37,777	141			

(Corr.)
 $R^2 = 78.5793 \%$
 R^2 (ajustado para g.l.) = 77.9539 %
 Error estándar del estadístico. = 0.243036
 Error absoluto medio = 0.185337
 Estadístico Durbin-Watson = 1.29962 (P=0,0000)
 Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0.349254

La ecuación del modelo ajustado fue la misma que la obtenida en la ecuación (5):

$$MO = 0.90439 - 0.52373 * d + 0.0011015 * S + 0.004582 * K + 0.69226 * N$$

Donde: MO= materia orgánica; d= densidad; S= azufre; K= potasio; N= nitrógeno.

De manera similar, al considerar el porcentaje de arena en el análisis de regresión múltiple, se obtuvo la siguiente ecuación reducida:

$$MO = 0.27005 + 0.0012022 * S + 0.0053874 * K + 0.61616 * N - 0.0045321 * A \rightarrow (6)$$

Donde: MO= materia orgánica; S= azufre; K= potasio; N= nitrógeno; A= porcentaje de arena.

Se observa que existe una relación negativa con respecto a la densidad y al porcentaje de arena (ecuaciones 5 y 6, respectivamente), mientras que el azufre, potasio y nitrógeno, guardan relación positiva y el nitrógeno con mayor peso numérico.

Es evidente la importancia que reviste la materia orgánica como fuente de macro elementos como son el

nitrógeno y el potasio, así como en la retención de humedad, por lo cual sirve como indicador de la fertilidad y del proceso de desertificación del suelo.

CONCLUSIONES

Los resultados son indicativos del déficit hídrico predominante en las cuencas estudiadas y dejan evidencia sobre la urgente necesidad de mejorar e incrementar las acciones tendientes a disminuir el proceso de desertificación que sufren las cuencas agrícolas en estudio.

La sobreexplotación del recurso hídrico que ha ocurrido en las últimas décadas, que se destina tanto para las actividades agropecuarias como para el consumo humano, disminuyen la disponibilidad del recurso, aunado a la baja precipitación en la región que oscila de 150 a 180 mm anuales. Se concluye que la escasez de agua, en términos de aridez, refleja un marcado déficit hidrológico para once meses del año. La sobreexplotación del acuífero de la cuenca de Comondú ha propiciado intrusión salina y con ello disminuye la capacidad del riego agrícola en la región, ocasionando al mismo tiempo incremento de la salinidad del suelo.

La cuenca de La Paz sufre el embate del crecimiento urbano que genera deforestación y cambio de uso del suelo, además de disminuir el área potencial de cultivo de esta cuenca.

Finalmente, cabe hacer notar que las cuencas de La Paz y Comondú, en el noroeste semiárido de México, sufren un proceso de desertificación paulatino, gradual y constante, por lo que se recomienda tomar las decisiones pertinentes que lleven a mejorar los patrones de cultivo, disminuir el sobrepastoreo y proteger el ecosistema natural, que es único en el país y que guarda flora y fauna endémica, de alto valor ecológico para la región y el planeta.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C., a la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, U.N.A.M., al Fondo Sectorial CONACYT-SEP Investigación Básica (Proyecto 095C "Adecuación Metodológica para la Determinación de la Huella Hídrica y del Grado de Desertificación en el Contexto del Cambio Climático en Cuencas de Zonas Áridas"), a la Dirección local de la Comisión Nacional del Agua, al Servicio Meteorológico Nacional y al personal técnico de los laboratorios analíticos del CIBNOR S.C. por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

LITERATURA CITADA

- Aguilar, C.M. y Martínez, E.R. 1996. Relaciones agua suelo planta atmósfera. 4ª edición. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Méx. 256 p.
- Amezketta, E. 2006. An integrated methodology for assessing soil salinization, a pre-condition for land desertification. *Journal of Arid Environments*. 67(4): 594-606.
- Cardona, A., Carrillo, R. J.J., Huizar, A.R., Graniel, C.E. 2004. Salinization in coastal aquifers of arid zones: an example from Santo Domingo, Baja California Sur, México. *Environmental Geology* 45:350-366
- CENAM. 2007. Sistema de Gestión de Calidad en el CENAM. Secretaría de Economía. En: <http://www.cenam.mx/sgc/>. Fecha de consulta: junio de 2007.
- Chapela, G. 2003. Lucha contra la desertificación y lucha contra el calentamiento global. En <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/437/chapela.html>. Fecha de consulta: enero de 2009.
- CONAGUA-UABCS. 2009. Estudio para la Recuperación del Acuífero del Valle de Santo Domingo. Convenio de colaboración CONAGUA-UABCS. DLBCS-UABCS 20080715. La Paz, BCS. México.
- Congreso de la Unión. 2001. Ley de Desarrollo Rural Sustentable. Edición de las Comisiones de Agricultura y de Desarrollo Rural. México.
- Cruz, F.A. 2007. Caracterización y Diagnóstico del acuífero de La Paz B.C.S. mediante estudios geofísicos y geohidrológicos. Tesis de Doctorado, IPN-CICIMAR, Diciembre de 2007. 139 p.
- Danfeg, S. Dawson, R. Baoguo L. 2006. Agricultural causes of desertification risk in Minqin, China. *Journal of Environmental Management*. 79: 348-356.
- Dregne, H. E. 1994. Land degradation in the world's arid zones. In "Soil and Water: Keys to Understanding Our Global Environment." SSSA Special Publication 41, Madison, WI.
- Hernández, L.E., López, B.F., Romero, D.A. y Belmonte, S.F. 2000. Estudio comparativo de un indicador de desertificación para zonas agrícolas semi-áridas, cuenca del Guadalentín, Sureste de España. Papeles de

- Geografía, enero-junio, número 031. Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal. Universidad Autónoma del Estado de México. Murcia, España. Pp. 91-98.
- Herrmann, S.M. and C.F. Hutchinson. 2005. The changing contexts of the desertification debate. *Journal of Arid Environments*. 63: 538–555.
- Hillel, D. and Rosenzweig, C. 2002. Desertification in relation to climate variability and change. *Advances in Agronomy*. 77: 1-44.
- Li, X.R., X.H. Jia, G.R. Dong. 2006. Influence of desertification on vegetation pattern variations in the cold semi-arid grasslands of Qinghai-Tibet Plateau, North-west China. *Journal of Arid Environments*. 64: 505–522.
- Mainguet, M. 1994. "Desertification: Natural Background and Human Mismanagement." Springer Verlag, Berlin.
- Mercado, M.G. 2006. Evapotranspiración y déficit hídrico en un agostadero representativo de matorral sarcocaulé en La Paz, Baja California Sur. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. México.
- 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.
- Sharma, K.D. 1998. The hydrological indicators of desertification. *Journal of Arid Environments*. June 1998. 39(2): 121-132.
- SAGARPA-INIFAP. 2009. Estadísticas Estatales: Baja California Sur. Producción agropecuaria. México. EN: http://www.oeidrus-bcs.gob.mx/Info_dependencias/INIFAP. Fecha de consulta 25 de mayo de 2009.
- SMN-CONAGUA. 2009. Base de datos de las estaciones climáticas del estado de Baja California Sur. Dirección Estatal de la Comisión Nacional del Agua. La Paz, BCS, México. Archivos digitales.
- Troyo D., E.; J.L. García H.; B. Murillo A.; 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.
- UN. 1994. Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación en Países con Sequía Seria o Desertificación, particularmente en África. París, Francia. 24 p.
- UN. 1997. Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación, III Reunión Regional para América Latina y el Caribe. Programa Regional de Acción. Armonización de Políticas Públicas. Mecanoscrito. Habana, Cuba. 23 pp.
- UNEP. 1992. World Atlas of Desertification. Edward Arnold, Seven Oaks, UK. 69 p.

*Submitted July 01, 2009 – Accepted June 01, 2010
Revised received July 06, 2010*