

METALES PESADOS EN SUELOS CULTIVADOS CON CAÑA DE AZÚCAR EN LA CHONTALPA TABASCO

Heavy metals in soils cultivated with sugar cane in the Chontalpa, Tabasco

A de la Cruz-Pons, J Zavala-Cruz ✉, A Guerrero-Peña, S Salgado-García, LC Lagunes-Espinoza, F Gavi-Reyes

(ACP)(JZC)(AGP)(SSG)(LCGE) Programa de Producción Agroalimentaria en el Trópico PROPAT Colegio de Postgraduados Campus Tabasco Periférico Carlos A. Molina S/N Carretera Cárdenas-Huimanguillo Cárdenas 86570 Tabasco, México, LPI-1: RN y Grupo MASCAÑA-LPI-2: AES:cruzpons@colpos.mx , zavala_cruz@colpos.mx
(FGR) Profesor Investigador Adjunto. Departamento de edafología e hidrociencias. Colegio de Postgraduados Campus Montecillos Carretera México-Texcoco km 36.5 Montecillos 56230 Estado de México, México

Artículo recibido: 27 de noviembre de 2008, **aceptado:** 21 de mayo de 2012

RESUMEN. Los metales pesados aportados al ambiente por las industrias pueden afectar el desarrollo del cultivo de caña de azúcar. Con el propósito de conocer los niveles actuales de metales pesados (Pb, Ni, V, Cd, Fe, Zn, Cu y Mn) se cuantificó su forma total y extractable en el suelo y total en hoja de caña de azúcar (*Saccharum spp.*), en áreas cañeras del Ingenio Presidente Benito Juárez (IPBJ) y batería de separación de hidrocarburos Cárdenas (BSH). El muestreo se realizó en suelos Vertisoles y Fluvisoles, y en plantas de caña de azúcar; a partir de cada industria, para cada suelo se seleccionó un transecto en dirección suroeste, con tres distancias de muestreo (0.6, 3 y 6 km), y en cada distancia se tomaron muestras compuestas de suelo con 3 repeticiones, a 0-20 cm de profundidad. Los contenidos de metales en suelo y planta se determinaron con espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS, por sus siglas en inglés). Los contenidos de los metales totales en los dos suelos fueron bajos, Pb < 0.6 mg kg⁻¹, Ni de 3.6 a 7.5 mg kg⁻¹, V de 2.5 a 4.2 mg kg⁻¹, Fe de 519.3 a 607.6 mg kg⁻¹, Cu de 1.3 a 4.5 mg kg⁻¹, Zn de 3.5 a 6 mg kg⁻¹ y Mn de 13.9 a 35 mg kg⁻¹; no se detectó Cd. Las formas extractables presentaron contenidos similares a los reportados para suelos en Pb y Ni; y los de Fe, Cu, Mn y Zn indican concentraciones adecuadas a marginales en suelos; no se detectó V y Cd. En las hojas de caña de azúcar los contenidos de Pb, Ni y Cd variaron entre 0.8 y no detectables, y los de Fe, Cu, Zn y Mn indican deficiencia nutrimental.

Palabras clave: Metales pesados, suelos, caña de azúcar.

ABSTRACT. Heavy metals contributed to the environment by industries may affect the development of sugar cane crops. In order to determine the current levels of heavy metals (Pb, Ni, V, Cd, Fe, Zn, Cu and Mn), the total and extractable forms were quantified in the soil, as well as the total form in sugar cane leaves (*Saccharum spp.*), of sugar cane areas of the Presidente Benito Juárez sugar cane Factory (IPBJ) and the hydrocarbon battery separation industry of Cardenas (HBS). Sampling took place in Vertisols and Fluvisols, and in sugar cane plants. For each industry, a southwesterly transect was selected for each soil with three sampling distances (0.6, 3 and 6 km), and composite soil samples with 3 replicates were collected at each distance at a depth of 0-20 cm. The content of metals in soils and plants was determined using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Total metal contents in the two soils were low, Pb <0.6 mg kg⁻¹, Ni from 3.6 to 7.5 mg kg⁻¹, V from 2.5 to 4.2 mg kg⁻¹, Fe from 519.3 to 607.6 mg kg⁻¹, Cu from 1.3 to 4.5 mg kg⁻¹, Zn from 3.5 to 6 mg kg⁻¹ and Mn from 13.9 to 35 mg kg⁻¹. Cd was not detected. With respect to Pb and Ni, the extractable forms presented contents similar to those reported for soils, and those of Fe, Cu, Mn and Zn indicated adequate to marginal concentrations in the soils. V and Cd were not detected. Pb, Ni and Cd content in sugar cane leaves ranged between 0.8 and undetectable, and that of Fe, Cu, Zn and Mn indicated a nutritional deficiency.

Key words: Heavy metals, soil, sugar cane.

INTRODUCCIÓN

En la zona del Plan Chontalpa, Tabasco, se encuentra el ingenio azucarero Presidente Benito Juárez (IPBJ) y un campo petrolero con una batería de separación de hidrocarburos (BSH). Ambas industrias son de gran importancia por la generación de empleos. El IPBJ cuenta con una superficie cultivada de caña de azúcar de 16500 ha, dentro de esta superficie se ubica la BSH. En el IPBJ se emiten gases y cenizas, por la quema de combustóleo y bagazo, en el proceso de producción del azúcar; en campo, previo a la cosecha de los cañaverales se realiza la quema, con la finalidad de facilitar el corte de los tallos, generando gases y cenizas; ambos procesos de campo y fábrica tiene una duración de 140 a 150 d (Salgado *et al.* 2003). Con respecto a la BSH, los desechos de separación del agua e hidrocarburos, son depositados en fosas donde son quemados, contribuyendo a la emisión de gases y cenizas; esta actividad se realiza durante todo el año. Los metales Pb, Cr, Zn, Cu, As, Ni, Cd y Hg son producto de la actividad industrial en petroquímicas, refinerías y minas (Volke *et al.* 2005), son liberados a la atmósfera durante la combustión de combustibles fósiles (Petaloti *et al.* 2006) y en las petroquímicas, aportando ambas fuentes Cd, Ni, Pb y V (Rooney *et al.* 1999, McBride 2002, Múgica *et al.* 2003). En el área cañera, se desconoce si durante los 34 años que tienen en operación estas industrias, sus emisiones han aportado metales pesados a los suelos en cantidades considerables (Porrás *et al.* 2003) y si la caña de azúcar los está absorbiendo (Serenó *et al.* 2007). En algunas investigaciones que se han realizado en caña de azúcar, metales pesados han sido cuantificados para evaluar la disponibilidad de los metales cuando se aplican lodos o aguas residuales como fuentes de fertilizantes para el cultivo de caña de azúcar (Oliveira y Mattiazzo 2001, Bertoncine *et al.* 2004, Ng Kee-Kwong *et al.* 2005, Segura *et al.* 2006). Algunos metales pesados como Fe, Zn, Cu y Ni, son esenciales para el desarrollo del cultivo de la caña de azúcar y se clasifican como micronutrientes, el cultivo los requiere en cantidades menores de 50 ppm, forman parte de los sistemas enzimáticos (Marschner 1995). El resto Pb, Cr, V, As, Cd y Hg,

están relacionados con problemas de salud como retrasos en el desarrollo, varios tipos de cáncer, daños en el riñón, e, incluso, con casos de muerte (Muchuweti *et al.* 2006). Esta investigación es pionera en México y surge de la necesidad de contar con información que demuestre que la producción de azúcar, es inocua de metales pesados; por ello, los objetivos del presente trabajo fueron cuantificar el contenido total y extractable de los metales Pb, Ni, V, Cd, Fe, Zn, Cu y Mn en suelos y la concentración total en planta, en la zona cañera del Ingenio Presidente Benito Juárez, donde se ubica la BSH.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

El área de estudio se localiza en la zona de abastecimiento de caña de azúcar del ingenio Pdte. Benito Juárez (IPBJ), la batería de separación de hidrocarburos se localiza a 11 km del IPBJ (Figura 1). Las coordenadas geográficas son 17° 56' y 18° 24' LN y 93° 17' y 94° 08' LO, su altitud sobre el nivel del mar es 10 m, y comprende parte de los municipios de Cárdenas y Huimanguillo, Tabasco. El clima es cálido húmedo con abundantes lluvias en verano (Am), la temperatura media anual es de 26.4 °C y la precipitación media anual de 1994 mm.

Diseño experimental

El diseño experimental en campo fue un factorial 2 x 2 x 3 (Dos fuentes de emisión: IPBJ y BSH; dos unidades de suelos: Vertisol y Fluvisol; y tres distancias de muestreo: 0.6, 3 y 6 km). En cada sitio de muestreo, se colectaron muestras de suelos y de plantas, con tres repeticiones.

Muestreo de suelos y plantas

El muestreo de suelos se efectuó en los grupos Vertisoles y Fluvisoles por ser los más representativos de la zona cañera (Salgado *et al.* 2008). A partir de cada industria, para cada suelo se seleccionó un transecto con dirección noreste-suroeste, por los vientos dominantes, y tres distancias de muestreo (0.6, 3 y 6 km) para determinar la dispersión de los metales a partir de la fuente (Figura 1); en cada distancia, con barrena de acero inoxidable se colectó

una muestra de suelo compuesta de 15 submuestras, a una profundidad de 0 a 20 cm (Salgado *et al.* 2006). Las submuestras se homogenizaron, se tomó 1.5 kg, se colocó en bolsas de nylon previamente identificadas y se trasladaron al laboratorio para su análisis.

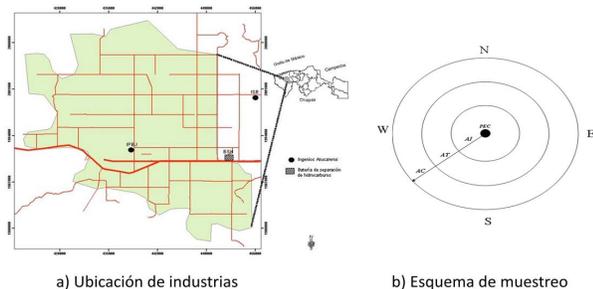


Figura 1. Ubicación de las industrias dentro del área cultivada con caña de azúcar y el transecto para el muestreo de suelo y planta a partir de la fuente emisora de contaminantes, considerando tres distancias de concentración de metales (PEC: Punto de emisión del contaminante, AI: área industrial, AT: área de transición, AC: área control), en función de la dominancia de los vientos).

Figure 1. Location of the industries in the area cultivated with sugar cane and the transect for soil and plant sampling starting at the pollution source, considering three distances of metal concentrations (PEC: point of pollution source, AI: industrial area, AT: transition area, AC: control area, with respect to the winds).

En los mismos sitios de muestreo de suelos, se colectaron muestras compuestas foliares a los 4 meses de desarrollo del cultivo de caña, se colectaron 15 submuestras de las hojas 3 a la 5, en un recorrido en zig-zag, se eliminó la base y la punta de las hojas, y la nervadura central, los folíolos se depositaron en una bolsa de papel previamente identificada y se trasladaron al laboratorio para su análisis (Salgado *et al.* 2006).

Análisis de laboratorio

Las muestras de suelos se secaron a temperatura ambiente y fueron molidas en molino eléctrico y pasadas por tamiz (malla de 2 mm). Las propiedades del suelo analizadas para fertilidad fueron materia orgánica (MO) por el método Walkley y Black, pH con el método de relación 1:2.5 (suelo:agua); conductividad eléctrica (CE) por el método

de medición en el extracto de saturación, capacidad de intercambio catiónico (CIC) por el método del acetato de amonio y textura por el método de Bouyoucos (SEMARNAT 2001). Los metales pesados se cuantificaron en sus formas totales, mediante el método de digestión con $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ (Allan 1971) y formas extractables utilizando el método del ácido dietilen-penta-acético (DTPA), con base en el método AS-14 de la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT 2001).

Las muestras de planta fueron lavadas con HCl al 2% y agua destilada, secadas en estufa a 70-72 °C durante 48 h, molidas con molino eléctrico tipo Wiley y tamizadas con malla de 0.5 mm y procesadas por el método de digestión con $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ para contenidos totales de metales pesados (Allan 1971).

La cuantificación de los metales totales y extractables en suelos, y totales en planta se hizo con la técnica de espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS) por sus siglas en inglés (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry), que es una variante de las técnicas de análisis por espectrometría de masas.

Análisis de datos

El análisis estadístico de los datos consistió en el análisis del factorial 2x2x3 y la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$), y correlaciones de Pearson (significativa a niveles 0.01 y 0.05). Se utilizaron los programas estadísticos SAS (Rebolledo 1999) y SPSS 15.0 para Windows (Darrren & Mallery 2000).

RESULTADOS

Análisis de fertilidad

La zona de abastecimiento de caña de azúcar en el IPBJ tiene dos suelos dominantes: Vertisoles y Fluvisoles (Salgado *et al.* 2008). En la capa de 0 a 20 cm de profundidad, los Vertisoles presentan un contenido medio de MO (2.3 a 3.0%), pH ligeramente ácido (5.1 a 6.4), CE (0.01 a 0.05 dS m⁻¹) que no representa problema de salinidad, CIC de baja a mediana fertilidad (18.4 a 29.0 Cmol(+)kg⁻¹) y textura migajón-arenosa; los porcentajes de arcilla

Tabla 1. Contenidos medios de metales totales por fuente de emisión, suelo y distancias.
Table 1. Average contents of heavy metals, by pollution source, soil and distances.

Fuentes de emisión	Suelos	Distancias (km)	Metales totales (mg kg ⁻¹)							
			Pb	Ni	V	Cd	Fe	Cu	Zn	Mn
IPBJ	Vertisol	0.6	0.46 a†	5.64 a	3.29 a	nd	526.9 a	4.47 a	4.61 a	19.03 a
		3.0	0.34 a	4.98 a	3.06 a	nd	532.9 a	2.47 b	4.15a	18.59 a
		6.0	0.45 a	5.80 a	3.46 a	nd	564.8 a	1.92 b	5.02 a	18.45 a
	Fluvisol	0.6	0.29 a	3.32 b	2.49 a	nd	519.2 a	1.29 b	3.47 a	13.92 b
		3.0	0.53 a	5.38 a	3.50 a	nd	572.7 a	1.66 ab	4.26 a	34.97 a
		6.0	0.35 a	4.85 a	3.09 a	nd	540.6 a	1.77 a	4.20 a	18.47 b
BSH	Vertisol	0.6	0.32 b	3.58 b	3.10 b	nd	556.8 c	1.36 b	4.07 b	27.60 ab
		3.0	0.53 a	6.93 a	4.17 a	nd	596.1 b	2.28 a	5.97 a	17.19 b
		6.0	0.58 a	7.51 a	4.18 a	nd	607.6 a	1.92 ab	5.55 a	30.84 a
	Fluvisol	0.6	0.32 b	3.58 b	3.10 b	nd	556.8 c	1.36 b	4.07 b	27.59 ab
		3.0	0.53 a	6.93 a	4.17 a	nd	596.1 b	2.27 a	5.97 a	17.18 b
		6.0	0.58 a	7.51 a	4.18 a	nd	607.6 a	1.92 ab	5.55 a	30.84 a
		CV(%)	23	15	9.4	-	3.2	20.6	12.0	19.5
		Media	0.43	5.3	3.4	-	566.1	2.0	4.7	24.0
		Prob. F Para:								
		Fuente (F)	0.14 ns	0.01**	0.01**	-	0.01**	0.01**	0.01**	0.01**
		Suelo (S)	0.14 ns	0.01**	0.25 ns	-	0.52 ns	0.01**	0.09 ns	0.01**
		Distancia (D)	0.01**	0.01**	0.01**	-	0.01**	0.33 ns	0.01**	0.05*
		Int. F*S	0.62 ns	0.54 ns	0.34 ns	-	0.83 ns	0.01**	0.14 ns	0.78 ns
		Int. F*D	0.05*	0.01**	0.17 ns	-	0.67 ns	0.01**	0.05*	0.01**
		Int. S*D	0.22*	0.84 ns	0.37 ns	-	0.13 ns	0.01**	0.94 ns	0.01**
		Int. F*S*D	0.05*	0.01**	0.01**	-	0.05 *	0.01**	0.05*	0.85 ns
		DSH	0.07	0.55	0.22	-	12.5	0.28	0.39	3.2
		Límites de metales totales (USEPA, 1993) (mg kg ⁻¹)	300	420	50- 100 ¹	39	10000- 300000 ²	1500	2800	1500- 3000 ³

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juárez; BSH = Batería de Separación de Hidrocarburos; nd = No detectado

† Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tukey ($p \leq 0.05$)

¹ Alloway, 1990, ² Kabata-Pendias & Pendias (2008), ³ Ross(1994).

varían de 12 a 40 y los de arena de 37 a 55. Los Fluvisoles se caracterizan por presentar un contenido de pobre a medio de MO (1.6 a 2.8%), pH ligeramente ácido (5.5 a 6.3), CE (0.01 a 0.04 dS m⁻¹) que no indica problema de salinidad, CIC de baja a mediana fertilidad (15.6 a 27.0 Cmol(+) kg^{-1}) y textura franca; el porcentaje de arcilla varía de 18 a 34 y el de arena de 40 a 54. Ambos suelos, presentan menor fertilidad que los suelos cultivados con caña del ingenio Santa Rosalía (Salgado *et al.* 2005).

Metales totales en suelos

No se detectó Cd en los suelos del IPBJ y la BSH. Los totales de Pb, Ni, V, Fe, Mn, Cu y Zn en suelos cultivados con caña de azúcar se consideran normales al no rebasar los límites tóxicos estableci-

dos (Kabata-Pendias & Pendias 2008, Ross 1994, USEPA 1993) (Tabla 1).

En los transectos del IPBJ los contenidos de Pb, V, Fe y Zn fueron iguales estadísticamente en las diferentes distancias, tanto en Vertisoles como en Fluvisoles (Tabla 1). En los transectos de la BSH, en ambos suelos, se observa diferencias estadísticas en las concentraciones de Pb, Ni, V, Fe, Cu, Zn y Mn, siendo mayores en las distancias de 3 y 6 km con respecto a la distancia de 0.6 km; excepto el Mn que presentó la menor concentración en la distancia de 3.0 km (Tabla 1). La concentración de hierro total en la BSH se incrementó significativamente a medida que aumentó la distancia.

Tabla 2. Contenidos medios de metales extractables por fuente de emisión, suelo y distancias.
Table 2. Average contents of extractable metals, by pollution source, soil and distances.

Fuentes de emisión	Suelos	Distancias (km)	Metales extractables (mg kg ⁻¹)							
			Pb	Ni	V	Cd	Fe	Cu	Zn	Mn
IPBJ	Vertisol	0.6	0.48 a†	3.09 a	nd	nd	52.7 a	2.18 a	0.73 b	14.53 a
		3.0	0.45 a	3.13 a	nd	nd	46.6 a	1.75 a	0.66 b	15.11 a
		6.0	0.52 a	3.48 a	nd	nd	48.3 a	2.05 a	0.87 a	16.69 a
	Fluvisol	0.6	0.55 a	2.28 a	nd	nd	112.2 a	1.20 a	0.77 a	9.09 a
		3.0	0.35 b	3.54 a	nd	nd	45.4 b	1.26 a	0.68 a	27.88 a
		6.0	0.48 ab	3.22 a	nd	nd	61.2 b	1.78 a	0.71 a	14.33 a
	Vertisol	0.6	0.44 b	2.52 b	nd	nd	62.2 a	0.99 b	0.85 a	21.88 a
		3.0	0.63 a	3.38 b	nd	nd	67.6 a	2.45 a	0.71 a	10.61 a
		6.0	0.50 b	5.03 a	nd	nd	65.0 a	1.75 ab	0.85 a	22.61 a
BSH	Fluvisol	0.6	0.44 b	2.52 b	nd	nd	62.2 a	0.98 b	0.85 a	21.88 a
		3.0	0.63 a	3.37 b	nd	nd	67.5 a	2.45 a	0.71 a	10.60 a
		6.0	0.42 b	5.03 a	nd	nd	65.0 a	1.71 ab	0.85 a	22.60 a
		CV(%)	16.8	17	-	-	13.2	22.6	16	34.8
		Media	0.46	3.2	-	-	63.0	1.69	0.80	18.7
		Prob. F Para:								
		Fuente (F)	0.67 ns	0.05*	-	-	0.18 ns	0.97 ns	0.01**	0.05*
		Suelo (S)	0.01**	0.23 ns	-	-	0.01**	0.05*	0.18 ns	0.11 ns
		Distancia (D)	0.14 ns	0.01**	-	-	0.01**	0.01**	0.18 ns	0.33 ns
		Int. F*S	0.05*	0.99 ns	-	-	0.01**	0.05*	0.05*	0.37 ns
		Int. F*D	0.01**	0.01**	-	-	0.01**	0.01**	0.01**	0.05*
		Int. S*D	0.01**	0.80 ns	-	-	0.01**	0.25 ns	0.01**	0.01**
		Int. F*S*D	0.01**	0.11 ns	-	-	0.01**	0.14 ns	0.01**	0.92 ns
		DSH	0.05	0.38	-	-	5.7	0.26	0.08	4.5
		Límites normales de metales pesados extractables (SEMARNAT, 2001) (mg kg ⁻¹)	35	50	10 ¹	2-3	> 4.5	> 2,0	> 1.0	> 1.0

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juárez, BSH = Bateria de Separación de Hidrocarburos, nd = No detectado

† Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tukey ($p \leq 0.05$)

¹ Kabata-Pendias & Pendias (2008).

Metales extractables en suelos

Los metales extractables V y Cd no se detectaron en los suelos de las dos industrias (Tabla 2), las concentraciones de Pb y Ni, se clasificaron como normales al ser menores que los 35 y 50 mg kg⁻¹ de Pb y Ni, considerados como adecuados para los suelos en México (SEMARNAT 2001). Las concentraciones de Fe y Mn, se encuentran en cantidades que superan los niveles adecuados y las de Cu y Zn, se clasificaron como deficitarios en los suelos, lo cual coincide con lo reportado por Salgado *et al.* (2008).

En los transectos del IPBJ, se observa que las concentraciones de Pb, Ni, Fe, Cu y Mn, fueron iguales estadísticamente con respecto a la distancia de emisión. El Zn se incrementó significativamente en la distancia de 6 km, pero su nivel es deficitario.

En el suelo Fluvisol las concentraciones de Ni, Cu, Zn y Mn, fueron iguales estadísticamente con respecto a la distancia de emisión. La concentración de Hierro tendió a reducirse conforme aumentó la distancia del punto de emisión. El Pb tuvo un comportamiento irregular.

En los transectos de la BSH, se observó que las concentraciones de Pb y Cu en la distancia de 3 km fueron significativamente mayores que las encontradas en las distancias de 0.6 y 6 km, en ambos tipos de suelos (Tabla 2). El contenido de Ni en ambos suelos se incrementó según aumentó la distancia del punto de emisión. Zn y Mn en ambos suelos tuvieron una concentración igual estadísticamente respecto a las distancias.

Tabla 3. Correlación entre metales totales y extractables en suelos Vertisoles del IPBJ.
Table 3. Correlation between total and extractable metals in Vertisoles of the IPBJ.

Metales	Fe _t	Cu _t	Zn _t	Mn _t	Pb _t	Ni _t	V _t	Fe _e	Cu _e	Zn _e	Mn _e	Pb _e	Ni _e
Fe _t	1.00	-0.62	0.82	0.62	0.68	0.74*	0.81**	-0.47	0.21	0.22	0.44	0.56	0.48
Cu _t		1.00	-0.11	-0.06	0.15	0.03	-0.07	0.5	0.53	-0.21	-0.17	-0.03	-0.19
Zn _t			1.00	0.76*	0.94**	0.96**	0.96**	-0.19	0.67*	0.32	0.55	0.68*	0.54
Mn _t				1.00	0.79**	0.81**	0.81**	-0.32	0.45	0.14	0.69*	0.34	0.46
Pb _t					1.00	0.97**	0.94**	-0.25	0.68*	0.11	0.41	0.56	0.37
Ni _t						1.00	0.98**	-0.25	0.71*	0.1	0.46	0.58**	0.41
V _t							1.00	-0.24	0.66*	0.19	0.52	0.63	0.48
Fe _e								1.00	0.41	0.07	0.28	0.40	0.46
Cu _e									1.00	0.15	0.4	0.64	0.45
Zn _e										1.00	0.35	0.07	0.22
Mn _e											1.00	0.56	0.89**
Pb _e												1.00	0.84**
Ni _e													1.00

*Correlación significativa al 0.05, _t = total

**Correlación altamente significativa al 0.01, _e = extractable

Tabla 4. Correlación entre metales totales y extractables en suelos Fluvisoles del IPBJ.
Table 4. Correlation between total and extractable metals in Fluvisoles of the IPBJ.

Metales	Fe _t	Cu _t	Zn _t	Mn _t	Pb _t	Ni _t	V _t	Fe _e	Cu _e	Zn _e	Mn _e	Pb _e	Ni _e
Fe _t	1.00	0.81**	0.90**	0.79**	0.82**	0.95**	0.81**	-0.53	0.45	0.05	0.70*	-0.111	0.80**
Cu _t		1.00	0.91**	0.52	0.53	0.92**	0.75*	-0.56	0.76*	0.07	0.48	0.01	0.80**
Zn _t			1.00	0.56	0.67*	0.91**	0.63	-0.41	0.74*	0.17	0.54	0.15	0.80**
Mn _t				1.00	0.76*	.76*	0.82**	-0.71*	0.13	0.02	0.90**	-0.494	0.74*
Pb _t					1.00	0.75*	0.72*	-0.54	0.38	0.16	0.76*	-0.192	0.78**
Ni _t						1.00	0.85**	-0.70	0.57	-0.01	0.70*	-0.188	0.87**
V _t							1.00	-0.71	0.37	0.08	0.74	-0.375	0.82**
Fe _e								1.00	-0.18	0.29	-0.71*	0.71*	-0.67*
Cu _e									1.00	0.53	0.29	0.44	0.70*
Zn _e										1.00	0.30	0.50	0.40
Mn _e											1.00	-0.39	0.85**
Pb _e												1.00	-0.16
Ni _e													1.00

*Correlación significativa al 0.05, _t = total

**Correlación altamente significativa al 0.01, _e = extractable

Correlación de metales totales y extractables en suelo

Los metales extractables Fe, Zn, Pb y V no se correlacionaron con su concentración en sus formas totales, excepto el Pb en el Fluvisol de la BSH (Tablas 3, 4, 5 y 6). Los metales extractables que mostraron correlación con los metales totales fueron Mn en los suelos de las dos industrias. Cu y Ni, se correlacionaron únicamente en los suelos Fluvisol del IPBJ y en ambos suelos de la BSH (Tablas 4 y 6).

Metales totales en planta

No se detectó Cd en hoja (Tabla 7), lo cual fue consistente con las concentraciones observadas en ambos tipos de suelo (Tablas 1 y 2), los contenidos de metales totales Ni, Fe, Cu, Zn y Mn se clasificaron como bajos con respecto a los rangos considerados como adecuados, ya que estos micronutrientes son esenciales para desarrollo del cultivo de caña de azúcar (Jones *et al.* 1991).

En el caso de Pb y V, son bajos comparados con los límites reportados para este cultivo (Tabla

Tabla 5. Correlación entre metales totales y extractables en suelos Vertisoles de la BSH.
Table 5. Correlation between total and extractable metals in Vertisoles of the BSH.

Metales	Fe _t	Cu _t	Zn _t	Mn _t	Pb _t	Ni _t	V _t	Fe _e	Cu _e	Zn _e	Mn _e	Pb _e	Ni _e
Fe _t	1.00	0.75*	0.84**	-0.03	0.97**	0.97**	0.91**	0.37	0.70*	-0.17	-0.13	0.48	0.81**
Cu _t		1.00	0.98**	-0.5	0.77*	0.82**	0.89**	0.16	0.95**	-0.37	-0.53	0.88**	0.36
Zn _t			1.00	-0.40	0.84	0.90**	0.92**	0.17	0.92**	-0.32	-0.47	0.85**	0.49
Mn _t				1.00	-0.06	-0.17	-0.21	-0.05	-0.59	0.56	0.93**	-0.65	0.35
Pb _t					1.00	0.95**	0.88**	0.31	0.70*	-0.15	-0.16	0.50	0.72*
Ni _t						1.00	0.92**	0.26	0.78**	-0.15	-0.3	0.58	0.77**
V _t							1.00	0.15	0.82**	-0.33	-0.29	0.61	0.65
Fe _e								1.00	0.39	0.13	0.17	0.15	0.36
Cu _e									1.00	-0.33	-0.55	0.86**	0.37
Zn _e										1.00	0.58	-0.45	0.29
Mn _e											1.00	-0.64	0.23
Pb _e												1.00	0.01
Ni _e													1.00

*Correlación significativa al 0.05
**Correlación significativa al 0.01

Tabla 6. Correlación entre metales totales y extractables en suelos Fluvisoles de la BSH.
Table 6. Correlation between total and extractable metals in Fluvisoles of the BSH.

Metales	Fe _t	Cu _t	Zn _t	Mn _t	Pb _t	Ni _t	V _t	Fe _e	Cu _e	Zn _e	Mn _e	Pb _e	Ni _e
Fe _t	1.00	0.76	0.97**	0.19	0.95**	0.93**	0.79*	0.48	0.79**	0.10	-0.04	0.82**	0.74*
Cu _t		1.00	0.84*	0.27	0.86*	0.82**	0.83**	0.327	0.92**	0.62	0.09	0.57	0.42
Zn _t			1.00	0.25	0.98**	0.95**	0.84**	0.56	0.82**	0.24	0.04	0.87**	0.76*
Mn _t				1.00	0.25	0.15	0.42	0.13	0.15	0.57	0.81**	-0.04	0.44
Pb _t					1.00	0.95**	0.86**	0.39	0.84*	0.27	0.03	0.83	0.71*
Ni _t						1.00	0.73*	0.47	0.89**	0.17	0.10	0.85**	0.73*
V _t							1.00	0.39	0.65	0.57	0.06	0.63	0.44
Fe _e								1.00	0.23	0.11	0.11	0.65	0.55
Cu _e									1.00	0.37	0.12	0.56	0.50
Zn _e										1.00	0.41	-0.02	-0.06
Mn _e											1.00	-0.09	0.37
Pb _e												1.00	0.73*
Ni _e													1.00

*Correlación significativa al 0.05, _t = total
**Correlación altamente significativa al 0.01, _e = extractable

7). Las concentraciones foliares de los metales pesados fueron iguales estadísticamente en las diferentes distancias de la fuente emisión. Con excepción del Mn que presentó significativamente mayor concentración en la distancia de 6 km, en ambos suelos de la BSH.

Correlación de metales extractables en suelo y metales totales en planta

No se observó correlación entre los metales totales Fe, Cu, Mn, Ni y V en plantas y los metales

extractables de la solución del suelo, tanto en Vertisoles como en Fluvisoles de las dos industrias (datos no presentados). No obstante del bajo contenido de estos metales en el suelo, el cultivo de caña, por lo extenso de su sistema radicular los extrae pero en cantidades insuficientes a los reportados como rangos adecuados para la nutrición de este cultivo (Tabla 7).

Tabla 7. Contenidos medios de metales totales en hoja de caña de azúcar por fuente de emisión, suelo y distancias.
Table 7. Average contents of total metals in sugar cane leaves by pollution source, soil and distances.

Fuentes de emisión	Suelos	Distancias (km)	Metales extractables (mg kg ⁻¹)								
			Pb	Ni	V	Cd	Fe	Cu	Zn	Mn	
IPBJ	Vertisol	0.6	0.01	0.08 a†	0.03 a	nd	17.03 a	0.22 a	0.61 a	2.37 a	
		3.0	nd	0.04 a	0.03 a	nd	25.08 a	0.11 a	0.61 a	2.70 a	
		6.0	nd	0.05 a	0.04 a	nd	23.73 a	0.11 a	0.40 a	2.27 a	
	Fluvisol	0.6	nd	nd	nd	nd	13.68 a	0.08 a	0.34 a	0.77 a	
		3.0	nd	nd	0.01 a	nd	8.52 a	0.09 a	0.23 a	1.17 a	
		6.0	nd	0.07	0.03 a	nd	21.54 a	0.09 a	0.31 a	1.22 a	
BSH	Vertisol	0.6	nd	nd	0.02 a	nd	6.47 a	0.11 a	0.29 a	0.92 b	
		3.0	0.03	0.04	0.05 a	nd	8.92 a	0.08 a	0.23 a	0.70 b	
		6.0	nd	nd	0.004 a	nd	7.42 a	0.11 a	0.42 a	2.84 a	
	Fluvisol	0.6	nd	nd	0.02 a	nd	6.45 a	0.11 a	0.29 a	0.92 b	
		3.0	0.03	0.03	0.05 a	nd	8.91 a	0.08 a	0.23 a	0.70 b	
		6.0	nd	nd	0.004 a	nd	7.42 a	0.11 a	0.42 a	2.84 a	
			CV(%)	-	-	-	-	126	56	51	59
			Media	-	-	-	-	13	0.12	0.51	2.0
		Prob. F Para:	Fuente (F)	-	-	-	-	0.06 ns	0.77 ns	0.05*	0.21 ns
		Suelo (S)	-	-	-	-	0.52 ns	0.81 ns	0.05*	0.84 ns	
		Distancia (D)	-	-	-	-	0.85 ns	0.13 ns	0.23 ns	0.44 ns	
		Int. F*S	-	-	-	-	0.48 ns	0.05*	0.01**	0.01**	
		Int. F*D	-	-	-	-	0.84 ns	0.98 ns	0.71 ns	0.28 ns	
		Int. S*D	-	-	-	-	0.77 ns	0.79 ns	0.30 ns	0.67 ns	
		Int. F*S*D	-	-	-	-	0.89 ns	0.14 ns	0.34 ns	0.37 ns	
		DSH	-	-	-	-	11.3	0.04	0.18	0.82	
	Rangos de concentración de metales hojas 3-5 de caña		17.0 ¹	2.3 ¹	5-10 ²	0.59 ³	40-250	5-30	20-100	25-400	

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juárez, BSH = Bateria de Separación de Hidrocarburos

* Significativo, ** Altamente significativo, nd = No detectado

† Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tukey ($p \leq 0.05$)

¹ Camilloti et al. (2007), ² Kabata-Pendias & Pendias (2008), ³ Raymet et al. (2002).

DISCUSION

Metales totales en suelos

El Cd, no fue detectado en los suelos Vertisoles y Fluvisoles (Tabla 1), su ausencia se debe al proceso de formación de los suelos del Plan Chontalpa, Tabasco. Estos fueron formados por procesos de erosión de los suelos de la sierra de Chiapas y su posterior sedimentación en la planicie aluvial (Palma et al. 2007) y porque las emisiones del IPBJ y BSH, no aportan Cd en cantidades apreciables en sus emisiones de Gas y Cenizas.

El hecho de que las concentraciones totales de Pb, V, Fe y Zn, se consideren como normales al estar por debajo de los niveles tóxicos (Ross 1994, USEPA 1993, SEMARNAT 2001) y que las con-

centraciones en los suelos del IPBJ fueran iguales estadísticamente (Tabla 1), es indicativo de que no existe un aporte importante de estos contaminantes por parte del IPBJ. Las variaciones en los niveles de Pb, V, Fe y Zn se atribuye a la génesis del suelo (Kabata-Pendias & Pendias 2008). En estudios realizados en derrames de hidrocarburos, se ha observado un incremento en la concentración de los metales Ni, Cu, Zn, Pb y V con 67.6, 24.7, 44.5, 18.4 y 82.7 mg kg⁻¹ de suelo, respectivamente, que superan los límites críticos de la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT 2001, Zavala et al. 2003, Siebe et al. 2005).

La tendencia de mayor concentración de Pb, Ni, V, Fe y Zn en los Fluvisoles y Vertisoles de la

BSH, en las distancias de 3 y 6 km, posiblemente se debe a la deposición por la vía atmosférica; V, Ni, Cu, Pb y Zn, son volatilizados durante la combustión, y bajo enfriamiento estos metales se condensan sobre el suelo en partículas de cenizas; el Fe y Mn son metales no volátiles en la combustión pero están unidos a la matriz de partículas de cenizas (Ross 1994, Múgica *et al.* 2003, Porras *et al.* 2003). En este caso, se deben a la quema hidrocarburos, como lo reportan Doménech (2000) y Petaloti *et al.* (2006), ya que esta instalación petrolera ha quemado gas continuamente por muchos años. Los vientos dominantes del noreste a suroeste contribuyen a dispersar las cenizas hacia los suelos situados entre 3 y 6 km al ser parte de la zona de deposición de los contaminantes.

El Cu y el Mn siguen tendencias similares de acumulación en las distancias de 3 a 6 km en los suelos de las dos industrias, pero la fuente puede deberse a la aplicación de fertilizantes inorgánicos al suelo (Ross 1994, Bertoncine *et al.* 2004, Volke *et al.* 2005), durante el manejo del cultivo de caña de azúcar y de cultivos aledaños como el cacao que es fertilizado con sulfato de cobre; con frecuencia, extensas superficies de ambos cultivos se encuentran en los mismos suelos.

Metales extractables en suelos

La ausencia de V y Cd en su forma extractable, indica que no están disponibles para el cultivo de la caña de azúcar. El V es inmovilizado en los suelos Fluvisoles y Vertisoles, por su pH ligeramente ácido al formar complejos con la materia orgánica, Fe y arcillas (Haluschak *et al.* 1998).

La concentración de Pb extractable, no representa riesgo de contaminación, ya que las concentraciones en el suelo son bajas. El Pb es el menos móvil de los metales en el suelo, se acumula en la superficie; el pH ligeramente ácido favorece su disponibilidad, pero en este caso es limitada. No obstante, que numerosos estudios indican que el Pb es un constituyente de las cenizas volantes. La concentración en estas cenizas es de 2 a 3 veces menor que las cenizas que se quedan en calderas (Múgica *et al.* 2003, Porras *et al.* 2003); tal vez, por esto es que no se hayan acumulado en los suelos.

Las concentraciones de los micronutrientos Ni y Zn extractables (Tabla 2), son deficientes en los suelos. A pesar de que el pH ligeramente ácido, la presencia de Fe y Mn, favorecen la disponibilidad del Nikel, el cual es tomado por las plantas como Ni^{2+} . Con respecto al Zn su solubilidad es reducida por el pH ligeramente ácido, la presencia de arcilla y de materia orgánica. Por lo tanto, Ni y Zn, se deben aplicar para satisfacer las necesidades del cultivo de la caña de azúcar, estos resultados coinciden con lo reportado por Salgado *et al.* (2008); estos autores recomiendan aplicar 10 kg ha^{-1} de sulfato de zinc; o bien, utilizar el superfosfato triple como fuente de P para fertilizar el cultivo de caña, ya que contiene B, Zn, Cu y Ni en cantidades apreciables (Charter *et al.* 1995).

Las concentraciones de Fe y Mn, superan a los niveles establecidos como adecuados para los suelos (Tabla 2). El pH ligeramente ácido y las condiciones de exceso de humedad en los Fluvisoles y Vertisoles, favorece la solubilidad de estos dos micronutrientos, los cuales son tomados por las plantas como Fe^{2+} y Mn^{2+} ; su contenido similar estadísticamente en el suelo, supone que no existe relación entre las fuentes de emisión y las distancias de muestreo; y que las diferencias numéricas entre sitios pueden atribuirse a la génesis del suelo y al manejo. No existe un reporte sobre toxicidad por Fe y Mn en el cultivo de caña de azúcar (Anderson & Bowen 1994).

Correlación de metales totales y extractables en suelo

La falta de correlación entre los metales extractables Fe, Zn, Pb y V, y los metales totales indica que las propiedades de los suelos Fluvisoles y Vertisoles como pH, arcilla, materia orgánica y condiciones de reducción, favorecen o reducen la solubilidad de estos metales. La solubilidad de Ni, Cu y Mn, es deseable desde el punto de vista de la nutrición del cultivo de caña, ya que son micronutrientos esenciales para este cultivo.

Metales totales en plantas

Los metales Pb, Ni, V y Cd, no están presentes en las hojas de caña de azúcar, según el diagnós-

tico foliar realizado a los cuatro meses de desarrollo del cultivo. Lo cual confirma que las actividades del IPBJ y la BSH, no contribuyen a la contaminación con estos metales, lo anterior coincide con lo reportado por Camilotti *et al.* (2007), y difieren de Rayment *et al.* (2002), quienes encontraron que la paja de caña (hojas verdes y secas, y puntas) aportan a la superficie del suelo alrededor de 0.2 g de Cd y 110 g de Zn, después de la cosecha de caña. Lo anterior, confirma que los metales cuando están presentes en el suelo pueden ser tomados por el cultivo de caña, pero en cantidades menores a los límites tóxicos. El cultivo de caña de azúcar absorbe los metales pesados en el siguiente orden raíces>tallos>hojas (Segura *et al.* 2006), este mecanismo reduce el riesgo de contaminación del azúcar. En jugo de caña se encontró Cd, Cr y Ni en concentraciones menores de 0.02 mg kg⁻¹ (Oliveira & Mattiazzo 2001).

Los contenidos de Mn, Fe, Cu y Zn en la hoja indican estados deficitarios, ya que están por debajo de los rangos adecuados (Jones *et al.* 1991) y de las concentraciones consideradas tóxicas para planta (Alloway 1990, Ross 1994, Li *et al.* 2007). Por ello, es que se debe mejorar el programa de fertilización del IPBJ, incluyendo la adición de estos micronutrientes. Con excepción de los suelos Fluvisoles y

Vertisoles de la BSH, el contenido de Mn foliar fue significativamente mayor en la distancia de 6 km, lo cual puede deberse a los pequeños aportes de la industria petrolera a través de la emisión de gases en la atmósfera (Ross 1994, Doménech 2000).

Correlación de metales extractables en suelo y metales totales en planta

El Zn de la hoja se correlacionó positivamente con el Zn extractable en los Fluvisoles del IPBJ (datos no presentados), indicando que la primera es una variable dependiente de las formas disponibles en la solución del suelo. Los metales restantes presentes en la hoja no se correlacionaron con los metales extractables debido a que la solubilidad depende del metal y de las propiedades químicas de los suelos de estudio (Barzegar *et al.* 2005).

AGRADECIMIENTOS

Por los apoyos otorgados durante la investigación, a través del proyecto "Estudio integral de la cuenca hidrológica del río Tonalá y lagunas del Carmen y Machona", financiado por la línea de investigación 1 Manejo Sustentable de los Recursos Naturales del Colegio de Postgraduados.

LITERATURA CITADA

- Allan JE (1971) The preparation of agricultural samples for analysis by atomic absorption spectroscopy. Varian techtron, Walnut Creek, California. p. 24-32.
- Alloway BJ (1990) Heavy metals in soils. 1a edition. Halsted press John Wiley & Sons, inc. New York, E.U.A.
- Anderson DL, Bowen JE (1994) Nutrición de la caña de azúcar. Instituto de la Potasa y el Fósforo (INPOFOS). EE.UU. 40 p.
- Barzegar AR, Koochekzadeh A, Xing B, Herbert SJ (2005) Concentration Changes of Cd, Ni and Zn in sugarcane cultivated soils. *Water, Air, & Soil Pollution*, 161(1-4): 97-112.
- Bertoncini IE, Mattiazzo EM, Rossetto R (2004) Sugarcane yield and heavy metal availability in two biosolid-amended oxisols. *Journal of Plant Nutrition*. 27(7): 1243-1260.
- Camilotti F, Marques MO, Andrioli I, Da Silva AR, Tasso LC, De Nobile FO (2007) Acúmulo de metais pesados em cana-de-açúcar mediante a aplicação de lodo de esgoto e vinhaça. *Eng. Agríc.* 27(1): 284-293.
- Charter RA, Tabatabai MA, Schafer JW (1995) Arsenic, molybdenum, selenium, and tungsten contents of fertilizers and phosphate rocks. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 26: 3051-3060.
- Darren G, Mallery P (2000) SPSS for windows step by step: a simple guide and referente, 10.0 update. 3rd. ed. Statistical package for Social Sciences. Chicago, Illinois, USA.

- Doménech X (2000) *Química del suelo: el impacto de los contaminantes*. 3ª edición. Ediciones Miraguano. Departamento de química. Universidad Autónoma de Barcelona. Madrid, España. 190 p.
- Haluschak P, Eilers RG, Mills GF, Grift S (1998) Status of selected trace elements in agricultural soils of southern Manitoba. Technical Report 1998-6E Land Resource Unit, Brandon Research Centre, Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada. Technical Bulletin. 80 p.
- Jones BJ, Wolf B, Mills HA (1991) *Plant analysis handbook*. Micro-Macro Publishing, Inc. Athens, Georgia, USA. 213 p.
- Li MS, Luo YP, Su ZY (2007) Heavy metal concentrations in soils and plants accumulation in a restored manganese mineland in Guangxi, South China. *Environmental pollution*. No. 147. p. 168-175.
- Kabata-Pendias A, Pendias A (2008) *Trace elements in soils and plants*. 2nd ed. CRC Press. 365 p.
- McBride M (2002) Cadmium uptake by crops estimated from soil total Cd and pH. *Soil Science* 167 (1): 62-67.
- Marschner H (1995) *Mineral nutrition of higher plants*. Second Edition. Academic Press. San Diego CA, USA. 889 p.
- Muchuweti M, Birkett WJ, Chinyanga E, Zvauya R, Scrimshaw DM, Lester JN (2006) Heavy metals content of vegetables irrigated with mixtures of wastewater and sewage sludge in Zimbabwe: implications for human health. *Agriculture ecosystems & environment* 112: 41-48.
- Múgica V, Amador AM, Torres M, Figueroa JJ (2003) Mercurio y metales pesados en cenizas provenientes de procesos de combustión e incineración. *Revista internacional de contaminación ambiental* 19 (2): 93-100.
- Ng Kee-Kwong KF, Soobadar A, Toory V, Bholah MA (2005) Leaching of heavy metals, nitrate and organic micropollutants after application of sewage sludge to sugarcane in Mauritius. In proceedings of the XXV congress. Volumen 2. 30 January - 4 February 2005. Edited by D. M. Hogarth. Publisher by the XXV ISSCT Congreso Organising Committee. Aragua, Guatemala city, Guatemala. p. 41-45.
- Oliveira CF, Mattiazzo ME (2001) Metais pesados em latossolo tratado com lodo de esgoto e em plantas de cana-de-açúcar. *Scientia Agricola* 58 (3): 581-593.
- Palma LDJ, Cisneros DJ, Moreno CE, Rincón RJA (2007) *Suelos de Tabasco su uso y manejo sustentable*. Colegio de Postgraduados-ISPROTAB-Fundación Produce Tabasco, A.C. Villahermosa, Tabasco. 195p.
- Petaloti C, Triantafyllou A, Kouimtzi T, Samara C (2006) Trace elements in atmospheric particulate matter over a coal burning power production area of western Macedonia, Greece. *Chemosphere magazine* No. 65 p. 2233-2243.
- Porras, OA, Cuatrecatl NI, Lazcano HME (2003) Valoración de metales pesados en PST en biomasa de caña. *Fac. Ing. Qui. BUAP. Revista Enlace*. <http://quimica.ugto.mx/revista/11/metales.htm> (consultado el 11 de mayo de 2012).
- Rayment GE, Jeffrey AJ, Glenn A, Barry GA (2002) Heavy metals in Australian sugarcane. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33(15-18): 3203-3212.
- Rebolledo RHH (1999) *SAS en microcomputadora. Análisis estadístico de datos experimentales*. 8ª Edición. Departamento de Suelos Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo. Edo. De México. 175 p.
- Rooney CP, McLaren RG, Cresswell RJ (1999) Distribution and phytoavailability of lead in soil contaminated with lead shot. *Water, Air and Soil Pollution* 116: 535-548.

- Ross SM (1994) Sources and forms of potentially toxic metals in soil-plant systems. In: Toxic metals in soil-plant systems. 1a edition. ed. Ross S. M. Ed. John Wiley and Sons. Toronto, Canada. p. 3-26.
- Salgado GS, Palma LDJ, Zavala CJ, Lagunes ELC, Ortiz GCF, Castelán EM, Ruiz RO, Juárez LJF, Armida AL, Rincón RJA (2008) Sistema integrado para recomendar dosis de fertilizantes (SIRDF): Ingenio Presidente Benito Juárez. Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. H. Cárdenas, Tabasco, México. 82 p.
- Salgado GS, Palma LDJ, Lagunes ELC, Castelán EM (2006) Manual para el muestreo de suelos plantas y aguas e interpretación de análisis. Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco, ISPROTAB, H. Cárdenas, Tabasco, México. 90 p.
- Salgado GS, Palma LDJ, Lagunes ELC, Ortiz GCF, Ascencio RJM (2005). Bases para generar un programa sustentable de fertilización en un ingenio de Tabasco, México. *Interciencia*. 30(7): 395-403.
- Salgado GS, Lagunes ELC, Riestra DD, Núñez ER (2003) La caña de azúcar es un cultivo sustentable. *Tecnociencia Universitaria* 2(6): 6-21.
- Segura MSI, da Silva OA, Nikaido M, Trevilato TMB, Bocio A, Takayanagui AMM, Domingo JL (2006) Metals levels in sugar cane (*Saccharum* spp.) samples from an area under the influence of a municipal landfill and a medical waste treatment system in Brasil. *Environment International* 32 (1):52-57.
- SEMARNAT (2001) Norma oficial mexicana NOM-021-RECNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y análisis. Diario Oficial de la Nación. México, D.F. 73 p.
- Sereno ML, Almeida RS, Nishimura S, Figueira A (2007) Response of sugarcane to increasing concentrations of cooper and cadmium and expresion of metallothionein genes. *Journal of Plant Physiology* 164: 1499-1515.
- Siebe C, Cram S, Herre A, Fernández-Buces N (2005) Distribución de metales pesados en suelos de la llanura aluvial baja del activo Cinco Presidentes, Tabasco. In: Botello A.V., J. Rendon Von Osten., G. Gold-Bouchot y C. Agraz-Hernández (Eds). Golfo de México, contaminación ambiental: Diagnostico y tendencias. 2ª edición. Univ. Autón. de Campeche, Univ. Autón. de México, Intituto Nacional de Ecología. 696 p.
- USEPA (1993) Part 503 Standards for the use or disposal of sewage sludge. United States Environment Protection Agency. Federal Register 58: 9387-9404.
- Volke ST, Velasco TJA, de la Rosa PD (2005) Suelos contaminados por metales pesados y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. 1ª edición. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAT. México, D.F. 120 p.
- Zavala CJ, Palma LDJ, Ruiz BA (2003) Metales pesados en tierras y granos de maíz. En: Impacto ambiental en las tierras del campo petrolero Samaria, Tabasco. Editores: Zavala CJ, Lagunes-Espinoza L del C y Palma-López DJ. Villahermosa, Tabasco, México. p. 73-93.