

VULNERABILIDAD HIDROCLIMÁTICA Y DEGRADACIÓN DEL SUELO EN REGIONES AGRÍCOLAS SEMIÁRIDAS

Hydroclimatic Vulnerability and Soil Degradation in Agricultural Semiarid Regions

Yarelis Álvarez Morales¹, Enrique Troyo Diéguez^{1‡}, Alejandra Nieto Garibay¹, Félix A. Beltrán Morales², Bernardo Murillo Amador¹, Arturo Cruz Falcón¹ y Jesús Navejas Jiménez³

RESUMEN

Se analizó la vulnerabilidad hidroclimática de tres regiones agrícolas semiáridas de Baja California Sur (B.C.S.), el Valle de Santo Domingo (VSD), Valle del Vizcaíno Guerrero Negro (VVG) y la Cuenca Agrícola de La Paz (CALAP), a partir de indicadores de aptitud de los factores clima (FC), agua (FA) y suelo (FS). Para La Paz, B.C.S., la información se obtuvo a través del estudio climático, análisis fisicoquímico de suelos y análisis químico del agua de riego en cinco localidades seleccionadas. Para el VVG y el VSD, como localidades de referencia, se utilizaron parámetros indicadores en fuentes disponibles y publicaciones para la valoración del estado actual de dichos factores. Se seleccionaron 22 indicadores; cinco correspondieron al FC, siete al FA y diez al FS. Para el FC, solamente dos indicadores alcanzaron puntuación favorable por lo que dicho factor resultó deficiente en las tres regiones analizadas. El FA alcanzó la condición de aceptable en las tres zonas, sin embargo, sus valores se observaron en el límite de esta condición. El suelo en el VSD fue calificado como aceptable mientras que en el VVG y CALAP se evaluaron como deficientes. Según los umbrales de vulnerabilidad propuestos, se pudo inferir que la región con mayor vulnerabilidad a efectos adversos del clima y a procesos de degradación del suelo y el agua

es la CALAP, cuyos indicadores principales se consideran en la categoría “altamente vulnerable”; el VVG alcanzó asimismo dicha categoría mientras que el VSD se calificó como región agrícola “vulnerable” a los factores analizados.

Palabras clave: *sequía, factores abióticos, Baja California Sur.*

SUMMARY

Water-soil-climate vulnerability of three agricultural regions of Baja California Sur (BCS) was analyzed: Valle de Santo Domingo (VSD), Valle del Vizcaíno Guerrero Negro (VVG), and the Agricultural Watershed of La Paz (CALAP, acronyms for their names in Spanish) using aptitude markers of climate (FC), water (FA), and soil (FS) factors. In La Paz, BCS, data was obtained through climate study, physicochemical soil analyses, and chemical analyses of irrigation water in five selected sites. For VVG and VSD, as the reference sites, parameter indicators from available sources and publications were used to assess the current state of these factors. Of the 22 markers selected, five corresponded to FC, seven to FA, and ten to FS. For FC, only two indicators reached a favorable score, and thus this factor was considered deficient in the three regions analyzed. FA reached the acceptable condition in the three zones; however, values were borderline. Soil in VSD was graded acceptable, whereas in VVG and CALAP it was assessed as inadequate. According to the vulnerability threshold, we can infer that CALAP is the region that is most vulnerable to adverse climate and to soil and water degradation processes. The essential markers place the area in the “highly vulnerable” category while VSD was graded as an agricultural region “vulnerable” to the analyzed factors.

Index words: *drought, abiotic factors, Baja California Sur.*

¹ Programa de Agricultura en Zonas Áridas, CIBNOR SC. Calle Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo de Santa Rita Sur. 23096 La Paz, Baja California Sur, México.

[‡] Autor responsable (etroyo04@cibnor.mx)

² Departamento de Agronomía, Universidad Autónoma de Baja California Sur. Carretera al sur km 5.5, Apartado Postal 19-B. 23080 La Paz, Baja California Sur, México.

³ Sitio Experimental Santo Domingo SESTOD-INIFAP. Carretera Transpeninsular km 208. 23600 Cd. Constitución, Baja California Sur, México.

INTRODUCCIÓN

Baja California Sur se extiende en una superficie de 7.3 millones de ha, de las cuales existe un potencial cultivable de 61 725 ha, asociadas a 4230 productores. La precipitación pluvial promedio fluctúa entre 100 y 200 milímetros anuales, con una temperatura media anual de 24 a 30 °C. Las microrregiones en el estado con mayor intensidad de actividades agrícolas son el Valle de Santo Domingo, la microrregión norte en el Desierto de El Vizcaíno, la microrregión de La Paz y la de San José del Cabo (SAGARPA, 2011). Desde sus inicios, las actividades agropecuarias han sido importantes para el estado, no sólo de manera positiva por su aportación económica, sino también negativa, por el deterioro ambiental que han ocasionado. El efecto principal se manifiesta sobre la disponibilidad de agua, afectada por la sobreexplotación de los acuíferos, debido a que la extracción del agua subterránea ha sido superior a la recarga (Cruz-Falcón *et al.*, 2011).

Las actividades agrícolas bajo condiciones de cambio climático, requieren de escenarios precisos dada la vulnerabilidad de este sector a cambios en el clima y a su dependencia de los regímenes de lluvia, especialmente los de temporal y humedad residual. En las zonas áridas y semiáridas se prevé mayor frecuencia y severidad de las sequías y calor excesivo, condiciones que en su conjunto limitan significativamente el crecimiento de los cultivos, lo que puede ocurrir prácticamente en todo el estado (Andrade *et al.*, 2009). Por otro lado, las variables climáticas claves para el crecimiento de los cultivos, como la precipitación y temperatura, entre otras, serán posiblemente modificadas e impactarán la producción agrícola debido a la amenaza del cambio climático global (Cline, 2007).

Shengcai *et al.* (2011) afirman que la vulnerabilidad puede ser entendida como la incapacidad de un sistema para absorber, mediante autoajuste, los efectos de un determinado cambio en su ambiente, es decir, su inflexibilidad para adaptarse a ese cambio y la susceptibilidad que tiene de ser afectado o de sufrir una pérdida. En este sentido, es importante documentar el efecto negativo de los factores que inciden en los sistemas agrícolas y evaluar la vulnerabilidad de los mismos ante distintos escenarios de cambio. Estudios relacionados a dicha problemática son relevantes, en particular a escala regional, que permitan diseñar estrategias de adaptación de las regiones y sectores más vulnerables, de manera que influyan en el diseño de

políticas de desarrollo sustentable. El análisis de la vulnerabilidad permite establecer indicadores de vulnerabilidad ambiental, socio-económica y demográfica ante eventos asociados al cambio climático y a otros tipos de contingencias, a nivel local, regional o nacional, para lo cual pueden utilizarse enfoques cuantitativos mediante estadísticas e indicadores o enfoques cualitativos que analicen los mencionados procesos (Monterroso *et al.*, 2009).

El estudio de las condiciones climáticas, del agua y suelo además de coadyuvar a la valoración de las condiciones reales de cada región, también puede mostrar los puntos fuertes y débiles facilitando la adopción de los cambios o de las medidas correctoras más adecuadas. Debido a que en BCS no es conveniente ampliar la superficie cultivada dada la escasez de agua, que podría agravarse por efectos del clima, se tendrá que fomentar la productividad de cultivos con métodos compatibles con el ambiente, que faciliten el manejo eficiente del agua y suelo (SAGARPA, 2011). Este trabajo está dirigido al análisis de la vulnerabilidad hidroedafoclimática de tres regiones agrícolas de B.C.S, basado en indicadores de aptitud que caracterizan los factores abióticos clima, agua y suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

Los valles o cuencas consideradas para este estudio fueron la cuenca Agrícola de La Paz, B.C.S., (CALAP), el Valle del Vizcaíno-Guerrero Negro (VVGN) y el Valle de Santo Domingo, B.C.S. (VSD), de los cuales se utilizaron parámetros indicadores como referencia para la valoración del estado actual de sus áreas agrícolas. En la Cuenca de La Paz la investigación inició con un diagnóstico en zonas agrícolas representativas para el estudio. Para este efecto se seleccionaron 5 ejidos: El Centenario, Chametla, El Carrizal, Los Bledales y Álvaro Obregón. Para el análisis se partió del mapa de microrregiones, elaborado por el gobierno del estado de Baja California Sur.

Caracterización de los Factores (Clima-Suelo-Agua) de las Localidades de Estudio en la CALAP

Obtención de la Información. I. *Factor clima (FC):* Se sistematizó la información climática, datos diarios de

temperatura máxima, mínima y media y los datos de precipitaciones en valores promedio mensual y anual.

II. *Factores agua (FA) y suelo (FS)*: Se colectaron y clasificaron datos de calidad del agua para riego y las características del suelo agrícola; para CALAP se tomaron muestras en campo.

Estudio climático. Se recopiló y sistematizó información climática de las zonas de estudio, obtenidas de las estaciones: Observatorio La Paz, Alfredo V. Bonfil, San Pedro, El Carrizal y Los Divisaderos, B.C.S., para el período de 1980-2012; las variables climáticas analizadas fueron: temperatura máxima, mínima, promedio mensual y anual (°C); precipitación promedio mensual y anual (mm). Con los datos obtenidos se construyeron los indicadores: índice de disponibilidad ambiental e índice de sequía hidroambiental.

Los índices se calcularon de acuerdo al método de De Martonne, modificado por Troyo *et al.* (2004). El modelo seleccionado fue una función binomial donde X1 es la temperatura media mensual en °C y X2 es la precipitación mensual en mm, de tal forma que $A_{\text{mod}} f(t, pp)$. El citado índice muestra un valor con mayor sensibilidad para la interpretación, cuya escala está limitada de 0 a 10 unidades, aplicable a condiciones de precipitación menor a 100 mm mensuales, característico de las zonas áridas. Dicha función fue definida de la siguiente forma (Ecuación 1):

$$IDHA = Ke \frac{(12pp)}{t + 10} \quad (1)$$

donde: IDHA es el índice de disponibilidad hidroambiental; 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 de 0.33. La condición hídrica fue complementada definiendo la siguiente relación (Ecuación 2):

$$ISHA = 10 - IDHA \quad (2)$$

donde: ISHA es el índice de sequía hidro-ambiental. El factor de ajuste Ke en la Ecuación (1), planteado para modificar el Índice de De Martonne, se estableció con valor de 0.33, ya que en las condiciones de aridez de la zona de estudio, se ajusta con mayor sensibilidad numérica a la variación de los periodos de sequía.

Análisis químico del agua. Las muestras de agua se tomaron en los 50 pozos seleccionados para la determinación de pH, CE (dS m⁻¹), dureza total (mg L⁻¹), cloruros (mg L⁻¹), sólidos totales disueltos (mg L⁻¹), sulfatos (mg L⁻¹) y oxígeno disuelto (mg L⁻¹) en el Laboratorio de Análisis Químico de Aguas del CIBNOR.

Estudio fisicoquímico del suelo. Las muestras de suelo se tomaron en 10 ranchos de cada ejido a 30 cm de profundidad, para analizarse en laboratorios del CIBNOR; la información acumulada corresponde a 50 fincas agrícolas muestreadas. Se determinó la conductividad eléctrica (dS m⁻¹), densidad aparente (g cm⁻³), materia orgánica (MO, %), pH, textura y contenido nutrimental. Las determinaciones se realizaron con las técnicas y procedimientos de la NOM-021-RECNAT-2000, la cual establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos (SEMARNAT, 2001).

A partir de las variables indicadoras en cada uno de los factores analizados, se determinaron los indicadores definidos para los componentes: Clima, Agua y Suelo en la CALAP. Una de las dificultades más comunes en el uso de los indicadores deriva de las diferentes unidades en que expresan las distintas variables, pues esto dificulta en gran medida la interpretación de los resultados. Para la creación y mantenimiento de las bases de datos de cada indicador y localidad, se calculó en cada caso el nivel de desempeño (ND) que se estimó para cada observación o registro, a partir de la siguiente ecuación (Galván-Miyoshi, 2008):

$$ND = (V - V_{\text{mín}}) / (V_{\text{máx}} - V_{\text{mín}}) * 100 \quad (3)$$

donde: ND es el nivel de desempeño del indicador; V es el valor medido del indicador; V_{máx} es el valor máximo del indicador; V_{mín} es el valor mínimo del indicador.

Los valores obtenidos para cada observación y registro fueron transformados posteriormente a una escala de 0 a 10 puntos (Cuadro 1).

Representación gráfica de los indicadores de cada factor. Se realizó mediante un diagrama tipo radial (amiba) el cual se basa en la aplicación de ejes radiales con origen común y escalas estandarizadas. Regularmente se representan indicadores distintos con valores previamente estandarizados para fines de comparación (Galván-Miyoshi, 2008). En dicho diagrama se representaron los valores de los indicadores, de manera que se pudo observar cuál de las regiones

Cuadro 1. Propuesta de intervalos para la clasificación de los indicadores seleccionados.

Clasificación	Intervalo	Valoración (puntos)
Óptimo	0.81 a 1.0	[8.0 a 10.0]
Aceptable	0.61 a 0.80	[6.0 a 8.0]
Deficiente	0.41 a 0.60	[4.0 a 6.0]
Crítico	0.1 a 0.40	[2.0 a 4.0]
Falla (pérdida total) o inutilidad	0.0	[0.0 a 2.0]

Fuente: Adaptado de Monterroso *et al.*, (2007). Vulnerabilidad y riesgo en la agricultura por cambio climático en el estado de Veracruz, México.

estudiadas posee indicadores más cercanos a la situación ideal, lo que permite prestar especial atención al manejo de tales aspectos con el fin de observar avances o retrocesos en los mismos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se seleccionaron 22 indicadores, de los cuales cinco correspondieron al factor clima, siete al factor agua y diez al factor suelo (Cuadro 2, 4 y 5), los cuales fueron aplicados para el análisis de la vulnerabilidad de tres regiones productivas de BCS. Dichos indicadores fueron seleccionados de acuerdo a la disponibilidad de datos, sensibilidad a cambios temporales y a la capacidad de ser cuantificados. Los indicadores seleccionados son un número de variables con alto grado de agregación, fáciles de medir y repetibles, con factibilidad de aplicación sitio-específica ya que fueron elegidos en función de los tipos de ambiente, suelo y agua, característicos de las regiones de estudio.

Según la propuesta para la clasificación de intervalos definida, de los cinco indicadores del FC en las regiones estudiadas (Cuadro 2), la temperatura media en VVGN y posibilidad de heladas en CALAP, alcanzaron la máxima puntuación posible (10 puntos), toda vez que la temperatura media en dicha región muestra un valor predominante que favorece la producción agrícola, mientras que las posibilidades de heladas que puedan afectar la agricultura en la CALAP, son prácticamente nulas (AgriInfo.in, 2011).

El riesgo por huracanes, vientos o inundaciones es mayor en VVGN, debido a los vientos intensos que ocurren, mientras que el resto de los indicadores alcanzó menos de 6 puntos en las tres regiones, considerándose como debilidades en este factor. El promedio de precipitación anual y los períodos largos de sequías

fueron indicadores que alcanzaron valores críticos en las 3 zonas de estudio. El mayor valor total favorable se obtuvo en VVGN con desempeño de 0.56, 28 puntos de 50 (total máximo favorable), por lo que se valora como deficiente en la tabla de intervalos para la calificación de los indicadores. En este sentido, el VDS y la CALAP obtuvieron valores menores (0.54 ambos), por lo cual se infiere que las condiciones del clima en dichas zonas no son favorables para la producción agrícola.

La tendencia de cada indicador del FC en las 3 regiones se muestra en la Figura 1. Aunque el VVGN posee condiciones de temperatura menos desfavorables para la producción agrícola, su ubicación geográfica lo hace más vulnerable a los riesgos de huracanes y vientos. Los tres sitios poseen condiciones vulnerables a la ocurrencia de sequías y escasas precipitaciones, debido a la condición árida de dichas zonas, lo que evidencia la necesidad de medidas que permitan un uso racional del agua. Según los índices IDHA e ISHA, la disponibilidad hídrica en CALAP fue baja en el periodo analizado, coincidiendo los valores mayores en agosto y septiembre, que corresponden al período de lluvia.

El ISHA revela que las estaciones estudiadas mostraron altos índices de sequía en la mayoría de los meses del año, con valores entre 9.9 y 10, lo cual significa extrema sequía, principalmente en abril, mayo y junio. Según Duan *et al.* (2008), La vulnerabilidad es función de: a) Exposición: grado o magnitud en que los factores climáticos afectan un sistema. b) Sensibilidad: grado en que un sistema resulta afectado (positiva o negativamente) y c) Capacidad de adaptación: potencial de un sistema ante los efectos reales o esperados del cambio climático, para moderar potenciales daños, tomar ventajas y oportunidades o resistir las consecuencias.

La temperatura y la precipitación son los factores climáticos que condicionan la adaptación y la producción de los cultivos bajo la modalidad de temporal, por ello es posible determinar el grado de aptitud potencial de las zonas agrícolas en función de estas dos variables climáticas (Luo y Wu, 2010). El Cuadro 3 muestra los principales cultivos que se desarrollan en las regiones estudiadas y sus requerimientos climáticos. La mayoría de los cultivos establecidos en estas zonas requieren de precipitaciones mayores de 280 mm anuales cuando se conoce que la península posee un promedio anual de precipitaciones de solo 170 mm, razón que obliga a los productores a aumentar la extracción de agua de los acuíferos para suplementar la escasa agua derivada de

Cuadro 2. Selección y ponderación de indicadores para el factor clima (FC), en tres regiones de Baja California Sur.

IC: Indicadores del factor clima (FC)	VR	VVGN ^{††} # §	VSD ^{# †}	CALAP ^{§§ §}
Temperatura media ^{† ‡}				
a) Entre 17 y 22 °C	10	10		
b) Entre 14 y 17 o entre 22 y 25 °C	6		6	
c) Menor de 14 °C mayor de 25 °C	2			2
PP anual ^{§ ¶}				
a) Mayor de 400 mm	10			
b) Entre 250 y 400 mm	7			
c) Menor de 250 mm	4	4	4	4
Ocurrencia de sequías ^{§ ¶}				
a) Un mes con lluvia ‘cero’ o no efectiva, once meses con PP útil	10			
b) De 2 a 4 meses al año con lluvia ‘cero’	7			
c) 5 meses o más con lluvia ‘cero’ o no efectiva	4	4	4	4
Posibilidad de heladas ^{# †}				
a) Posibilidad de heladas muy baja o nula	10			10
b) Baja probabilidad de heladas ocasionales, solo una en promedio anual	6	6	6	
c) Alta probabilidad de heladas	1			
Riesgo de huracanes, viento o inundaciones durante el ciclo del cultivo ^{¶ ††}				
a) Riesgo muy bajo o nulo	10			
b) Baja probabilidad de huracanes, solo uno anual en promedio	7		7	7
c) Posibilidad alta o muy alta	4	4		
Total favorable máximo posible (suma superior)	50	28/50 = 0.56	27/50 = 0.54	27/50 = 0.54
Total no favorable mínimo posible (suma inferior)	15			

Fuente: † AgriInfo.in, 2011; ‡ Meza-Sánchez y Reygadas-Prado, 2001; § Troyo-Diéguéz *et al.*, 2009; Salinas-Zavala *et al.*, 1990; # SMN-CNA, 2012; †† Díaz-Castro, 2010; †† Chávez-López, 2010a; §§ Elaboración propia a partir de análisis en laboratorio e integración de bases de datos del CIBNOR, S. C. VR = valores de referencia; VVGN = valle del Vizcaíno-Guerrero Negro; VSD = valle de Santo Domingo; CALAP = cuenca agrícola de La Paz, B.C.S.

la lluvia. Lo anterior ocasiona que las tres zonas analizadas sufran hoy el aumento en la frecuencia de la sequía y aridez; por lo que el análisis de las condiciones del clima, evidenció una notable vulnerabilidad de las tres regiones producto de la baja precipitación, generando la sequedad del ambiente y propiciando condiciones de temperaturas poco ideales para el desarrollo agrícola.

Para el FA se seleccionaron siete indicadores (Cuadro 4) representativos de las variables con mayor información disponible, de los cuales se considera como principal fortaleza la seguridad en la disponibilidad de agua para los usuarios y como principales debilidades los niveles de conductividad eléctrica (CE) así como el desconocimiento de la presencia de contaminantes peligrosos en el agua. En el VSD se observó el máximo valor favorable (57) con desempeño de 0.81, por lo que se deduce que el agua para riego es adecuada, según la tabla de intervalos para la calificación de los indicadores, el VVGN y la CALAP también alcanzaron la condición de aceptable con valores de 0.75 y 0.66, respectivamente.

Los indicadores del VSD se encuentran cercanos a la condición ideal, donde los valores de CALAP se ubican más alejados y los de el VVGN en una posición intermedia (Figura 2). Aun cuando de manera conjunta la calidad del agua se valora como aceptable, es necesario realizar estudios a nivel de microrregión, para detallar de forma específica y a escala menor la calidad del agua. La cercanía al mar de los pozos agrícolas de CALAP y del VVGN explica los niveles de salinidad expresada como CE (Troyo *et al.*, 2009).

En el presente trabajo no se enfatizó en la determinación de contaminantes y metales pesados en el agua para el riego agrícola, se sugiere un estudio detallado sobre la presencia y acumulación de dichos elementos en las zonas evaluadas, dada la sospecha e indicativos de la presencia de arsénico en el agua.

De los indicadores seleccionados para el FS (Cuadro 5), se consideraron como debilidades: los valores críticos para la estabilidad de la estructura, su capacidad de retención de humedad, niveles de

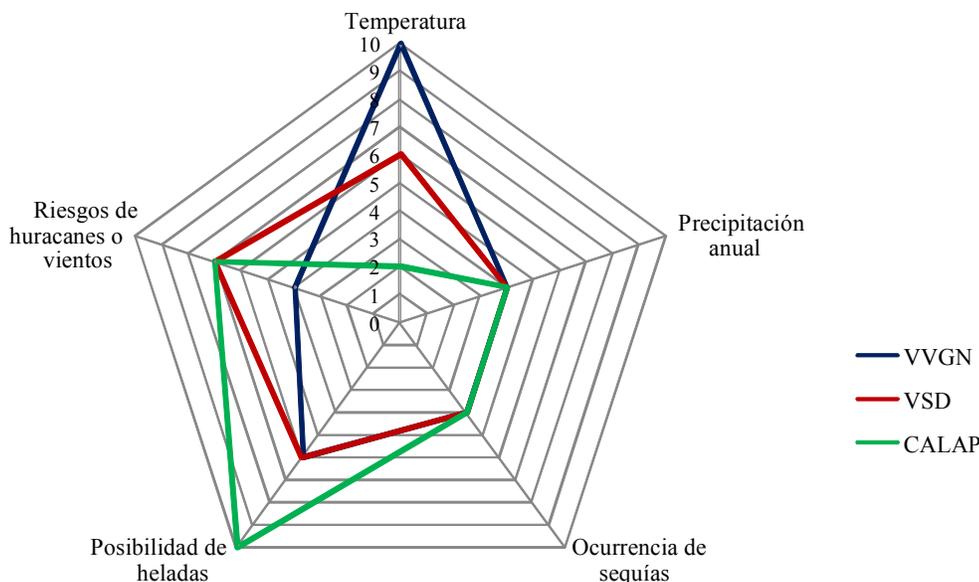


Figura 1. Diagrama representativo de los componentes del factor clima en tres regiones de Baja California Sur.

conductividad eléctrica y contenido de MO asociado a la baja disponibilidad de fósforo y nitratos. Para el FS, el VSD se observó el máximo valor favorable (65), lo cual representa un desempeño de 0.65 (Cuadro 4), por

Cuadro 3. Síntesis de los principales cultivos y sus requerimientos climáticos en tres regiones productoras de Baja California Sur.

Regiones	Cultivos	Principales requerimientos	
		Precipitación anual mm ciclo ⁻¹	Temperatura media °C
Cuenca de La Paz	Tomate	280	18
	Chile verde	400	22
	Sorgo forrajero	350	24
	Maíz forrajero	500	18
Valle de Sto. Domingo	Cártamo	300	22
	Garbanzo	360	22
	Naranja	1200/1500	23
	Maíz	500	18
Valle El Vizcaíno	Chile verde	280	22
	Alfalfa	2000	20
	Ajo	450	15
	Fresa	900/1500	16

Fuente: INIFAP, 2008. Necesidades hídricas de los principales cultivos en Baja California.

lo que se infiere que de manera general las condiciones del suelo en esta zona están en un rango aceptable. Sin embargo, la CALAP y el VVGN mostraron un nivel de desempeño de 0.57, por lo que los suelos de ambas regiones fueron clasificados y valorados como deficientes.

Los resultados confirman lo planteado por Mercado-Mancera *et al.* (2011), quienes comprobaron que los suelos de las principales zonas agrícolas de CALAP poseen bajos niveles de materia orgánica y altas concentraciones de sales, lo que ha provocado una considerable disminución de la productividad y el abandono de numerosas unidades productivas.

Respecto al estado del suelo en las zonas de estudio se observó claramente que el VSD posee los indicadores de pH y conductividad eléctrica más cercanos a los valores ideales (referencia), sin embargo sus suelos son muy deficientes en cuando a su textura y velocidad de infiltración (Figura 3). Es claro que en estas regiones, el suelo está sometido a mayor presión, tanto por las actividades agrícolas y en el caso específico de la CALAP, por el incremento en el cambio de uso de suelo para fines habitacionales (Mercado-Mancera *et al.*, 2010).

Es importante señalar que el aporte de MO por parte de la vegetación natural es muy bajo, dado que predomina la vegetación tipo matorral xerófilo ausente de hojas en la mayoría de las especies. Conde-Álvarez y Saldaña-Zorrilla (2007) afirmaron que la pérdida de

Cuadro 4. Selección y ponderación de indicadores para el factor agua (FA), en tres regiones agrícolas semiáridas de Baja California Sur.

IA: Indicadores del Factor Agua (FA)	VR	VVGN ^{††}	VSD ^{†† §§ ¶¶}	CALAP ^{##}
Seguridad en la disponibilidad del agua, de mayoría de usuarios [†]				
a) Para 10 años o más (presa; pozo de agua con título de concesión)	10	10	10	10
b) Menos de 10 años, con título de concesión condicionado a renovación	5			
c) Sin título de concesión; derecho de agua alquilado, rentado o prestado	0			
pH del agua de riego ^{‡ §}				
a) Entre 6 y 8	10		10	
b) Entre 5 y 6 o entre 8 y 9	7	7		7
c) menor de 5 o mayor de 9	4			
CE del agua de riego, mmhos cm ⁻¹ o dS m ⁻¹ ¶ ‡ §				
a) Menor de 1.0	10			
b) Entre 1.0 y 2.0	8		8	
c) Entre 2.0 y 3.0	6	6		6
d) Mayor de 3.0	4			
SDT (sólidos disueltos totales), mg L ⁻¹ ¶ ‡				
a) 0 a 1000	10			
b) 1000 a 2000	8	8	8	
c) 2000 a 3000	6			6
d) > 3000	4			
Dureza, mg L ⁻¹ ¶				
a) 0 a 250	10			
b) 250 a 500	8	8	8	
c) 500 a 750	6			6
d) > 750	4			
Presencia de aniones indicadores de salinidad Cl ⁻¹ + SO ₄ ⁻² , mg L ⁻¹ ¶ §				
a) 0 a 250	10			
b) 250 a 500	8	8	8	
c) 500 a 750	6			6
d) > 750	4			
Presencia de contaminantes peligrosos (plaguicidas, metales pesados) [#]				
a) Concentración menor de la que indica la NOM [#]	10			
b) Desconocida o no disponible	5	5	5	5
c) Mayor de la NOM [#]	0			
Total favorable máximo posible (suma superior)	70	52/70 = 0.75	57/70 = 0.81	46/70 = 0.66
Total no favorable mínimo posible (suma inferior)	20			

Fuente: [†] CONAGUA, 2012; [‡] Ayers y Westcot, 1987; [§] Mercado-Mancera *et al.*, 2011; [¶] Richards, 1954; [#] SEMARNAT, 2000, 2001, 2003, 2004. NOM-021-SEMARNAT-2000; NOM-023-SEMARNAT-2001; NOM-138 SEMARNAT/SS-2003; NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. SSA, 1994. NOM-127-SSA1-1994; ^{††} Chávez-López, 2010b; ^{‡‡} Cardona *et al.*, 2004; ^{§§} Wurl *et al.*, 2011; ^{¶¶} Meza-Sánchez y Reygadas-Prado, 2001; ^{##} Elaboración propia a partir de análisis en laboratorio e integración de bases de datos. VR = valores de referencia; VVGN = valle del Vizcaíno-Guerrero Negro; VSD = valle de Santo Domingo; CALAP = cuenca agrícola de La Paz, B.C.S.

partículas finas del suelo puede provocar también la pérdida de MO, pues ésta se combina con dichas partículas; por lo que en regiones áridas y semiáridas, la erosión eólica puede también ser consecuencia del deterioro de las propiedades del suelo y su potencial biológico.

La escasez de MO en el suelo, fue uno de los aspectos más relevantes de este estudio, lo cual se reflejó en las tres zonas analizadas. De manera general, se pudo comprobar un bajo porcentaje de este componente en los suelos (no mayor de 0.75) en las diferentes regiones; donde las altas temperaturas, la falta de lluvias entre

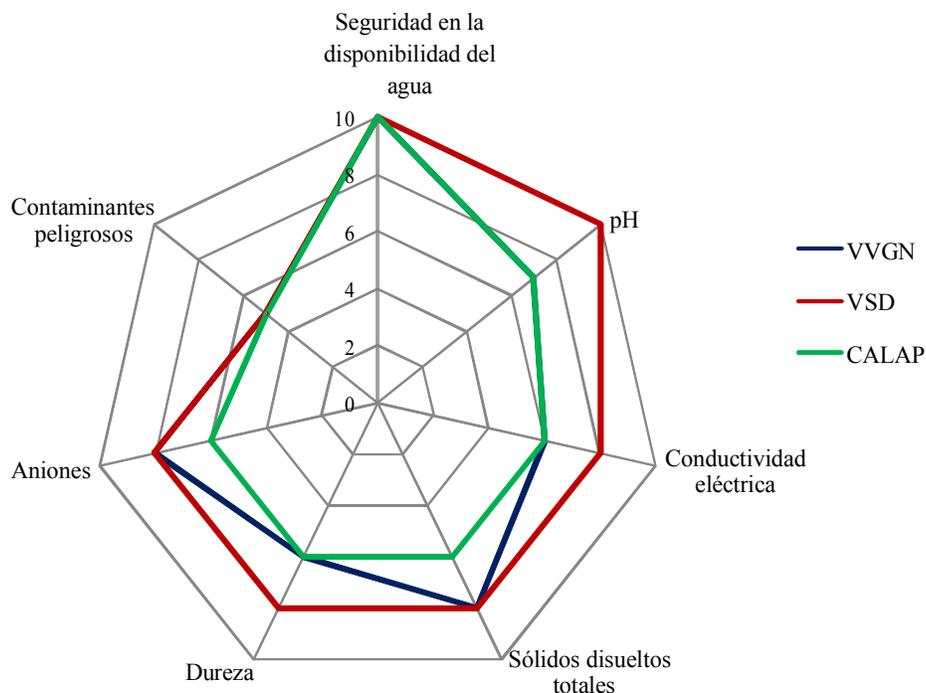


Figura 2. Diagrama del estado de calidad de agua en tres regiones agrícolas de Baja California Sur.

otros factores, pueden ser determinantes. El Cuadro 6 expone datos acerca de los valores requeridos de los principales elementos que influyen en la calidad del suelo y su aptitud para la producción agrícola así como los valores reales que posee cada uno en las zonas de estudio.

En las tres zonas analizadas, el porcentaje de materia orgánica se encuentra por debajo de los niveles requeridos recomendados. Por otro lado, la acumulación de sales en el suelo se evidencia con los niveles de pH y conductividad eléctrica que muestran los mismos, lo que reduce el espacio de los poros, la capacidad y circulación del aire y el mantenimiento de los nutrientes (Graniel *et al.*, 2009). De esta manera, la presencia de sales ha contribuido a la degradación de la estructura y fertilidad de los suelos, por lo que es de esperar una disminución progresiva de su productividad si no se toman las medidas adecuadas para su conservación.

Los aspectos más importantes que definen la aptitud productiva en regiones agrícolas semiáridas para los factores agua, suelo y clima y los valores propuestos como umbrales de vulnerabilidad se exponen en el Cuadro 7. Según estos datos, y teniendo en cuenta el análisis previo de estos factores, es posible inferir que

la región con mayor vulnerabilidad a efectos adversos del clima y a fenómenos como la degradación del agua y el suelo es la CALAP, cuyos indicadores principales se ubican en la categoría de “altamente vulnerable”, asimismo el VVGN también alcanza esta categoría y se sitúa en una posición intermedia entre las 3 regiones, pues el VSD es la zona que logra ubicarse en la categoría de “vulnerable” al poseer algunos indicadores con niveles aceptables tales como la conductividad eléctrica del suelo y el pH de suelo y agua, aunque se observaron más cercanos al límite inferior de los valores ideales.

Es evidente que los efectos del cambio climático (CC) se incrementan en frecuencia e intensidad en las regiones áridas y semiáridas. Según Ponvert-Deslisles *et al.* (2007), la insuficiente capacidad de dichas regiones para responder y recuperarse, incluyendo el comportamiento del hombre, que con su conducta puede contribuir a maximizar factores de riesgo, hace que sean mucho más vulnerables; entre otros casos, se aprecia que la deforestación fue un factor contribuyente al daño extenso producido por recientes huracanes en Centroamérica y el Caribe. En el caso específico de Baja California Sur, las condiciones del clima manifiestan

Cuadro 5. Selección y ponderación de indicadores del factor suelo agrícola (FS) en regiones de Baja California Sur.

IS: Indicadores del factor suelo (FS)	VR	VVGN [§]	VSD [¶]	CALAP [§]
1. Estabilidad de la estructura				
a) Floculada, no alterada, muy buena agregación	10			
b) Parcialmente alterada; factible recuperarla	6	6	6	6
c) Destruída, defloculada; costosa recuperación	2			
Capacidad de retención de humedad				
a) Óptima; muy conveniente, sin encharcamiento	10			
b) Capacidad media de retención de humedad	7		7	7
c) Muy baja o casi nula: riegos muy frecuentes	4	4		
Tipo de textura, velocidad de infiltración				
a) Limo arenosa, textura franca o media. Valores medios de infiltración	10		10	
b) Muy arenosa, arenosa. Infiltración alta; alta capacidad de drenaje	7	7		7
c) Arcillosa, limo-arcillosa. Infiltración baja o escasa; alto escurrimiento	4			
pH del extracto de saturación ^{†‡}				
a) Entre 6 y 8	10		10	
b) Entre 5 y 6 o entre 8 y 9	7	7		7
c) Menor de 5 o mayor de 9	4			
C.E. del extracto de saturación ^{†‡}			8	
a) Menor de 1.0	10	6		6
b) Entre 1.0 y 2.0	8			
c) Entre 2.0 y 3.0	6			
d) Mayor de 3.0	4			
Densidad aparente, g mL ⁻¹				
a) Baja a muy baja, < 1.5	10			
b) Media, 1.5 a 2	8	8	8	
c) Alta a muy alta, > 2	6			6
Contenido de materia orgánica (MO)				
a) Más de 1.75%	10			
b) De 0.75 a 1.75%	7			
c) Menos de 0.75%	5	5	5	5
Contenido de fósforo disponible				
a) Medio a alto	10			
b) Bajo o nulo	5	5	5	5
Contenido de N-NO ₃				
a) Medio a alto	10			
b) Bajo o nulo	5	5	5	5
Presencia de cationes relacionados a CIC (Na; Ca+Mg), mg kg ⁻¹ de suelo ^{†‡}				
a) Media: entre 100 y 1500	10			
b) Alta: entre 1500 y 3500	7		7	7
c) Muy baja o nula: < 100	4	4		
d) Muy alta: > 3500	1			
Total favorable máximo posible (suma superior)	100	57/100 = 0.57	65/100 = 0.65	57/100 = 0.57
Total no favorable mínimo posible (suma inferior)	40			

Fuente: [†] Richards, 1954; [‡] Ayers y Westcot, 1987; [§] Elaboración propia. [¶] Mercado-Mancera *et al.*, 2011. VR = valores de referencia; VVGN = valle del Vizcaino-Guerrero Negro; VSD = valle de Santo Domingo; CALAP = cuenca agrícola de La Paz, B.C.S.

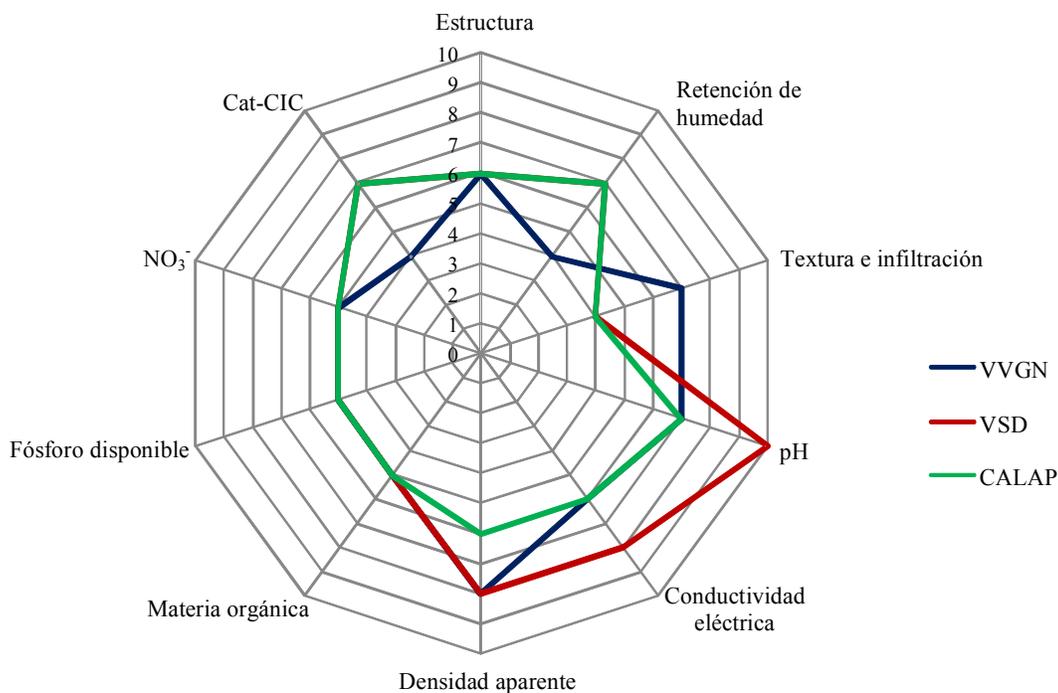


Figura 3. Diagrama del estado de calidad de suelo en tres regiones agrícolas de Baja California Sur.

recurrentes períodos de sequías que constituyen limitantes importantes para la producción agrícola (Mercado-Mancera *et al.*, 2011).

Según los resultados obtenidos, las propuestas de manejo de los recursos agua y suelo para solventar las condiciones restrictivas predominantes y los posibles escenarios de CC en las zonas áridas y semiáridas de B.C.S., México, y de manera similar a otras que comparten características afines, deben considerarse estrategias que permitan la conservación de los recursos naturales optimizando el uso agrícola (Trovo-Diéguez *et al.*, 2009). Para describir y evaluar un sistema agrícola en las condiciones actuales y en escenarios restrictivos,

se requiere identificar las limitaciones que afectan su funcionamiento y las causas que las generan.

CONCLUSIONES

- De acuerdo con los umbrales de vulnerabilidad propuestos, se infiere que la región con mayor vulnerabilidad a los efectos adversos del clima, a los procesos de degradación del suelo y el agua es la CALAP, cuyos indicadores principales adquieren la categoría de “altamente vulnerable”, debido a la sobreexplotación del agua subterránea; a su vez, el VVGN también alcanza dicha categoría mientras que el VSD se calificó como

Cuadro 6. Niveles requeridos y reales de materia orgánica, conductividad eléctrica y pH en tres regiones agrícolas de Baja California Sur.

Regiones	Materia orgánica	Conductividad eléctrica	pH
	- - - - - Valor requerido / real - - - - -		
	%	dS m ⁻¹	
Cuenca de La Paz	1.5 a 2 / 0.72	<1.5 / 2.0	6.5 a 7.5 / 7.8
Valle Sto. Domingo	1.5 a 2 / 0.75	<1.5 / 1.8	6.5 a 7.5 / 7.5
Valle El Vizcaíno	1.5 a 2 / 0.67	<1.5 / 1.9	6.5 a 7.5 / 7.7

Fuente: Adaptado de: AGRINFO (2011); Mercado-Mancera *et al.* (2010).

Cuadro 7. Valores propuestos como umbrales de vulnerabilidad para aptitud productiva de los factores agua, suelo y clima en regiones agrícolas semiáridas.

Factores	Variables	No vulnerable	Vulnerable	Altamente vulnerable
Clima	Temperatura media (°C)	22 < Tm < 26	25 < Tm < 10	4 > Tm > 29
	Precipitación pluvial (mm)	> 450	200 a 450	< 200
Suelo	pH	6.5 a 7.5	6 a 7.8	6 > pH > 8
	Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	1.5	1.5 a 2.5	> 2.5
	Materia orgánica (%)	> 1.9	0.8 a 1.8	< 0.8
Agua	pH	6 a 8	8 a 9	5 > pH > 9
	Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	< 1.0	2 a 3	> 3
	Disponibilidad	Rec > Extrac	Rec = Extrac	Rec < Extrac

Fuente: Elaboración propia adaptada de: Meza-Sánchez y Reygadas-Prado (2001); Guzmán *et al.* (2008). Rec = recarga; Extrac = extracciones.

región agrícola “vulnerable”. Los cambios físicos y biológicos del suelo y la amenaza de deterioro del agua, son evidencias de la presión que sufren actualmente los recursos naturales en dichas regiones del estado mexicano de Baja California Sur.

- El éxito de la producción agrícola tiene una fuerte dependencia de las condiciones de los recursos agua y suelo así como de las tendencias de las variables climáticas; al presentar los cultivos intervalos de tolerancia en algunos casos definidos por los umbrales de dichas variables, si se sobrepasan tales niveles la productividad de los mismos estará en riesgo. En las regiones analizadas la escasa precipitación y por ende la baja disponibilidad hídrica, promueven una mayor extracción de agua de los acuíferos y acelera su agotamiento, por lo que se hace incuestionable la necesidad de una correcta selección y uso de sistemas de riego, así como el uso de prácticas apropiadas que suministren la cantidad suficiente de agua a los cultivos para satisfacer su demanda y reducir al mínimo la acumulación de sales en la zona de las raíces. Dichas prácticas deben fomentarse entre los productores de las zonas de estudio para minimizar el grave deterioro que se ha generado por el uso inadecuado del recurso hídrico y por otro lado, para mejorar las condiciones ambientales de estas regiones productivas, consideradas como pilares de la agricultura en el estado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero del Fondo Sectorial SEP-CONACYT para la Investigación Básica CB-2009-01 mediante el proyecto 000134460; al personal del Laboratorio de Suelos, M.D.A. Manuel S.

Trasviña C., de Irrigacion, M.C. Álvaro González M., al Tec. Juan E. Vega Mayagoitia por su colaboración y asimismo a D. Dorantes por la edición del resumen en inglés.

LITERATURA CITADA

- AGRIINFO. 2011. Climatic requirements of horticultural crops - temperature. AgriInfo.in©. <http://www.agriinfo.in/?page=topic&superid=2&topicid=1023>. (Consulta: diciembre 30, 2011).
- Andrade-Cota, M. I., P. Laporta y L. Lezzi. 2009. Sequías en el sudoeste bonaerense: Vulnerabilidad e incertidumbre. *Geograficando* 5: 213-233.
- Ayers, R. S y D.W. Westcot. 1987. La calidad del agua en la agricultura. Riego y drenaje volumen 29. Estudios FAO. Roma, Italia.
- Cardona, A., J. J. Carrillo-Rivera, R. Huizar-Álvarez, and E. Grael-Castro. 2004. Salinization in coastal aquifers of arid zones: An example from Santo Domingo, Baja California Sur, Mexico. *Environ. Geol.* 45: 350-366.
- Grael Castro, E., A. Pacheco M. y V. Coronado P. 2009. Origen de los sulfatos en el agua subterránea del sur de la sierrita de Ticul, Yucatán. *Ingeniería* 13: 49-58.
- Chávez-López, S. 2010a. Hidrología de la reserva de la biosfera de El Vizcaíno, B.C.S. pp. 35-52. *In*: L. F. Beltrán Morales, S. Chávez López, S. y A. Ortega-Rubio (eds.). Valoración hidrosocial en la reserva de la biosfera del Vizcaíno, BCS. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C. La Paz, B.C.S., México.
- Chávez-López, S. 2010b. Calidad de agua en la reserva de la biosfera de el Vizcaíno, B.C.S. pp. 53-75. *In*: L. F. Beltrán Morales, S. Chávez López, S. y A. Ortega-Rubio (eds.). Valoración hidrosocial en la reserva de la biosfera del Vizcaíno, BCS. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. La Paz, B.C.S., México.
- Cline, W. R. 2007. Global warming and agriculture: Impact estimates by country. Center for Global Development. Washington, DC, USA.

- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2012. Registro público de derechos de agua (REPDA). <http://www.conagua.gob.mx/Repda.aspx?n1=5&n2=37&n3=115>. (Consulta: junio 1, 2012).
- Conde-Álvarez, C. y S. O. Saldaña-Zorrilla. 2007. Cambio climático en América Latina y el Caribe: Impactos, vulnerabilidad y adaptación. *Amb. Desarr.* 23: 23-30.
- Cruz-Falcón A, R. Vázquez-González, J. Ramírez-Hernández, E. H. Nava-Sánchez, E. Troyo-Diéguez, J. Rivera-Rosas y J. E. Vega-Mayagoitia. 2011. Precipitación y recarga en la Cuenca de La Paz, BCS, México. *Univ. Cien.* 27: 251-263.
- Díaz-Castro, S. C. 2010. Variabilidad de los ciclones tropicales que afectan a México. *Interciencia* 35: 306-310.
- Duan X, Y. Xie, G. Liu, and T. Lin. 2008. Analysis of vulnerability of grain crop yields to impacts of climate change in Heilongjiang province. *Chin. J. Agromet.* 29: 6-11.
- Galván-Miyoshi, Y. 2008. Integración de indicadores en la evaluación de sustentabilidad: De los índices agregados a la representación multicriterio. pp. 95-115. *In: M. Astier, O. R. Mansera y Y. Galván (eds.). Evaluación de sustentabilidad. Un enfoque dinámico y multidimensional. UNAM/GIRA/ Mundiprensa/ Fundación Instituto de Agricultura Ecológica y Sustentable. Valencia, España.*
- Guzmán R., S. C., C. Valenzuela-Solano, P. F. Valencia, A. Jimenez-Trejo y S. Carbajal-Ruiz. 2008. Necesidades hídricas de los principales cultivos de Baja California. CEMEXI, CIRNO, INIFAP, SAGARPA. Mexicali, B.C., México
- Luo, H. and L. Wu. 2010. The research progress of agricultural vulnerability and adaptation measures to climate change in China. *Subtrop. Soil Water Conservat.* 22: 2-3.
- Mercado-Mancera, G., E. Troyo-Diéguez, A. Aguirre-Gómez, B. Murillo-Amador, L.F. Beltrán-Morales y J. L. García-Hernández. 2010. Calibración y aplicación del índice de De Martonne para el análisis del déficit hídrico como estimador de la aridez y desertificación en zonas áridas. *Univ. Cienc.* 26: 51-64.
- Mercado-Mancera, G., E. Troyo-Diéguez, A. Aguirre-Gómez, B. Murillo-Amador, M. S. Traviña Castro, L. F. Beltrán-Morales y J. L. García-Hernández. 2011. Variables edafoclimáticas asociadas a la desertificación. *Trop. Subtrop. Agroecosyst.* 13: 133-145.
- Meza-Sánchez, R. y D. D. Reygadas-Prado. 2001. Áreas potenciales y tecnología de producción de cultivos en el Valle de Santo Domingo, B.C.S. Publicación Técnica Núm. 1. INIFAP-CIRNO. La Paz, B.C.S., México.
- Monterroso-Rivas, A. I, A. C. Conde-Álvarez, J. D. Gómez-Díaz y J. López-García. 2009. Vulnerabilidad y riesgo en la agricultura por cambio climático en el estado de Veracruz, México. *Zonas Áridas* 11: 47-60.
- Ponvert-Deslisles, D. R., A. Lau y C. Balamaseda. 2007. La vulnerabilidad del sector agrícola frente a los desastres. Reflexiones generales. *Zonas Áridas.* 11: 174-194.
- Richards, L. A. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Soil and Water Conservation Research Branch. Agricultural Research Service. Agricultural Handbook 60. Riverside, CA, USA.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2011. Indicador estatal de Baja California Sur. Producción Agrícola, Pecuaria y Agroindustrial. La Paz, Baja California Sur, México.
- Salinas-Zavala, C. A., A. Leyva-Conteras, D. Lluch-Belda y E. Díaz-Rivera. 1990. Distribución geográfica y variabilidad climática de los regímenes pluviométricos en Baja California Sur, México. *Atmósfera* 3: 217-237.
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. 2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. México, D. F.
- Norma Oficial Mexicana NOM-023-SEMARNAT-2001. 2001. Especificaciones técnicas que deberán contener la cartografía y la clasificación para la elaboración de los inventarios de suelos. Diario Oficial de la Federación. México, D. F.
- Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003. 2003. Establecer los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos. Diario Oficial de la Federación. México, D. F.
- Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. 2004. Que establece criterios para determinar las concentraciones de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Diario Oficial de la Federación. México, D. F.
- Shengcai, T., X. Yinlong, L. Ke, P. Jie, and G. Shiwei. 2011. Research progress in agricultural vulnerability to climate change. *Clim. Change Res.* 2: 203-210.
- SMN-CNA (Servicio Meteorológico Nacional, Méx.). 2012. Normales climatológicas. línea: http://smn.cna.gob.mx/index2.php?option=com_content&view=article&id=162:baja-california-sur&catid=14. (Consulta: junio 15, 2012).
- Troyo-Diéguez, E., B. Murillo-Amador, R. D. Valdez-Cepeda, J. L. García-Hernández, I. Orona-Castillo, L. F. Beltrán-Morales, E. Rueda-Puente, and A. Cruz-Falcón. 2009. Construction and application of a scaled-linearized aridity index based on rainfall and air temperature data. 2009. Annual symposium. Managing hydrologic extremes. Arizona Hydrological Society and the American Institute of Hydrology. Scottsdale, AZ, USA.
- Troyo-Diéguez, E., J. L. García, B. Murillo-Amador, S. Zamora-Salgado, L. Fenech-Larios, I. Orona-Castillo, F. A. Beltrán-Morales y F. H. Ruiz-Espinoza. 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 a 10 de nov. León, Gto., Méx.
- Wurl, J., M. A. Imaz L., A. Breceda Solís, E. Troyo Diéguez, A. R. Valdez y B. Murillo Amador. 2011. El problema del agua en zonas áridas: dos ejemplos de B.C.S., México. pp 91-110. *In: L. Frutos B. y L. Castorena D. (eds.). Uso y gestión del agua en las zonas semiáridas: el caso Murcia (España) y B.C.S. (México). Univ. de Murcia Editum. España.*