

# Fertilidad e índice de calidad del suelo de la cuenca del río San Pedro en Nayarit

## Fertility and soil quality index of the San Pedro River basin in Nayarit

Óscar Germán Martínez-Rodríguez<sup>1</sup> , Álvaro Can-Chulim<sup>2\*</sup> ,  
Héctor Manuel Ortega-Escobar<sup>3</sup> , José Irán Bojórquez-Serrano<sup>2</sup> , Elia Cruz-Crespo<sup>2</sup> ,  
Juan Diego García-Paredes<sup>2</sup>  y Alberto Madueño-Molina<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Estudiante del Programa de Doctorado en Ciencias Biológico Agropecuarias, Universidad Autónoma de Nayarit. Ciudad de la Cultura "Amado Nervo". 63155 Tepic, Nayarit, México.

<sup>2</sup> Unidad Académica de Agricultura/Posgrado en Ciencias Biológico Agropecuarias. Universidad Autónoma de Nayarit. Carretera Tepic-Compostela km 9. 63155 Xalisco, Nayarit, México.

\* Autor para correspondencia (canchulim@yahoo.com.mx)

<sup>3</sup> Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo. 56230 Texcoco, Edo. de México, México.

### RESUMEN

El área agrícola de la cuenca del río San Pedro en Nayarit es una llanura costera con suelos de origen aluvial, sometidos a inundación, deposición y a diferentes procesos que controlan el aporte de nutrientes y la fertilidad del suelo. El objetivo de esta investigación fue evaluar las propiedades de los suelos para diagnosticar la fertilidad y determinar el índice de calidad del suelo, tomando como parámetros pH, MO, N, P, K, CIC, Ca y Mg. Se realizaron muestreos a 30 cm de profundidad en 38 sitios en junio de 2017 y en 45 en 2018. Se midió pH, CE, textura, Da, CO, MO, N inorgánico, P, CIC y bases intercambiables. Los valores promedio, máximo y mínimo fueron pH 5.78, 8.15 y 3.28; MO 1.58, 3.02 y 0.65%; N inorgánico 22.5, 43.6 y 3.5 mg kg<sup>-1</sup>; P Olsen 32.5, 67.4 y 1.4 mg kg<sup>-1</sup>; K 0.45, 0.80 y 0.10 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, respectivamente. La CE promedio fue 1.39 dS m<sup>-1</sup> e indica que no existen problemas de salinidad. El 73% de los sitios fueron de textura arenosa a franco. El índice de calidad del suelo (SQI por su nombre en inglés) indica que la cuenca tiene un nivel de fertilidad medio, SQI promedio de 0.64; el 17% de los sitios tuvieron una fertilidad baja con pH entre 3.28-5.40, MO 0.81-1.20%, N 10-20 y P 5-10 mg kg<sup>-1</sup>; 42% media, pH 6.41-7.30, MO 2.01-2.50, N 40-60 y P 15-20 mg kg<sup>-1</sup>; 36% moderadamente alta, y 5% alta con pH 8.20-8.80, MO 3.01-4.00, N 100-150

y P 25-35 mg kg<sup>-1</sup>. La distribución del SQI demuestra que en la llanura superior los suelos son de fertilidad baja a media, en la llanura intermedia y baja son de fertilidad media a alta, y en las partes de menor altura, la fertilidad está limitada por la interacción entre el sistema continental y el marino que salinizan los suelos.

**Palabras clave:** cambisoles, fluvisoles, suelos aluviales.

### SUMMARY

The agricultural area of the San Pedro River basin in Nayarit is a coastal plain with alluvial soils, subjected to flooding, deposition and different processes that control nutrient input and soil fertility. The objective of this investigation was to evaluate soil properties to diagnose fertility and determine the soil quality index considering the parameters pH, MO, N, P, K, CIC, Ca and Mg. Samples were carried out at 30 cm in depth in 38 sites in June 2017 and 45 in 2018; pH, EC, texture, Da, CO, MO, inorganic N, P, CIC and interchangeable bases were measured. The mean, maximum and minimum values were pH 5.78, 8.15 and 3.28; MO 1.58, 3.02 and 0.65%; inorganic N 22.5, 43.6 and 3.5 mg kg<sup>-1</sup>; P Olsen 32.5, 67.4 and 1.4 mg kg<sup>-1</sup>; K 0.45, 0.80 and 0.10 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, respectively. The average EC was 1.39 dS m<sup>-1</sup> and indicate that no salinity problems existed; 73% of the sites were

#### Cita recomendada:

Martínez-Rodríguez, Ó. G., Can-Chulim, Á., Ortega-Escobar, H. M., Bojórquez-Serrano, J. I., Cruz-Crespo, E., García-Paredes, J. D. y Madueño-Molina, A. (2021). Fertilidad e índice de calidad del suelo de la cuenca del río San Pedro en Nayarit. *Terra Latinoamericana* 39: 1-13. e766. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.766>

Recibido: 25 de marzo de 2020. Aceptado: 20 de enero de 2021.  
Artículo. Volumen 39, marzo de 2021.

from sandy to loamy texture. The Soil Quality Index (SQI) indicated that the basin had a medium fertility level; average SQI was 0.64; 17% of the sites had low fertility with pH from 3.28-5.40, MO 0.81-1.20%, N 10-20 and P 5-10 mg kg<sup>-1</sup>; 42% medium, pH 6.41-7.30, MO 2.01-2.50, N 40-60 and P 15-20 mg kg<sup>-1</sup>; 36% moderately high, and 5% high with pH 8.20-8.80, MO 3.01-4.00, N 100-150 and P 25-35 mg kg<sup>-1</sup>. The SQI distribution showed that in the upper plain, soils were from low to medium fertility; in the intermediate and low plains from medium to high fertility, and in lower elevation parts, fertility was limited by the interaction between the continental and marine systems that salinize soils.

**Index word:** *cambisols, fluvisols, alluvial soils.*

## INTRODUCCIÓN

La cuenca del río San Pedro en Nayarit es una llanura costera conformada por suelos de origen aluvial. Los sedimentos que dieron origen a estos suelos fueron transportados por el río a las llanuras y lechos de inundación que conformaron abanicos aluviales. Casi todas las partes de un abanico activo están sujetas a inundación y deposición, lo cual, se considera como el mecanismo principal de transporte de nutrientes entre otras sustancias (Singh *et al.*, 2007). Estos abanicos, de diferentes edades, activas e inactivas, están sometidos a diferentes procesos que controlan la fertilidad del suelo (Bahrami y Ghahraman, 2019). De acuerdo a Rinklebe *et al.* (2007), las llanuras de inundación están entre los sistemas más productivos en el mundo, comúnmente dotados con suelos aluviales fértiles y agua; no obstante, el clima y la procedencia de los sedimentos son factores importantes sobre la fertilidad de estos. En esta área predomina el clima cálido subhúmedo con lluvias en verano, con promedios anuales de temperatura de 26 °C y precipitación de 1156 mm. La agricultura es una de las principales actividades económicas con una cobertura de 125 856 ha, de las cuales, 85% son superficies de riego (SMN, 2020; INEGI, 2020). Edelman y Van Der Voorde (1963) mencionan que suelos aluviales en regiones templadas son generalmente ricos en nutrientes minerales, sin embargo, muchos ríos en los trópicos se originan en zonas muy erosionadas y sus depósitos consisten principalmente de cuarzo y otros minerales resistentes, resultando en una baja fertilidad de los sedimentos.

Por otra parte, si el material sedimentario proviene de áreas volcánicas recientes, la composición mineral puede ser favorable y una fertilidad natural alta.

La deficiencia nutrimental del suelo, especialmente de N, P y K, es uno de los principales factores limitantes en el rendimiento de los cultivos (Khan *et al.*, 2018); sumando la materia orgánica (MO) como proveedor de macronutrientes para las plantas, y mejorador de la estructura del suelo, y el pH relacionado con la absorción de nutrientes; son de los indicadores más frecuentes utilizados como indicadores de la calidad del suelo en las áreas de cultivo (Chen *et al.*, 2020). Además de estos, García *et al.* (2012) agrega el carbono orgánico (CO), la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la conductividad eléctrica (CE) como un grupo mínimo de indicadores para evaluar dicha calidad. Al respecto, Sun *et al.* (2003) para utilizar estos índices de manera integral, determinan el índice de calidad del suelo (SQI por su nombre en inglés) como método para evaluar las propiedades del suelo. Chen *et al.* (2020) utilizaron este índice para evaluar el cambio espacial y temporal de la fertilidad del suelo.

El SQI utiliza los diferentes índices de calidad del suelo (ICS) que pueden ser las propiedades físicas, químicas y biológicas o procesos que ocurren en él. Un método frecuentemente utilizado para determinar este índice, es el de análisis de componentes principales (ACP) (Qi *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2013; Cheng *et al.*, 2016; Chen *et al.*, 2020), el cual, involucra un conjunto mínimo de datos (CMD) y nos brinda la opción de utilizar pocos indicadores, pero representativos (Estrada-Herrera *et al.*, 2017). Dado que el número de indicadores no es permanente, para evaluar la calidad del suelo se deben considerar las dimensiones espaciales y temporales (Bautista y Etchevers, 2014), ya que el valor del índice depende de las condiciones y factores limitantes específicos del área a evaluar. Con estos antecedentes de suelos aluviales e índices de calidad se estableció como objetivo evaluar las propiedades de los suelos para el diagnóstico de la fertilidad y determinar el índice de calidad del suelo para el área agrícola de la cuenca del río San Pedro en Nayarit.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en los suelos agrícolas de esta cuenca en Nayarit, que comprende parte de los municipios de Rosamorada y Santiago

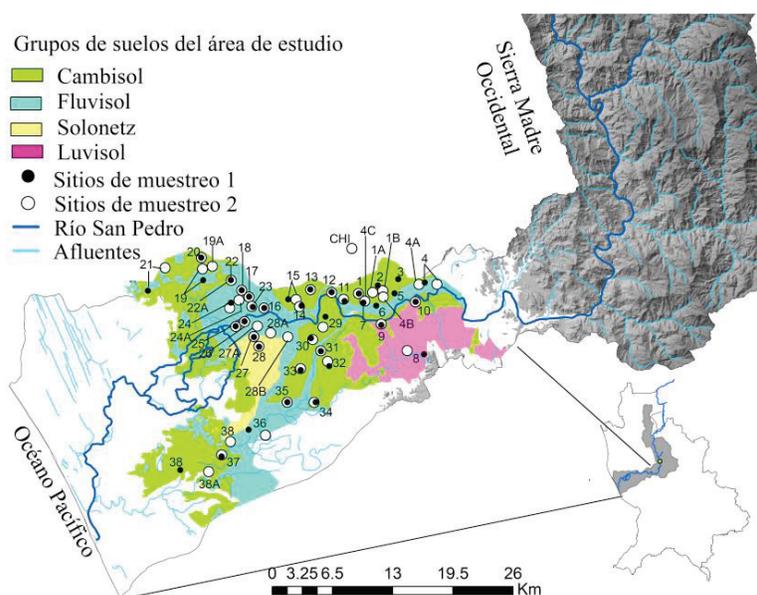
Ixcuintla, y por completo Ruíz y Tuxpan, con un área total de 2196 km<sup>2</sup>.

Se realizaron dos muestreos en temporada de sequía, en junio 2017 y 2018, previo al inicio del temporal de lluvias. En el primer muestreo se ubicaron 38 sitios de muestreo y en el segundo 45; estos fueron georreferenciados con un GPS en coordenadas UTM (Figura 1). Se tomaron muestras de suelo a una profundidad de 30 cm. En los sitios se registraron cultivos como frijol, maíz, sorgo, tomatillo, tabaco y papayo.

Se utilizaron los métodos descritos en la Norma Oficial Mexicana (NOM-021-SEMARNAT-2000) para el análisis de fertilidad de suelos (SEMARNAT, 2002). Se midió el pH (relación 1:2), CE (extracto a saturación), textura (Bouyoucos), densidad aparente (a partir de la textura), carbono orgánico y materia orgánica (Walkley y Black), nitrógeno inorgánico micro-Kjeldahl ( $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$ , extraído con una disolución de KCl 2N), fósforo disponible (Olsen), capacidad de intercambio catiónico y bases intercambiables (extraído por el método de saturación con acetato de amonio  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$  1N, pH = 7).

Los resultados del análisis de la fertilidad se clasificaron de acuerdo a los límites establecidos por Castellanos *et al.* (2000), SEMARNAT (2002) y Álvarez-Sánchez *et al.* (2010) (Cuadro 1), los cuales se agrupan en siete clases.

Para calcular el índice de calidad del suelo (SQI), el primer paso fue seleccionar los indicadores. Para ello se realizó el análisis de componentes principales (ACP) y se seleccionaron aquellos que obtuvieron eigenvalores  $>1$ , considerando que los componentes con elevados eigenvalores, son aquellos que representan mejor los atributos del sistema estudiado (Parra y Rodríguez, 2017). En cada componente se extrajeron las propiedades que presentaron un peso  $\geq 10\%$  del eigenvalor del respectivo componente (Anaya y Jaramillo, 2017). Los indicadores seleccionados se sometieron a un análisis de correlación de Pearson's, en aquellos que mantuvieron alta correlación entre sí, se descartó el de menor peso para evitar redundancia de indicadores al conformar el CMD (un coeficiente mayor a 0.70; correlación del 70%) (Anaya y Jaramillo, 2017). Con el mismo objetivo, se descartaron los indicadores del porcentaje de arena, limo y arcilla, se seleccionó la Da en su lugar, el contenido de CO se sustituyó por la MO y el sodio por el PSI. Posteriormente, los valores de cada indicador seleccionado se estandarizaron entre 0.1-1.0, donde 1 representa el valor óptimo para el indicador. Se utilizó la ecuación (1) de acuerdo al criterio si más alto es mejor para pH, MO, N, P, K, CIC, Ca y Mg, y la ecuación (2) si menos es mejor para CEs, Da y PSI (Li *et al.*, 2013). La comunalidad de cada indicador se extrajo del ACP, donde, el peso o importancia del indicador se determinó por medio



**Figura 1. Ubicación del área de estudio y sitios de muestreo.**  
**Figure 1. Location of the study area and sampling sites.**

del cociente de la comunalidad de cada indicador dividido por la suma de las comunalidades de todos los indicadores involucrados ( $Q_i$  *et al.*, 2009). Por último, se calculó el índice por medio de la Ecuación (3).

$$S = 0.1 + \frac{0.9 \cdot (x - L)}{(U - L)} \quad (1)$$

$$S = 1 - \frac{0.9 \cdot (x - L)}{(U - L)} \quad (2)$$

$$QSI = \sum_{i=1}^n W_i N_i \quad (3)$$

Para las ecuaciones 1 y 2, S = valor estandarizado; x = valor a transformar; L = límite inferior de la propiedad a ser transformada y U = límite superior de la propiedad a ser transformada. Para la ecuación 3, SQI = índice de calidad del suelo;  $W_i$  = el peso asignado;  $N_i$  = indicador estandarizado.

En el SQI, no se involucraron los sitios con problemas de salinidad o sodicidad, estos fueron seis sitios que no corresponden al comportamiento general del área de estudio. Se consideran suelos salinos aquellos que tienen una CE > 4 dS m<sup>-1</sup> en su extracto a saturación, y suelos sódicos a los que presentan un porcentaje de sodio intercambiable (PSI) mayor a 15% (Richards, 1990).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los Cuadros 2 y 3 se presentan los resultados de las determinaciones fisicoquímicas, el promedio y la desviación estándar para cada clase de suelo, del muestreo 1 y 2, respectivamente. En el Cuadro 4 se muestran los porcentajes de los sitios clasificados según su nivel de fertilidad, para cada determinación con base al Cuadro 1.

Se encontró que los principales cultivos están distribuidos en toda el área de estudio, en las llanuras alta, intermedia y baja, y en los diferentes tipos de suelo. Concentrando la mayor producción en la planicie ubicada en la llanura intermedia.

Por tipo de suelo, los Cambisols tuvieron valor de pH entre 3.28 y 8.15, en donde los sitios con suelos con pH ácido, menores a 5.5, se encuentran en las partes más altas del área agrícola y más expuestas a los procesos de lavado continuo de bases, mientras que los de pH mayor a 5.5 corresponden a suelos de las planicies con mayor manejo y producción agrícola, que se caracterizan por recibir la aplicación de enmiendas orgánicas y fertilización constante; 68% de los sitios mostraron textura media; 96% con CE de muy baja a moderadamente baja; 98% con MO de nivel muy bajo a medio; el 100% con N y K de muy bajo a medio. El P se encontró entre 12.0 y 67.4 mg kg<sup>-1</sup>, donde el 93% de las muestras se clasificaron de medio a muy alto; 78%

**Cuadro 1. Intervalos de clasificación e interpretación de análisis de fertilidad de suelos.**

**Table 1. Intervals for classification and interpretation of soil fertility analysis.**

	Muy bajo	Bajo	M. Bajo	Medio	M. Alto	Alto	Muy alto
pH	<4.60	4.60-5.40	5.41-6.40	6.41-7.30	7.40-8.10	8.20-8.80	>8.90
CEs	<0.50	0.51-1.00	1.01-2.00	2.01-2.50	2.51-3.00	3.01-4.00	>4.00
MO	<0.80	0.81-1.20	1.21-1.80	1.81-2.30	2.31-3.00	3.01-4.00	>4.01
NI	<10	10-20	20-40	40-60	60-100	100-150	>150
P	<4	5-10	10-15	15-20	20-25	25-35	>35
K	<0.20	0.20-0.38	0.39-0.51	0.52-1.02	1.03-2.05	2.06-3.07	>3.07
CIC	<5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-40	>40
Ca	<2.50	2.50-3.75	3.75-7.50	7.50-10.00	Oct-15	15-22.50	>22.50
Mg	<0.41	0.41-0.82	0.82-1.64	1.64-3.28	3.28-6.56	6.56-11.48	>11.48
PSI	<1.25	1.25-2.50	2.51-3.75	3.76-5.00	5-10	10-15	>15

CEs = conductividad eléctrica extracto a saturación (dS m<sup>-1</sup>); MO = materia orgánica (%); NI = nitrógeno inorgánico (mg kg<sup>-1</sup>); P = fósforo (mg kg<sup>-1</sup>); K = potasio (cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>); Ca = calcio (cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>); Mg = magnesio (cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>); PSI = porcentaje de sodio intercambiable (%).

CEs = electrical conductivity extract at saturation (dS m<sup>-1</sup>); OM = organic matter (%); NI = inorganic nitrogen (mg kg<sup>-1</sup>); P = phosphorus (mg kg<sup>-1</sup>); K = potassium (cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>); Ca = calcium (cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>); Mg = magnesium (cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>); PSI = percentage of exchangeable sodium (%).

de la CIC, 84% de Ca y 90% de Mg, se clasificaron de medio a muy alto. El 27% de los sitios presentaron un PSI de moderadamente alto a muy alto.

En los Fluvisols 91% de los sitios tuvieron suelos con pH entre 4.95-7.70; 65% textura media; 88% con CE de baja a moderadamente baja; 98% de MO y el 100% de N y K se clasificaron de muy bajo a medio; el contenido de P fue de moderadamente bajo a muy alto; en 97% de las muestras la CIC y el 100% en Ca se encontraron de moderadamente bajo a alto; el 88% de los sitios en Mg se clasificaron de moderadamente

bajo a muy alto; el 28% con PSI moderadamente alto y el 6% muy alto.

En los Luvisols 83% de los sitios presentaron un pH < 5.50; 83% textura media; en CE no existen problemas por salinidad; 83% de los valores de la MO se encuentran de moderadamente bajos a medios, el resto en muy bajo; el N fue de bajo a medio; P de medio a muy alto y K de muy bajo a moderadamente bajo. En 33% la CIC se clasificó como bajo y en 67% como medio; el Ca fue de bajo a moderadamente alto; 66% con Mg de nivel adecuado; 17% con PSI de nivel alto.

**Cuadro 2. Análisis de fertilidad de los suelos de la cuenca del río San Pedro (muestreo 1) en Nayarit, México.**  
**Table 2. Soil fertility analysis of the San Pedro River basin (Sample 1) in Nayarit, Mexico.**

Estadístico	pH	CEs	Da	Are	Lim	Arc	MO	N	P	K	CIC	Ca	Mg	PSI
	1.2	dS m <sup>-1</sup>	g cm <sup>-3</sup>	- - - -	% - - - -	- - - -	%	- mg kg <sup>-1</sup>	-	- - - -	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	- - - -	- - - -	%
Cambisol N = 18; grupos texturales: F. FL. FLA.														
Promedio	5.91	0.66	1.36	26.4	49.4	24.2	1.19	16.8	27.1	0.51	18.9	11.8	2.43	6.83
Mediana	6.1	0.41	1.37	28.4	51.3	22.5	2.21	14.9	25.6	0.53	20.2	13.06	2.33	4.17
Mínimo	3.96	0.2	1.27	9.48	32.7	16.2	0.73	10.5	12	0.25	6	1.58	0.86	2.61
Máximo	8.15	2.59	1.42	45.5	59.1	33.8	1.74	29.7	49.5	0.74	30.9	18.6	4.64	26.1
DE	1.13	0.64	0.05	11.1	8.4	5.04	0.3	5.02	8.92	0.13	6.97	4.96	1.07	6.85
Fluvisol N = 15; grupos texturales: FAre. F. FL. FA. A.														
Promedio	6.44	3.74	1.38	32.9	44.4	22.6	1.21	15.3	35.1	0.57	20.2	13	3.34	7.11
Mediana	6.51	0.68	1.38	31.1	46	23.8	1.06	14	36.8	0.54	19.4	13.5	1.47	3.94
Mínimo	5.18	0.38	1.25	12.3	26.7	12.2	0.65	8.74	13.2	0.38	9.28	6.33	0.22	2.83
Máximo	7.7	32.5	1.51	57.1	66.8	46.5	2.79	43.7	72	0.8	38.7	18.6	14	26.6
DE	0.63	8.8	0.07	14.2	11.9	8.6	0.56	8.18	14.5	0.14	8.2	3.43	4.12	7.86
Luvisol N = 3; grupos texturales: F. FL. FA.														
Promedio	4.91	0.64	1.36	32.1	41.3	26.5	1.34	29.7	41.7	0.37	13.1	6.33	3.05	6.32
Mediana	5.12	0.79	1.32	37.5	38	26.5	1.31	36.7	23.3	0.33	15.1	5.54	0.79	4.45
Mínimo	4.36	0.16	1.32	15.5	28	18.5	0.74	12.2	18.6	0.26	6.5	3.96	0.38	3.89
Máximo	5.24	0.96	1.43	43.5	58	34.5	1.96	40.2	83.3	0.51	17.8	9.5	7.97	10.6
DE	0.48	0.42	0.06	14.7	15.3	8	0.61	15.2	36.1	0.13	5.88	2.85	4.27	3.73
Solonetz N = 2; grupos texturales: FL. AL.														
Promedio	6.01	1.52	1.32	17.5	52.4	30.2	2.16	33.2	31.4	0.49	27.9	19.6	2.91	2.39
Mediana	6.01	1.52	1.32	17.5	52.4	30.2	2.16	33.2	31.4	0.49	27.9	19.6	2.91	2.39
Mínimo	5.49	1.24	1.24	13.5	42.4	16.1	1.3	28	9.6	0.47	25.5	18.6	2.56	2.16
Máximo	6.52	1.8	1.4	21.5	62.4	44.1	3.02	38.4	53.3	0.51	30.3	20.6	3.25	2.63
DE	0.73	0.4	0.11	5.66	14.1	19.8	1.22	7.39	30.8	0.03	3.36	1.4	0.48	0.34

CEs = conductividad eléctrica en extracto a saturación; Da = densidad aparente; Are = arena; Lim = limo; Arc. = arcilla; Text. = textura; F = franco; FAre = franco arenoso; FL = franco limoso; FA = franco arcilloso; FLA = franco limoso arcilloso; A = arcilloso; AL = arcillo limoso; MO = materia orgánica; CIC = capacidad de intercambio catiónico; PSI = porcentaje de sodio intercambiable; Med = media; DE = desviación estándar.

CEs = electrical conductivity in extract at saturation; Da = apparent density; Are = sand; Lim = silt; Arc. = clay; Text. = texture; F = frank; FAre = sandy loam; FL = silty loam; FA = clay loam; FLA = silty clay loam; A = clay; AL = silty clay; MO = organic matter; CIC = cation exchange capacity; PSI = percentage of exchangeable sodium; Med = mean; DE = standard deviation.

**Cuadro 3. Análisis de fertilidad de los suelos de la cuenca del río San Pedro (muestreo 2) en Nayarit, México.**  
**Table 3. Soil fertility analysis of the San Pedro River basin (Sample 2) in Nayarit, Mexico.**

ID	pH	CEs	Da	Are	Lim	Arc	MO	N	P	K	CIC	Ca	Mg	PSI
	1:02	dS m <sup>-1</sup>	g cm <sup>-3</sup>	- - - - % - - - -	- - - - % - - - -	- - - - % - - - -	%	- mg kg <sup>-1</sup> -	- - - - -	- - - - -	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> - - - - -	- - - - -	- - - - -	%
Cambisol N = 23; grupos texturales: FA. F. FL. FLA. AL.														
Promedio	5.68	0.73	1.34	21.9	51.8	26.3	1.61	18.4	34.9	0.43	21.0	11.8	4.88	3.78
Mediana	5.75	0.36	1.36	21.6	52.0	24.0	1.53	15.6	32.9	0.46	21.5	12.4	4.64	2.53
Mínimo	3.28	0.14	1.23	5.03	32.4	16.0	0.67	3.50	12.7	0.10	5.50	0.94	1.74	1.24
Máximo	6.95	5.56	1.46	51.6	64.0	45.6	2.49	41.8	67.4	0.78	31.2	18.8	9.67	13.5
DE	0.90	1.13	0.05	10.5	7.81	7.42	0.43	10.8	15.5	0.17	6.00	4.27	1.92	3.42
Fluvisol N = 17; grupos texturales: FArc. F. FL. FLA.														
Promedio	6.32	1.03	1.39	32.9	45.9	21.3	1.45	19.2	22.9	0.49	21.8	13.63	4.41	4.14
Mediana	6.46	0.60	1.38	28.9	48.7	22.0	1.52	19.2	17.7	0.46	22.7	15.0	4.24	3.74
Mínimo	4.95	0.24	1.28	8.65	18.4	12.0	0.65	7.80	1.45	0.30	14.5	8.92	1.59	1.44
Máximo	6.98	4.85	1.52	65.6	62.4	33.6	2.14	50.7	48.4	0.68	28.0	16.9	7.89	8.85
DE	0.47	1.17	0.07	17.2	13.9	6.4	0.46	9.4	13.7	0.11	3.88	2.55	1.71	2.08
Luvisol N = 3; grupo textural: F.														
Promedio	5.14	0.28	1.40	36.3	42.9	20.8	1.8	17.4	35.3	0.25	14.8	6.26	5.36	2.43
Mediana	4.86	0.28	1.39	31.6	44.7	20.4	1.8	13.9	24.2	0.14	17.2	5.64	4.24	2.75
Mínimo	4.75	0.17	1.37	31.6	36.0	18.4	1.48	13.9	19.0	0.11	8.70	2.82	2.71	1.36
Máximo	5.81	0.39	1.43	45.6	48.0	23.6	2.11	24.4	62.6	0.50	18.5	10.3	9.13	3.19
DE	0.58	0.11	0.03	8.10	6.2	2.7	0.32	6.07	23.8	0.22	5.3	3.80	3.36	0.96
Solonetz N = 2; grupo textural: FLA.														
Promedio	5.85	2.48	1.27	4.42	63.3	32.3	1.9	30.3	31.6	0.46	32.1	17.8	10.1	4.65
Mediana	5.85	2.48	1.27	4.42	63.3	32.3	1.9	30.3	31.6	0.46	32.1	17.8	10.1	4.65
Mínimo	5.59	1.13	1.24	3.92	56.0	25.4	1.45	27.9	23.4	0.45	31.1	16.9	10.1	2.85
Máximo	6.10	3.82	1.30	4.92	70.6	39.1	2.34	32.6	39.8	0.47	33.2	18.8	10.2	6.46
DE	0.36	1.90	0.04	0.7	10.3	9.6	0.63	3.3	11.6	0.01	1.48	1.33	0.02	2.55

CEs = conductividad eléctrica en extracto a saturación; Da = densidad aparente; Are = arena; Lim = limo; Arc. = arcilla; Text. = textura; F = franco; Fare = franco arenoso; FL = franco limoso; FA = franco arcilloso; FLA = franco limoso arcilloso; A = arcilloso; AL = arcillo limoso; MO = materia orgánica; CIC = capacidad de intercambio catiónico; PSI = porcentaje de sodio intercambiable; Med = media; DE = desviación estándar.

CEs = electrical conductivity in extract at saturation; Da = apparent density; Are = sand; Lim = silt; Arc. = clay; Text. = texture; F = frank; Fare = sandy loam; FL = silty loam; FA = clay loam; FLA = silty clay loam; A = clay; AL = silty clay; MO = organic matter; CIC = cation exchange capacity; PSI = percentage of exchangeable sodium; Med = mean; DE = standard deviation.

En los Solonetz el pH presentó niveles adecuados; 75% con textura moderadamente fina y fina; el 75% no tienen problemas de salinidad y el resto son ligeramente salinos. De acuerdo al IUSS Working Group WRB (2015) este tipo de suelo se caracteriza por tener un alto contenido de Na intercambiable, lo cual provoca la dispersión del suelo, sin embargo, presentaron los más altos contenidos de MO, con 50% de los sitios con nivel adecuado y el resto como moderadamente bajo. Tomando en cuenta que la concentración de Ca resultó alta, derivado del manejo donde se realizan aplicaciones de enmiendas

orgánicas y fuentes de Ca para controlar los problemas por exceso de Na, lo que se ve reflejado en el PSI con valores entre 2.10 y 6.46%. Nitrógeno y K fueron moderadamente bajos, solo el 25% de los sitios tienen bajo contenido de P y el 75% se encontró de moderadamente alto a muy alto. La CIC fue de nivel alto mientras que el Mg solo 50% fue alto y el resto medio.

Para todos los muestreos, el 29% de los sitios analizados presentaron valores de pH menores de 5.5, de acuerdo a Álvarez-Sánchez *et al.* (2010) esta condición de acidez se relaciona con altos niveles

de aluminio (Al) activo, que además de favorecer la retención de P, puede producir toxicidad para las plantas y microorganismos. Sin embargo, la concentración promedio de P disponible fue alta ( $32.49 \text{ mg kg}^{-1}$ ), lo cual es muy común debido a adiciones continuas que promueven su acumulación,

aunque esto puede conducir a deficiencias de Zn (Barben *et al.*, 2007). Por otra parte, a pH ácido pueden encontrarse elevadas concentraciones de Mn y Fe, donde un desbalance entre estos provoca un efecto antagónico que pueden llegar a causar problemas en los cultivos (Álvarez-Sánchez *et al.*, 2010).

**Cuadro 4. Porcentajes de sitios clasificados por categorías de acuerdo a su nivel de fertilidad.**

**Table 4. Percentages of sites classified by categories according to their level of fertility.**

Nivel de fertilidad	pH	CEs	MO	N	P	K	CIC	Ca	Mg	PSI
Cambisol N = 41										
Muy bajo	12	64	7	7	0	5	0	7	0	5
Bajo	27	22	25	63	0	20	7	2	0	22
Moderadamente bajo	34	10	51	25	7	37	15	7	10	34
Medio	25	0	15	5	10	38	17	7	37	12
Moderadamente alto	2	2	2	0	20	0	34	49	46	10
Alto	0	0	0	0	34	0	27	28	7	12
Muy alto	0	2	0	0	29	0	0	0	0	5
Fluvisol N = 32										
Muy bajo	0	29	16	6	3	0	0	0	3	0
Bajo	6	53	28	66	6	12	3	0	9	16
Moderadamente bajo	38	6	34	22	6	41	16	3	19	34
Medio	53	0	19	6	19	47	31	13	22	16
Moderadamente alto	3	3	3	0	13	0	37	47	31	28
Alto	0	0	0	0	19	0	13	38	13	0
Muy alto	0	9	0	0	34	0	0	0	3	6
Luvisol N = 6										
Muy bajo	17	66	17	0	0	33	0	0	17	0
Bajo	66	34	0	50	0	33	33	17	17	17
Moderadamente bajo	17	0	50	33	0	33	0	50	0	33
Medio	0	0	33	17	33	0	67	17	17	33
Moderadamente alto	0	0	0	0	33	0	0	16	17	0
Alto	0	0	0	0	0	0	0	0	32	17
Muy alto	0	0	0	0	33	0	0	0	0	0
Solonetz N = 4										
Muy bajo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bajo	0	0	0	0	25	0	0	0	0	25
Moderadamente bajo	75	75	50	100	0	100	0	0	0	50
Medio	25	0	0	0	0	0	0	0	50	0
Moderadamente alto	0	25	25	0	25	0	0	0	0	25
Alto	0	0	25	0	25	0	100	100	50	0
Muy alto	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0

CEs = conductividad eléctrica en extracto a saturación; MO = materia orgánica; CIC = capacidad de intercambio catiónico; PSI = porcentaje de sodio intercambiable.

CEs = electrical conductivity in extract at saturation; MO = organic matter; CIC = cation exchange capacity; PSI = percentage of exchangeable sodium.

De acuerdo a Ibarra-Castillo *et al.* (2009) dentro de los factores responsables de la acidificación de los suelos se encuentran el material parental, la actividad agrícola intensiva que propicia la remoción constante de Ca, Mg y K por los cultivos, la aplicación de insumos que provocan acidez (fertilizantes de reacción ácida) y la lixiviación de bases intercambiables, como en el área de estudio donde la precipitación supera los 1100 mm y los constantes desbordes del río San Pedro desde tiempos geológicos han favorecido este proceso. En este sentido, de los 24 sitios con problemas de acidez, todos obtuvieron niveles bajos (de muy bajo a moderadamente bajo) en K, 11 sitios fueron bajos en Ca y 4 sitios bajos en Mg.

En general, la CE, P y CIC no son factores limitantes en la mayor parte de los sitios, solo algunos de ellos requieren atención; los bajos valores de CE indican que no existen problemas de salinidad ( $CE \leq 4 \text{ dS m}^{-1}$ ); se tiene una acumulación considerable de P y una alta CIC. El pH ( $< 5.50$ ) y PSI ( $> 5\%$ ) en el 29% de los sitios y los bajos contenidos de MO, N y K, fueron los principales problemas detectados en la fertilidad de los sitios evaluados. La MO es un indicador importante para determinar el nivel de fertilidad de los suelos, cuando el contenido de MO es alto la fertilidad suele ser alta, esto es debido a que la MO se asocia con la liberación de N, P y S, y por su acción quelatante está relacionada con la disponibilidad de Fe, Mn, Cu y Zn; sin embargo, el pH ácido puede acomplejar la disposición de P y otros elementos (Castellanos *et al.*, 2000); los sitios evaluados presentaron un bajo contenido de MO, por lo que se recomienda la aplicación de ésta en forma de abonos orgánicos para mejorar tanto las propiedades físicas como el aporte nutrimental.

El N es nutriente muy dinámico que se pierde con gran facilidad, es el más deficiente en los sistemas agrícolas (Omara *et al.*, 2019), lo cual puede constatarse en el Cuadro 4 con niveles bajos en la mayor parte de los sitios. A diferencia del P, el N no tiene la misma capacidad de acumularse en el suelo.

Con respecto al K, de acuerdo a Das *et al.* (2019), este elemento es requerido por los cultivos casi en las mismas proporciones o en algunos casos mayor que el N; no obstante, la mayoría de los agricultores solo aplican N, o N y P sin considerar o solo agregando cantidades pequeñas de fertilizante potásico. Esto concuerda con los resultados en los Cuadros 2, 3 y 4, con bajos contenidos de K y elevadas concentraciones

de P. Con relación a sitios de pH ácido, Legesse *et al.* (2017) mencionan que la acidificación del suelo resulta en la deficiencia de nutrientes, entre ellos el K. Diversos estudios han demostrado que la disponibilidad de K es menor en suelos ácidos (Zhang *et al.*, 2009), lo cual reduce el rendimiento de los cultivos. Por esta razón, corregir la acidez de los sitios evaluados resulta un factor importante en la asimilación de los nutrientes por los cultivos, en el caso del K, Liu *et al.* (2020) mencionan que la adición de cal permite remover el Al de los sitios intercambiables incrementando la disponibilidad de K y otras bases intercambiables.

Con respecto al PSI, de acuerdo a Richards (1990), un suelo se considera sódico cuando tiene un  $PSI \geq 15\%$ , sin embargo, Zhu *et al.* (2019) mencionan que desde un  $PSI > 5\%$  existen efectos negativos sobre las propiedades físicas de los suelos ocasionando defloculación de las arcillas y colapso de los agregados. Castellanos *et al.* (2000) mencionan que, en suelos de textura fina, a valores de  $PSI > 5\%$  la conductividad hidráulica desciende significativamente, llegando a niveles muy bajos a  $PSI = 10\%$ . El 73% de los sitios fueron de textura gruesa a media, el 22% moderadamente fina y solo el 5% fina. Si se consideran los contenidos bajos de MO y K, el 29% de los sitios que obtuvieron un PSI entre 5-15% podrían tener problemas del orden físico, como la dispersión de las arcillas que propiciará la degradación de la estructura de los suelos, como mencionan Zhu *et al.* (2019); el impacto de este problema será mayor en los suelos de textura moderadamente fina que corresponden a los sitios con textura franco limoso arcilloso y franco arcilloso, y en los de textura fina que son los sitios arcilloso limoso y arcilloso (Cuadro 2 y 3).

Debido a que los factores limitantes en la fertilidad de los suelos no son homogéneos en el área de estudio, se calculó el índice de calidad del suelo (SQI), el cual integra los diferentes indicadores de fertilidad para calcular un índice global de cada sitio evaluado. A partir del ACP resultaron 11 componentes principales, de los cuales, solo cuatro de ellos componentes obtuvieron eigenvalores mayores a uno, representando el 75% de la varianza acumulada. Dentro de este porcentaje todos los indicadores resultaron estar involucrados en al menos un componente con un peso canónico estandarizado  $\geq 10\%$  del eigenvalor de su respectivo componente (Cuadro 5). Las variables que resultaron redundantes fueron el pH con el K y Ca, y el Ca con

la CIC (Figura 2), de los cuales, se seleccionaron el pH y la CIC por tener mayor peso (comunalidad) de acuerdo al ACP (Cuadro 5). Por lo tanto, el CMD

quedó integrado por nueve indicadores (Cuadro 6), una vez establecido el CMD se calculó el SQI de acuerdo a los criterios establecidos del Cuadro 6.

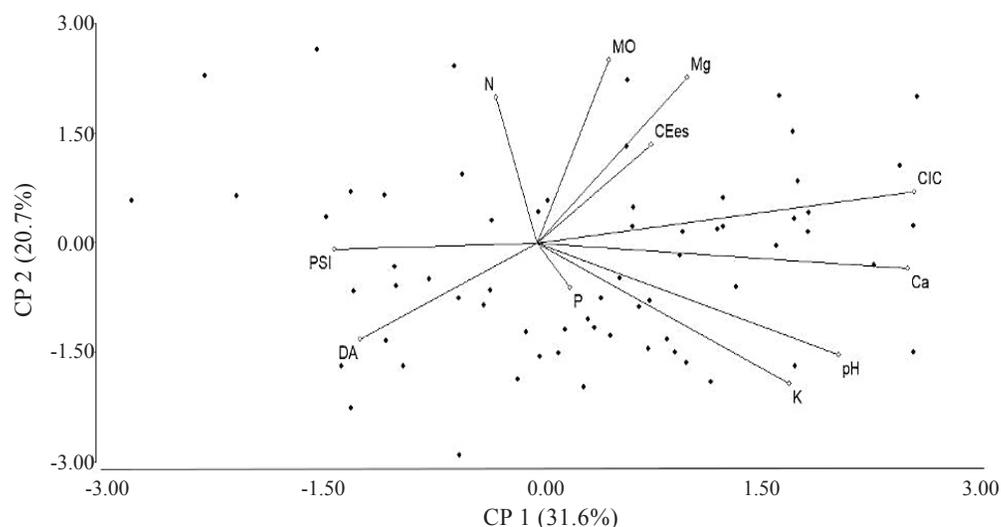
**Cuadro 5. Peso canónico estandarizado de las variables en los cuatro primeros componentes principales.**

**Table 5. Standardized canonical weight of the variables in the first four main components.**

	CP1	CP2	CP3	CP4	Comunalidad
pH	<b>0.76</b>	<b>-0.45</b>	<b>0.26</b>	<b>0.23</b>	0.90
CEs	0.29	<b>0.40</b>	<b>0.65</b>	<b>-0.40</b>	0.81
DA	<b>-0.45</b>	<b>-0.39</b>	<b>0.26</b>	<b>0.44</b>	0.61
MO	0.18	<b>0.74</b>	-0.11	<b>0.27</b>	0.66
N	-0.10	<b>0.59</b>	<b>0.38</b>	<b>-0.18</b>	0.53
P	0.08	-0.18	<b>-0.48</b>	<b>-0.75</b>	0.83
K	<b>0.63</b>	<b>-0.57</b>	<b>0.15</b>	<b>-0.15</b>	0.77
CIC	<b>0.95</b>	0.21	0.00	0.06	0.94
Ca	<b>0.93</b>	-0.11	<b>0.14</b>	0.02	0.89
Mg	<b>0.38</b>	<b>0.67</b>	<b>-0.22</b>	<b>0.15</b>	0.66
PSI	<b>-0.51</b>	-0.02	<b>0.60</b>	<b>-0.21</b>	0.66
Eigenvalor	3.47	2.28	1.38	1.17	----
% varianza	31.59	20.69	12.59	10.60	----
% var. acum.	31.59	52.27	64.86	75.46	----

En letra negrita el peso significativo en el respectivo componente. CP = componente principal; CEs = extracto a saturación; Da = densidad aparente; MO = materia orgánica; CIC = capacidad de intercambio catiónico; PSI = porcentaje de sodio intercambiable; % varianza = porcentaje de la varianza que representa; % var. acum. = porcentaje de la varianza acumulada.

In bold type the significant weight in the respective component. CP = main component; CEs = extract at saturation; Da = apparent density; MO = organic matter; CIC = cation exchange capacity; PSI = percentage of exchangeable sodium; % variance = percentage of the variance it represents; % var. accum. = percentage of cumulative variance.



**Figura 2. Relación entre los indicadores analizados de los componentes 1 y 2; representan el 52.3% de la varianza acumulada.**

**Figure 2. Relationship between the analyzed indicators of components 1 and 2 which represent 52.3% of the accumulated variance.**

**Cuadro 6. Peso canónico estandarizado, valor inferior y superior para los indicadores seleccionados que conforman el conjunto mínimo de datos (CMD).**

**Table 6. Standardized canonical weight, lower and upper value for the selected indicators that make up the minimum data set (CMD).**

Indicador	Peso	L	U	Fuente
pH	0.13	3.00	6.50	Castellanos <i>et al.</i> , 2000; Parra y Rodríguez, 2017
CEs	0.13	0.25	4.00	De acuerdo a gráficos CEs contra N, P, K
DA	0.09	1.12	1.96	Parra y Rodríguez, 2017
MO	0.11	0.00	6.00	SEMARNAT, 2002
N	0.09	20.00	100.00	Cuadro 1. Álvarez-Sánchez <i>et al.</i> , 2010
P	0.12	1.00	36.00	Parra y Rodríguez, 2017
CIC	0.14	10.00	20.00	Li <i>et al.</i> , 2013
Mg	0.09	0.41	6.56	Cuadro 1. Álvarez-Sánchez <i>et al.</i> , 2010
PSI	0.10	0.00	10.00	Cuadro 1. Richards, 1990

L y U = límite inferior y superior para la estandarización del indicador; CEs = extracto a saturación; Da = densidad aparente; MO = materia orgánica; CIC = capacidad de intercambio catiónico; PSI = porcentaje de sodio intercambiable.

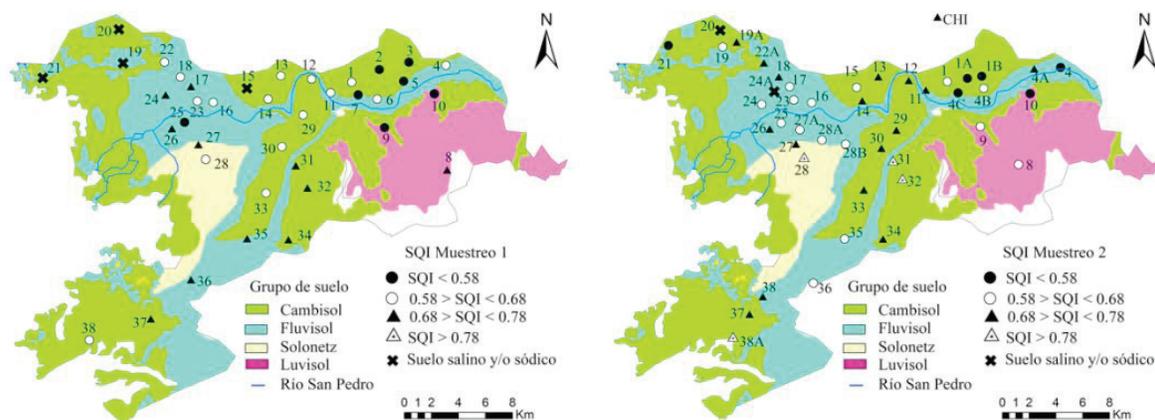
L and U = lower and upper limit for the standardization of the indicator; CEs = extract at saturation; Da = apparent density; MO = organic matter; CEC = cation exchange capacity; PSI = percentage of exchangeable sodium.

De acuerdo a Qi *et al.* (2009) la clasificación del SQI se considera bajo  $< 0.58$ , medio entre  $0.58-0.68$ , moderadamente alto entre  $0.68-0.78$  y alto  $\geq 0.78$ . Con base a esto, el 17% de los sitios evaluados resultaron tener fertilidad baja, 42% fertilidad media, 36% fertilidad moderadamente alta y el 5% fertilidad alta (Figura 3).

Con excepción del sitio P25 del primer muestreo y los sitios P4 y P21 del segundo, el resto de los sitios con SQI bajo ubicados al pie de montaña de la SMO,

al noroeste de la cuenca (Figura 3), son suelos ácidos con un intervalo de pH entre 3.28-5.18 (Cuadro 2 y 3), su baja fertilidad se debe principalmente a que el pH del suelo es uno de los principales factores que afectan los procesos químicos, físicos y biológicos del suelo (Liu *et al.*, 2020).

Los sitios P25, P4 y P21 son sitios que se encuentran en proceso de mejoramiento por los elevados contenidos de Ca que presentan, P25 y P4 presentan pH cercanos a 5.5, de textura franca arenosa



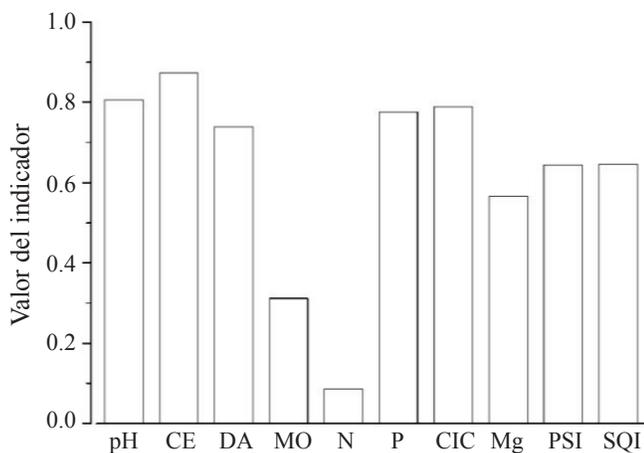
**Figura 3. Clasificación del índice de calidad del suelo (SQI) del área de estudio.**

**Figure 3. Classification of soil quality index (SQI) of the study area.**

y franca respectivamente, bajos en MO. El P25 tiene bajo contenido de NK y P4 es bajo en NPK, mientras que el P21 además de sus bajas concentraciones en MO y NPK, tiene  $PSI = 10.31\%$  que representa un serio problema sobre las propiedades físicas y más por tener textura moderadamente fina. De acuerdo a Shainberg *et al.* (2001) los efectos negativos del Na tienen mayor impacto en suelos con textura fina.

Los sitios con SQI altos se caracterizan por tener un pH adecuado entre 5.75-6.43, de moderadamente alto a muy alto en P, alrededor del nivel medio en K, alto en CIC, Ca y Mg y PSI entre 1.33-2.85%. Estos sitios resultaron ser de textura moderadamente fina a fina, de acuerdo a Castellanos *et al.* (2000) los suelos de textura fina normalmente son los de más alta fertilidad natural, sin embargo, deben manejarse con cuidado debido a que se compactan fácilmente, cuando tienen buenos contenidos de MO suelen ser extraordinariamente productivos. En este sentido, los sitios P28 y P38A tienen niveles adecuados de MO, mientras que P31 y P32 son moderadamente bajos al igual que en N.

En general, en la Figura 4 se observó que los factores limitantes en la fertilidad de los suelos en los sitios evaluados son la MO y el N, sin embargo, existen diversos sitios con problemas, como la deficiencia de K que no conformó el CMD, que afectan directamente el rendimiento.



**Figura 4. Media del índice de calidad del suelo (SQI) y de los indicadores estandarizados que conformaron el conjunto mínimo de datos (CMD).**

**Figure 4. Soil quality index (SQI) average and standardized indicators that made up the minimum data set (CMD).**

El SQI promedio fue clasificado como un nivel de fertilidad medio, en la distribución del SQI mostrado en la Figura 3 puede observarse que en la llanura superior (cercano a pie de montaña) los suelos son de fertilidad baja a media, en la llanura intermedia y baja son de fertilidad media a alta, no obstante, la variabilidad del SQI refleja la influencia de las diferentes prácticas de manejo a los que están sometidos los suelos. Los sitios P19, P20 y P21 del primer muestreo, P20, P21 y P24A del segundo (salinos o sódicos), muestran que en las partes de menor altura de la cuenca la fertilidad está limitada por la interacción entre el sistema continental y el marino, que de manera natural salinizan los suelos.

## CONCLUSIONES

En general, la cuenca del río San Pedro tiene un nivel de fertilidad media ( $SQI_{med} = 0.64$ ), el 17% de los sitios fue de fertilidad baja, 42% de fertilidad media, 36% de fertilidad moderadamente alta y el 5% de fertilidad alta, el SQI mínimo y máximo fue de 0.33 a 0.81 (de bajo a alto). Los indicadores limitantes de la fertilidad de los suelos fueron el pH y PSI en el 29% de los sitios, y la MO, N y K en la mayor parte de los sitios. La acumulación de P refleja el suministro constante de este elemento.

Es preciso incrementar el pH de los suelos ácidos menores a 5.5 mediante el encalado, elevar el porcentaje de MO mediante abonos orgánicos, reducir el PSI en los sitios mayores al 5% con la aplicación de yeso y mejorar el balance nutrimental con base a la demanda nutrimental de los cultivos.

## DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

## CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

## DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

## FONDOS

El financiamiento de esta investigación fue con recursos propios de los autores.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Investigación, análisis formal de datos, curación de contenidos, preparación del borrador original, revisión y edición: Ó.G.M.R. Conceptualización, investigación, metodología, administración del proyecto, adquisición de fondos, análisis formal de datos, curación de datos, curación de contenidos, preparación del borrador original, revisión y edición: Á.C.C. Conceptualización, investigación, metodología, adquisición de fondos, análisis formal de datos, curación de datos, curación de contenidos, preparación del borrador original, revisión y edición: H.M.O.E. Adquisición de fondos, asesoría, revisión y edición: J.I.B.S. Conceptualización, asesoría y supervisión de la investigación, revisión y edición: E.C.C. Adquisición de fondos, asesoría, revisión y edición: J.D.G.P. Asesoría, revisión y edición: A.M.M.

## AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Héctor Manuel Ortega Escobar que a través del Departamento de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados, coadyuvó en la generación de datos.

## LITERATURA CITADA

Álvarez-Sánchez, M. E., J. Velázquez-Mendoza, R. Maldonado-Torres, G. Almaguer-Vargas y A. L. Solano-Agama. 2010. Diagnóstico de la fertilidad y requerimiento de cal de suelos cultivados con *Agave Azul* (*Agave tequilana* Weber). *Terra Latinoamericana* 28: 287-293.

Anaya-Gómez, M. L. y D. F. Jaramillo-Jaramillo. 2017. Determinación de dos índices de la calidad del suelo en la calidad de la taza de café. *Rev. Fac. Cienc.* 6: 102-123. doi: <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v6n2.65667>.

Bahrami, S. and K. Ghahraman. 2019. Geomorphological controls on soil fertility of semi-arid alluvial fans: A case study of the Joghatay Mountains, Northeast Iran. *Catena* 176: 145-158. doi: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.01.016>.

Barben, S. A., B. A. Nichols, B. G. Hopkins, V. D. Jolley, J. W. Ellsworth, and B. L. Webb. 2007. Phosphorus and zinc interactions in potato. *West. Nutr. Manage. Conf.* 7: 219-223.

Bautista-Cruz, A. y J. D. Etchevers-Barra. 2014. Una revisión sobre los conceptos de la calidad del suelo: sus indicadores e índices. Editorial Académica Española. Riga, Letonia, Unión Europea. ISBN-13: 978-3847365099.

Castellanos, J. Z., J. X. Uvalle-Bueno y A. Aguilar-Santelises. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas agrícolas, plantas y ECP. Instituto de Capacitación y la Productividad Agrícola. Celaya, Guanajuato, México.

Chen, S., B. Lin, Y. Li, and S. Zhou. 2020. Spatial and temporal changes of soil properties and soil fertility evaluation in a large grain-production area of subtropical plain, China. *Geoderma* 357: 113937. 1-13. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113937>.

Cheng, J., C. Ding, X. Li, T. Zhang, and X. Wang. 2016. Soil quality evaluation for navel orange production system in central subtropical China. *Soil Tillage Res.* 155: 225-232. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.08.015>.

Das, D., B. S. Dwivedi, S. P. Datta, S. C. Datta, M. C. Meena, B. K. Agarwal, D. K. Shahi, M. Singh, D. Chakraborty, and S. Jaggi. 2019. Potassium supplying capacity of a red soil from eastern India after forty-two years of continuous cropping and fertilization. *Geoderma* 341: 76-92. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.041>.

Edelman, C. H. and P. K. J. Van Der Voorde. 1963. Important characteristics of alluvial soils in the tropics. *Soil Sci.* 95: 258-263.

Estrada-Herrera, I., C. Hidalgo-Moreno, R. Guzmán-Plazola, J. J. Almaraz-Suárez, H. Navarro-Garza y J. D. Etchevers-Barra. 2017. Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencias* 51: 813-831.

García, Y., W. Ramírez y S. Sánchez. 2012. Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes* 35: 125-138.

Ibarra-Castillo, D., J. A. Ruiz-Corral, D. R. González-Eguiarte, J. G. Flores-Garnica y G. Díaz-Padilla. 2009. Distribución espacial del pH de los suelos agrícolas de Zapopan, Jalisco, México. *Agric. Téc. Méx.* 35: 267-276.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2020. Anuario estadístico y geográfico de Nayarit 2017. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, Aguascalientes, México. [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/anuarios\\_2017/702825092054.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825092054.pdf) (Consulta: octubre 28, 2020).

IUSS Working Group WRB (International Union of Soil Sciences-World Reference Base for Soil Resources). 2015. Base referencial mundial del recurso suelo 2014. Actualización 2015 Sistema Internacional de Clasificación de Suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos 106. FAO, Roma. ISBN: 978-92-5-308369-5.

Khan, A., G. Lu, M. Ayaz, H. Zhang, R. Wang, F. Lv, X. Yang, B. Sun, and S. Zhang. 2018. Phosphorus efficiency, soil phosphorus dynamics and critical phosphorus level under

- long-term fertilization for single and double cropping system. *Agric. Ecosyst. Environ.* 256: 1-11. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.01.006>.
- Legesse, H., N. Dechassa, S. Gebeyehu, G. Bultosa, and F. Mekbib. 2017. Yield and leaf nutrient concentrations of common bean genotypes as influenced by aluminium toxicity under acidic soils. *J. Biosci. Agric. Res.* 12: 1003-1015. doi: <https://doi.org/10.18801/jbar.120117.122>.
- Li, P., T. Zhang, X. Wang, and D. Yu. 2013. Development of biological soil quality indicator system for subtropical China. *Soil Tillage Res.* 126: 112-118. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.07.011>.
- Liu, K., T. Han, J. Huang, A. Asad, D. Li, X. Yu, Q. Huang, H. Ye, H. Hu, Z. Hu, and H. Zhang. 2020. Links between potassium of soil aggregates and pH levels in acidic soils under long-term fertilization regimes. *Soil Tillage Res.* 197: 104480. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104480>.
- Omara, P., L. Aula, and W. R. Raun. 2019. Nitrogen uptake efficiency and total soil nitrogen accumulation in long-term beef manure and inorganic fertilizer application. *Int. J. Agron.* 2019: 1-6. doi: <https://doi.org/10.1155/2019/9594369>.
- Parra-González, S. D. and J. Rodríguez-Valenzuela. 2017. Determination of the soil quality index by principal component analysis in Cocoa Agroforestry System in the Orinoco Region, Colombia. *J. Agric. Ecol. Res. Int.* 10: 1-8. doi: <https://doi.org/10.9734/JAERI/2017/31346>.
- Qi, Y., J. L. Darilek, B. Huang, Y. Zhao, W. Sun, and Z. Gu. 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma* 149: 325-334. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.12.015>.
- Richards, L. A. 1990. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. *Manual de agricultura*, 60. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Laboratorio de Salinidad. Limusa, México, D. F.
- Rinklebe, J., C. Franke, and H.-U. Neue. 2007. Aggregation of floodplain soils based classification principles to predict concentrations of nutrients and pollutants. *Geoderma* 141: 210-223. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.06.001>.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (antes NOM-021-RECNAT- 2000) que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*, 31 diciembre de 2002. México, D. F.
- Shainberg, I., G. J. Levy, D. Goldstein, A. I. Mamedov, and J. Letey. 2001. Prewetting rate and sodicity effects on the hydraulic conductivity of soils. *Austr. J. Soil Res.* 39: 1279-1291. doi: <https://doi.org/10.1071/SR00052>.
- Singh, M., I. B. Singh, and G. Müller. 2007. Sediment characteristics and transportation dynamics of the Ganga River. *Geomorphology* 86: 144-175. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.08.011>.
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). 2020. Base de datos climatológica nacional (sistema CLICOM). <http://clicom-mex.cicese.mx/> (Consulta: marzo 11, 2020).
- Sun, B., S. Zhou, and Q. Zhao. 2003. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China. *Geoderma* 115: 85-99. doi: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00078-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00078-8).
- Zhang, H., M. Xu, W. Zhang, and X. He. 2009. Factors affecting potassium fixation in seven soils under 15-year long-term fertilization. *Chin. Sci. Bull.* 54: 1773-1780. doi: <https://doi.org/10.1007/s11434-009-0164-9>.
- Zhu, Y., A. Ali, A. Dang, A. P. Wandel, and J. McL. Bennett. 2019. Re-examining the flocculating power of sodium, potassium, magnesium and calcium for a broad range of soils. *Geoderma* 352: 422-428. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.041>.