

## ZONIFICACIÓN PRODUCTIVA CAÑERA EN HUASTECA POTOSINA, MÉXICO

### PRODUCTIVE ZONING CAÑERA IN HUASTECA POTOSINA, MEXICO

Noé Aguilar-Rivera\*, Guadalupe Galindo Mendoza\*, Carlos Contreras Servin\* y Javier Fortanelli Martínez\*

\*Profesores. Universidad Autónoma de San Luís Potosí. Av. Sierra Leona # 550, Col. Lomas 2a. Sección. C.P. 78210. San Luis Potosí S.L.P. México. E-mail: noe.aguilar@uaslp.mx

#### RESUMEN

Los sistemas de información geográfica (SIG) y percepción remota (PR) son herramientas de utilidad en el manejo y modernización de la zonificación agroecológica de la producción de caña de azúcar, *Saccharum officinarum*. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la distribución espacial al caracterizar el nivel de productividad del cultivo, en la región Huasteca Potosina, en San Luís Potosí, México, mediante técnicas de percepción remota. Se emplearon datos de Índice Normalizado de Vegetación (INDV), suelo y agrometeorológicos para evaluar la productividad mediante el software cartográfico ILWIS 3.3 y ESRI ArcGis versión 9.2. El INDV permitió identificar y evaluar el estado del cultivo. Los resultados indican que la zona cañera es óptima para obtener altos rendimientos, pero estos fueron marginales. Cada zona tiene una combinación similar de potencial, limitaciones para el desarrollo del cultivo y determina el foco de atención para futuras recomendaciones en las zonas cañeras. Estas áreas dentro de Huasteca Potosina requieren sistemáticas acciones de planeación, arreglos institucionales e iniciativas gubernamentales para incrementar su rentabilidad y productividad.

**Palabras Clave:** álgebra de mapas; INDV; percepción remota; *Saccharum officinarum*; SIG; zonificación.

#### SUMMARY

The geographic information system (GIS) and remote sensing (RS) are the most important tools to implement high efficient management of modernization and agro-ecological zoning of sugarcane, *Saccharum officinarum*, production. The objective of this research was to evaluate the spatial distribution and characterize the level of productivity of sugarcane crop in Huasteca Potosina area in San Luis de Potosí, Mexico, through remote sensing techniques. Normalized difference vegetation index (NDVI), weather and soil databases and the management systems under which the crop is grown were used to evaluate inherent productivity. ILWIS 3.3 and ESRI ArcGis 9.2. software were used for cartographic synthesis. NDVI was successfully used for sugarcane condition assessment: canopy cover, vigour and area identification. The results indicate that the sugarcane zone is precisely located for good crop yields, however were detect marginal yields. Each zone has a similar combination of constraints and potentials for land use and serves as a focus for the targeting of recommendations designed to improve the existing sugarcane land use situation. The sugarcane areas at Huasteca Potosina requires a systematic effort towards the planning of land use activities in the most appropriate way, apart from several other institutional and policy programmed initiatives to improvement the profitably and productivity.

**Key Words:** GIS; map algebra; NDVI; remote sensing; *Saccharum officinarum*; zoning.

RECIBIDO: enero 10, 2010

ACEPTADO: septiembre 27, 2010

### INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar, *Saccharum officinarum*, es una planta perenne en forma de tallo que es cultivada en las regiones tropicales y subtropicales del mundo (actualmente se cultiva en 105 países) entre las latitudes 37° N y 31° S, principalmente, por su capacidad para almacenar grandes cantidades de sacarosa (10-18%) en los internodos, dependiendo de la variedad y de las condiciones agroclimáticas como factores limitantes para su crecimiento, además de la etapa de desarrollo (planta, soca o resoca), suelo, fertilización, clima, temperatura, plagas, malezas, enfermedades y la disponibilidad de agua, tienen relación directa en la productividad del cultivo (rendimiento de campo y agroindustrial); pero de estos factores el más importante es la disponibilidad de agua (Abdel-Rahman, 2008; Inman-Bamber, 2005).

La agroindustria de la caña de azúcar en México, por tradición, es un sector productivo en continua crisis económica, tecnológica, ambiental y social, funcionando sobre la base de subsidios estatales al comercializar un solo producto (la sacarosa o azúcar de mesa) como resultado de operaciones unitarias de proceso en una factoría denominada “Ingenio Azucarero” que procesa una única materia

prima (caña de azúcar) procedente de un monocultivo. Por otra parte, se tiene como sector productivo alternativo, la producción de panela o piloncillo y/o pilón en una instalación denominada “Trapiche”.

Los productores de caña de azúcar de ambos sistemas productivos, continúan buscando formas de reducir costos, aumentar la productividad y los rendimientos, pero en general, son pocas las herramientas de agricultura de precisión (AP) que se están aplicando para este fin.

El cultivo de la materia prima para ambos procesos, crearon toda una tradición productiva en 15 estados de la República, donde se cultiva y se procesa la caña en 57 ingenios y numerosos trapiches, es decir, la agroindustria de la caña de azúcar se localiza distribuida en: Campeche, Chiapas, Colima, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, San Luis Potosí, Tabasco, Tamaulipas y Veracruz, a su vez, integran seis regiones cañeras administrativas con diversidad de indicadores productivos (Figura 1), destacándose por su alto rendimiento de campo promedio anual las regiones: Puebla, Morelos y Chiapas; además de Veracruz, Jalisco y San Luis Potosí por su alta superficie cultivable (Cuadro 1).



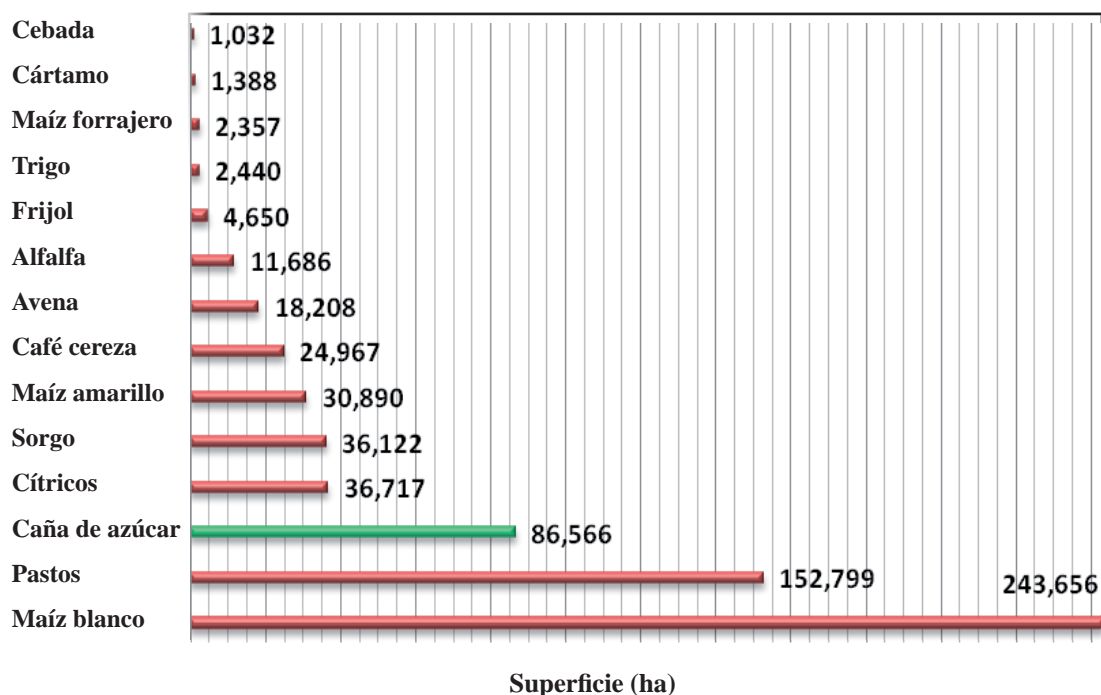
FIGURA 1. Regiones productoras de caña de azúcar (PRONAC, 2007).

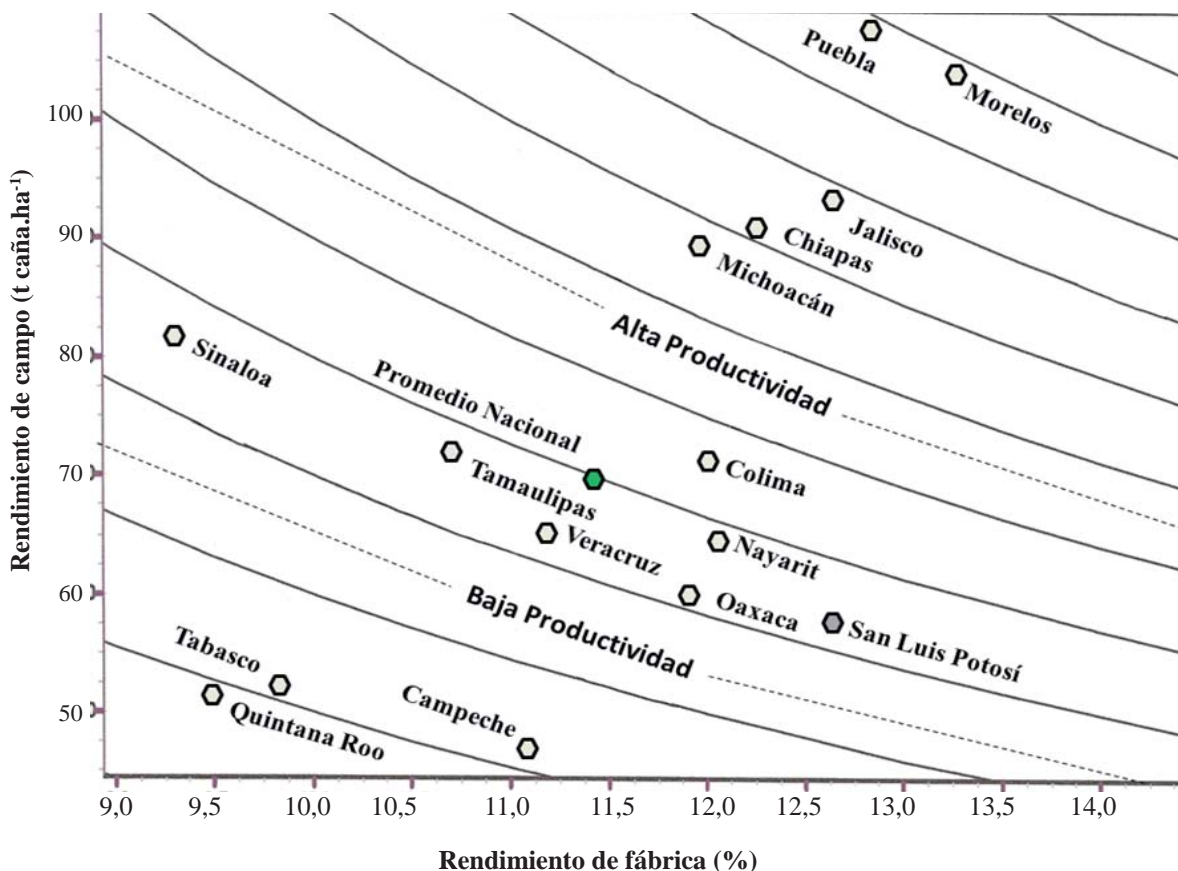
**CUADRO 1.** Productividad de la industria azucarera nacional (CNPR, 2009).

Estado productor	Superficie cosechada (ha)	Producción de azúcar (t)	Costo de producción EE.UU\$/t caña
Nacional	663,057	4 962,495	28,8
Veracruz	267,606	1 857,269	30,5
San Luís Potosí	68,669	428,663	34,4
Jalisco	4,314	655,252	15,5
Oaxaca	40,818	251,929	17,8
Tamaulipas	31,045	227,603	36,2
Tabasco	28,768	157,145	26,7
Chiapas	28,534	279,391	16,6
Nayarit	26,839	200,925	26,7
Quintana Roo	22,226	110,535	33,4
Sinaloa	21,527	164,786	34,3
Puebla	15,451	201,574	50,8
Morelos	13,496	178,181	14,3
Michoacán	12,331	111,162	30,7
Colima	12,233	97,052	26,8
Campeche	9,582	44,270	37,8

En el estado de San Luís Potosí, específicamente en la región Huasteca Potosina, la caña de azúcar para los ingenios azucareros registra la mayor tasa media anual de crecimiento con 3,1% en el período 1998-2008 (SIAP, 2009). Esta zona se ubica hacia la parte oriental del estado, entre los 19°51' y 21°34' latitud N y 15°54' y 116°56' longitud O, en la región de Barlovento de la Sierra Madre Oriental. Se define como límite boreal de las selvas mexicanas que presenta la línea divisoria entre Aridoamérica y Mesoamérica. Conforman dos subcuencas hidrográficas (ríos Valles y Moctezuma). Estas características físicas permitieron el desarrollo de actividades agropecuarias, sobre todo la caña de azúcar (Galindo, 2006), constituyendo el principal cultivo perenne y agroindustrial, luego del maíz blanco para consumo humano y los pastos para el ganado (Figura 2).

Sin embargo, a nivel nacional presenta una productividad de media a baja, así lo señalan los indicadores del sector azucarero (Figura 3). Se produce en los municipios de Alaquines, Aquismón, Cárdenas, Ciudad Del Maíz, Tancanhuitz, Ciudad Valles, Coxcatlán, Huehuetlán, Rayón, San Antonio, San Martín Chalchicuautla, Santa Catarina, San Vicente Tancuayalab Tamasopo, Tamazunchale, Tampacán, Tampamolón Corona, Tamuín, Tanlajás, Tanquián de Escobedo, Axtla De Terrazas, Xilitla, Matlapa y El Naranjo (ASERCA, 2004).


**FIGURA 2.** Inventario de cultivos en Huasteca Potosina (INEGI, 2007).



**FIGURA 3.** Diagrama de productividad de los estados cañeros en México (elaborado con datos del Manual Azucarero Mexicano 2010 y la Metodología de Luna *et al.*, 1995).

Estas regiones cañeras se localizan en zonas de piedemonte y llanura donde existen dos tipos de productores primarios: 1) Para azúcar de mesa (industria azucarera) quienes tienen convenios con la industria del azúcar, representada por cuatro ingenios del estado: Alianza Popular y Plan de Ayala (Grupo Santos), San Miguel El Naranjo (Grupo Beta San Miguel) y Plan de San Luís (SAGARPA-FEESA), dedicados a la fabricación de azúcar crudo y como principal subproducto generan melazas; 2) Los libres o independientes sin contratos fijos en la entrega de caña para ingenios y trapiches. En los Cuadros 2 y 3 se presentan algunos indicadores operativos.

Ambos tipos de productores (12 567 ha, 7,6% del total nacional) integran una superficie total de caña de azúcar de 86 566,64 ha, distribuidas en 12 910 unidades productivas de las cuales 8 387 abastecen el rubro al ingenio azucarero, 2 212 para trapiche, 2 844 para ambos con una producción de 4 415,191 t de caña de azúcar con

destino a los ingenios, 38 274,81 t a la producción de piloncillo; 5 305,63 t se destinan a la producción de semilla de caña y 5 948,14 t a otros usos (CNPR, 2009; SIAP, 2009; Coazucar, 2008).

En Huasteca Potosina como en todas las regiones cañeras de México, el sector primario de la industria azucarera se caracteriza por ser la base material de la producción; ésta se evalúa en términos de superficie, tonelaje y costos. Sin embargo, ante los bajos indicadores de producción y rentabilidad de esta zona a nivel nacional, afectando esto negativamente los ingresos de los productores, se requiere analizar los factores limitantes y los geoeconómicos del cultivo, mediante metodologías que permitan establecer la relación a nivel espacial y temporal entre las variables que caractericen los niveles de productividad en Huasteca Potosina permitiendo así, establecer zonificaciones y/o notificaciones para determinar futuras recomendaciones para la supervivencia de la agroindustria en esta región.

**CUADRO 2.** Indicadores productivos de los ingenios azucareros de Huasteca Potosina (Manual Azucarero Mexicano, 2010).

<b>Factor de Productividad</b>	<b>San Miguel El Naranjo</b>	<b>Plan de San Luis</b>	<b>Alianza Popular</b>	<b>Plan de Ayala</b>
Caña molida (t)	Aceptable	Regular	Regular	Regular
Rendimiento de campo (t caña.ha <sup>-1</sup> )	Mínimo	Bajo	Bajo	Bajo
Azúcar producida (t)	Bueno	Bueno	Bueno	Aceptable
Rendimiento agroindustrial (t azúcar.ha <sup>-1</sup> )	Mínimo	Bajo	Bajo	Bajo
Rendimiento de fábrica (%)	Bueno	Aceptable	Aceptable	Regular
Sacarosa en caña (%)	Excelente	Excelente	Bueno	Aceptable
Pérdidas totales de sacarosa (%)	Mínimo	Mínimo	Regular	Regular
Consumo de petróleo (l.t azúcar)	Excelente	Regular	Bueno	Regular
Eficiencia de fábrica (%)	Mínimo	Mínimo	Regular	Mínimo
Tiempos perdidos (%)	Regular	Aceptable	Regular	Bueno

**CUADRO 3.** Indicadores productivos en ingenios azucareros (Ahumada, 2009).

<b>Factor de productividad</b>	<b>Excelente</b>	<b>Bueno</b>	<b>Aceptable</b>	<b>Regular</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Bajo</b>
Caña molida (t)	> 11 500	1,2 a 11 499	1 a 1 199	0,8 a 0,999Mt	0,6 a 0,799Mt	< de 0,6
Rendimiento de campo (t caña.ha <sup>-1</sup> )	> 100	90 a 99,9	80 a 89,9	70 a 79,9	60 a 69,9	< de 60
Azúcar producida (t)	> de 150	100 a 150	80 a 100	60 a 80	40 a 60	< de 40
Rend. Agroindustrial (t azúcar.ha <sup>-1</sup> )	> de 12,5	11,1 a 12,49	9,5 a 11	8,5 a 9,49	7,5 a 8,5	< de 7,5
Rendimiento de fábrica (%)	> de 12,5	12,01 a 12,49	11,51 a 12	11,01 a 11,50	10,01 a 11	< de 10
Sacarosa en caña (%)	> de 14,5	14 a 14,49	13,5 a 13,99	13 a 13,49	12 a 12,99	< de 12
Pérdidas totales de sacarosa (%)	< de 2	2 a 2,20	2,21 a 2,40	2,4 a 2,7	2,7 a 2,99	> de 2,9
Consumo de petróleo (l.t azúcar)	< de 10	10 a 50	50 a 75	75,1 a 100	100,1 a 200	> de 200
Eficiencia de fábrica (%)	> de 85	84 a 84,99	83 a 83,99	82 a 82,99	80,1 a 81,99	< de 80
Tiempos perdidos (%)	< de 5	5,1 a 8	8,1 a 10	10,1 a 12	12,1 a 15	> 15

### Zonificación de la producción de caña de azúcar

La determinación del potencial productivo para las zonas cañeras de México y los estudios de regionalización, zonificación y notificación, entre otros, se encuentran limitados por la baja disponibilidad de información

estadística y cartográfica con relación al medio físico y potencialidades de las diversas regiones productoras de caña, esta información temporal y espacial fue tradicionalmente limitada y con actualización irregular. Además, en los trabajos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática (INEGI) fue difícil obtener



otra fuente de información que proporcionara datos o material de documentos confiables y útil en la toma de decisiones en planeación y gestión de actividades productivas (Aguilar *et al.* 2009; Salgado *et al.*, 2008; Medina *et al.*, 1997; Acuña, 1993).

De acuerdo con Jiménez *et al.* (2004), Cengicaña (2004) y FAO (1996), el objetivo de una zonificación de cultivos es identificar áreas potencialmente aptas, las cuales surgen de la sobreposición espacial de información de variables, tales como: suelos, clima, cultivos y otras clasificadas en intervalos. La sobreposición simultánea genera combinaciones únicas que se manifiestan en una extensión espacial a través de un mapa y una base de datos resultantes que orientan la investigación y el desarrollo de la agricultura de precisión en una región determinada a escala, predio o unidad productiva, debido a la longevidad del cultivo, el bajo costo de adquisición de imágenes, su cobertura espacial y la posibilidad de generar los índices de sus bandas espectrales (Abdel-Rahman, 2008; Zhang, 2005).

Ante esta situación, las técnicas de percepción remota (PR) con imágenes satelitales (Lansat, SPOT, NOAA, entre otros), los sistemas de información geográfica (SIG) y los sistemas de geoposicionamiento (GPS), son herramientas útiles para: identificación y monitoreo de grandes áreas agrícolas; estimación de la producción, detección de enfermedades y estrés; mapeo de zonas productivas, direccionamiento del muestreo y observación en campo; basados en la variabilidad espacial del suelo, clima y parámetros de campo de los diversos cultivos (Salgado *et al.*, 2008; Ueno *et al.*, 2005; Epiphanyo, 1996; Aguila y Zuluete, 1993; Rudorff, 1990).

En cuanto a la PR posibilita una visión sinóptica de las zonas agrícolas y el seguimiento temporal de las fases de crecimiento para las grandes áreas agrícolas, demostrando un gran potencial para su uso en la cultura de la caña de azúcar y permite fortalecer una zonificación del cultivo, no obstante, algunos trabajos se desarrollaron prevaleciendo la falta de estudios sobre el comportamiento espectral (Abdel-Rahman, 2008; Simões Dos Santos, 2005, 2003).

Los estudios agroclimáticos y agroecológicos llevan a cabo la identificación, zonificación y clasificación de áreas de cultivo de caña de azúcar dentro de diferentes tipos de análisis como: la interpolación espacial, el álgebra y sobreposición de mapas, necesarios para estimar la productividad del cultivo ( $t$  tallos. $ha^{-1}$ ) y para propósitos de manejo (Jiménez *et al.*, 2004; Schmidt *et al.*, 2001; Narciso y Schmidt, 1999; Lee, 1990).

El Índice Normalizado de Vegetación (INDV) mide la reflectividad del espectro electromagnético calculado a partir de la reflectancia en el rojo (R) y el infrarrojo cercano (NIR):  $INDV = (NIR - R) / (NIR + R)$  da una medida de la cobertura vegetal y su vigorosidad, producto de la clorofila de las hojas; se considera un buen estimador de la biomasa, empleado en todo el mundo resultando el índice verde más consistente para monitoreo de vegetación en los ambientes y situaciones más diversos; se utiliza ampliamente para evaluar a escala regional la productividad de los cultivos, teniendo correlación con el contenido de humedad de la planta, pudiéndose aplicar incluso en la agricultura de precisión para el control de los cultivos, las observaciones espectrales del follaje pueden usarse para monitorear las variaciones del crecimiento y subsecuentemente como indicadores del estrés, el cual está sometido el cultivo e indirectamente asociado a la productividad del mismo (Xavier *et al.*, 2006; Xavier *et al.*, 2004; Benefetti y Rossini, 1993). En este sentido, Pontes *et al.* (2005) indicaron que existe correlación entre el INDV y la productividad del cultivo de caña de azúcar, así mismo, la diferenciación de su potencial.

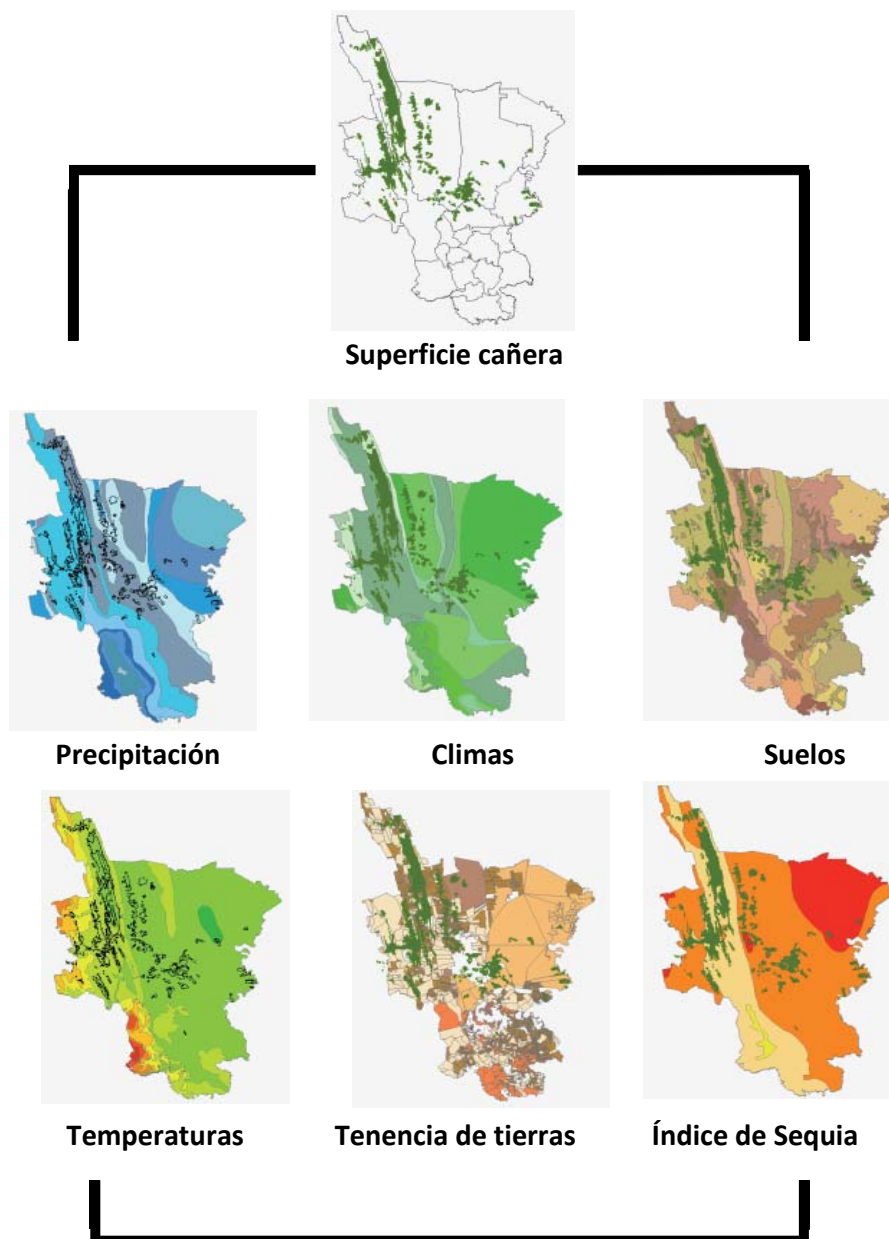
El objetivo de esta investigación fue evaluar la distribución espacial al caracterizar el nivel de productividad del cultivo de la caña de azúcar en Huasteca Potosina mediante técnicas de PR y SIG.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio, está basado en el muestro de puntos ubicados en la zona cañera de Huasteca Potosina y la interpretación visual de espacio mapas derivados de imágenes Landsat 7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) 2 645, 2 745 y 2 744 (órbita/punto) con resolución espacial de 30 x 30 m, las cuales fueron corregidas geográficamente empleando el Datum norteamericano de 1927 y la proyección Transversal de Mercator (UTM zona 14 Norte). Para el procesamiento digital de las imágenes fue empleado el software ILWIS 3.3 (Integrated Land and Water Information System, ITC, ILWIS System). Estas imágenes fueron utilizadas en primer lugar, para establecer los límites en la zona agrícola de caña de azúcar (polígonos digitales) y de otros usos del suelo; en segundo lugar, para determinar la respuesta espectral de la caña de azúcar relacionada con la productividad (INDV bandas 3 y 4). Posteriormente, se calcularon las capas temáticas de niveles de producción: alto, medio, bajo y muy bajo, para coincidir con la clasificación adoptada para la zonas azucareras de México.

Posterior a esta clasificación, se llevó a cabo un análisis de cada capa por nivel productivo, tomando en cuenta los requerimientos climáticos y edáficos necesarios para el desarrollo del cultivo en el software ArcMap ESRI ArcGis 9.2., de acuerdo a la metodología de Jiménez *et al.* (2004), Cengicaña (2004) y Rudoff (1985) mediante el uso de la superposición de mapas de datos meteorológicos y edáficos (temperaturas, régimen de lluvias, Índice de Severidad a la Sequía de Palmer, climas, suelos, altitud, pendiente y tenencia de la tierra) en

formato digital, desarrollados según la metodología de Hernández (2006) y Galindo (2005), lograron una base de datos mediante el uso del algoritmo Cross (álgebra de mapas), generándose las posibles combinaciones entre categorías de ambos mapas y la superficie que registran tales operaciones relacionadas con la productividad del cultivo de caña de azúcar (Figura 4). La información generada fue validada con trabajos de campo, empleando un equipo GPS Garmin modelo GPSmap 60CSx.



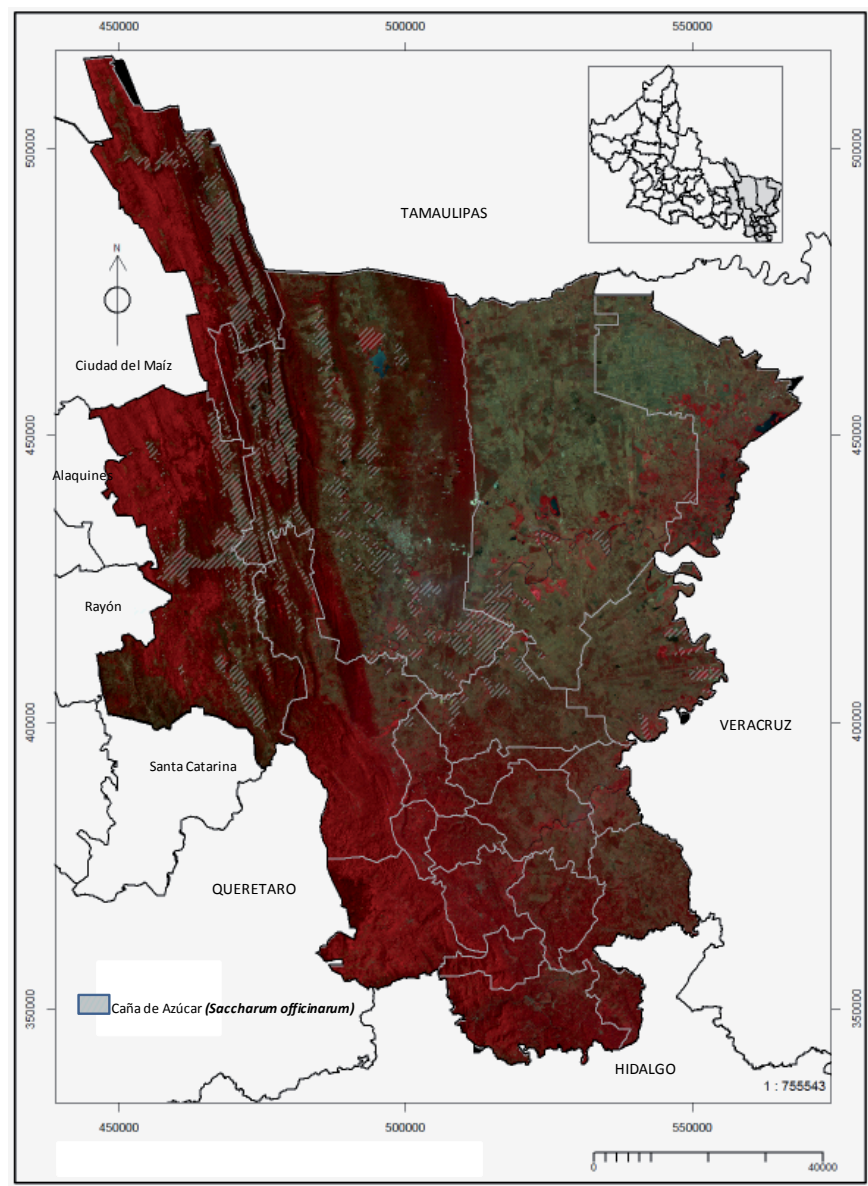
**FIGURA 4.** Mapas temáticos empleados en la evaluación de la productividad cañera.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La distribución espacial de este tipo de cobertura en la región de Huasteca Potosina, permitió que la identificación de los predios con caña de azúcar fueran visiblemente aceptable. Además, en dicha región se observó poca diversidad de usos del suelo por ganadería y otros cultivos con la consecuente reducción de los tipos de cobertura para la zona bajo estudio que posibilitó la

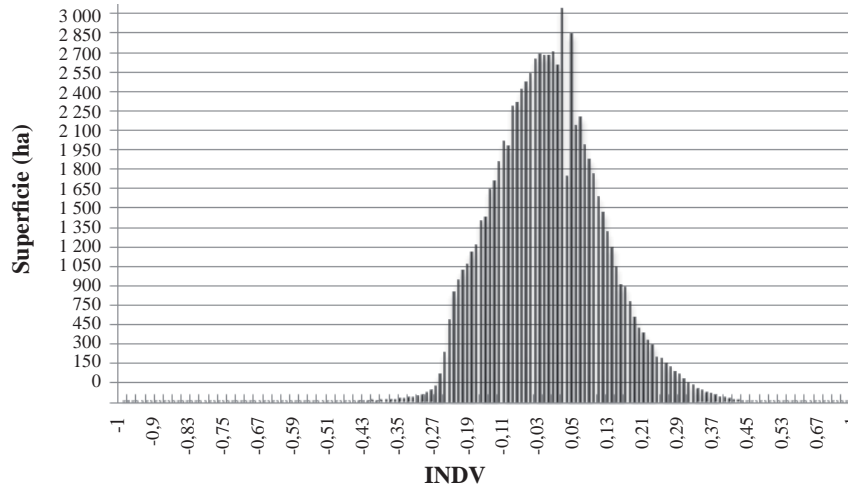
obtención de un resultado de identificación verídico y confiable (Figura 5).

Se procedió a la delimitación del perfil del INDV que se estableció *a priori*, de acuerdo a su valor, para la separación de los cañaverales y la distribución espacial correspondiente por superficie y niveles de productividad en las diferentes características espectrales de la zonas productoras de caña de azúcar (Figura 6 y 7).

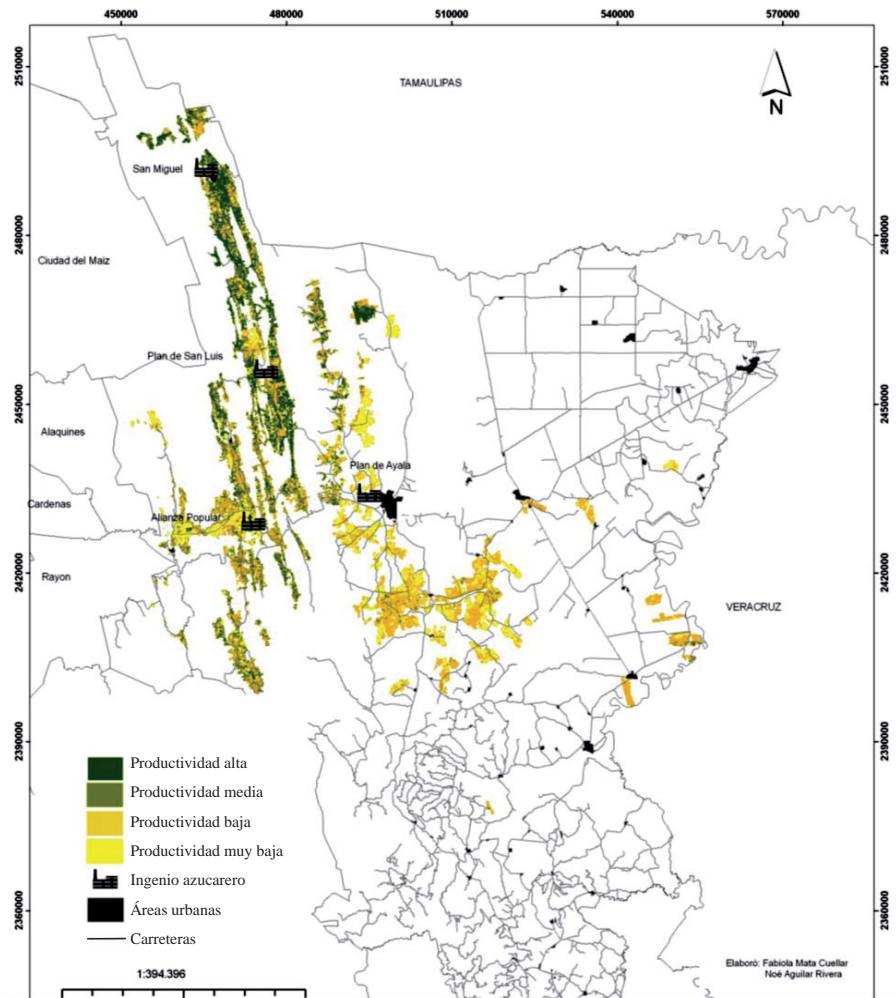


**FIGURA 5.** Imagen de satélite LANDSAT 7 ETM + compuesto falso color 432 RGB y máscara del cultivo de caña de azúcar dentro de Huasteca Potosina.





**FIGURA 6.** Índice Normalizado de Vegetación en la zona productora de caña de azúcar en Huasteca Potosina (valor mínimo -0,98; valor máximo 0,69; desviación estándar 0,12; media -0,04; mediana -0,05).



**FIGURA 7.** Zonificación productiva del cultivo de caña de azúcar dentro de Huasteca Potosina.

Así mismo, en la Figura 7 se observa que al Norte donde se localizan los ingenios San Miguel, El Naranjo y Plan de San Luis (municipios El Naranjo y Ciudad Valles) predominan los cañaverales con nivel de productividad alta y media. Al Este, Centro y Sur en la zona de abasto de los ingenios Plan de Ayala y Alianza Popular (municipios Tamasopo, Tamuin, Aquismon, San Vicente y Tanlajas) prevalecen zonas con productividad media a muy baja. Por lo tanto, el nivel bajo de productividad presentó mayor distribución espacial y superficie (Cuadro 4), en contraposición a los cañaverales con niveles altos y medios, dado a que en la vegetación se encontró un alto estrés hídrico tendiendo a absorber menos radiación solar, aumentando su reflectancia en el rango visible y absorbiendo más la radiación en la porción del infrarrojo cercano (Amaral *et al.*, 2007).

**CUADRO 4.** Clasificación de la zona cañera en Huasteca Potosina.

Productividad	Área (ha)	% Total
Alta (> 70 t.ha <sup>-1</sup> )	6 014,07	7,98
Media (60 a 70 t.ha <sup>-1</sup> )	22 838,35	30,32
Baja (50 a 60 t.ha <sup>-1</sup> )	33 264,72	44,16
Muy baja (< 50 t.ha <sup>-1</sup> )	13 211,69	17,54
Total	75 328,83	100,00

En contraste a lo señalado por los autores que mencionan que para un dosel verde y totalmente desarrollado de caña de azúcar se registran datos de INDV entre 0,7 y 0,8 (Rahma, 2002). Los valores de INDV de Huasteca Potosina en la fecha de toma de la imagen equivalen a un cultivo seco de baja productividad y altamente estresados (Almeida *et al.*, 2006); esto se relaciona con lo indicado por Jiménez (2004), donde menciona que el factor climático y la distribución de la precipitación pluvial junto al edafológico limitan la productividad de la caña de azúcar y determinan zonas de alta, media o baja productividad ya que térmicamente no afecta el desarrollo del cultivo.

De modo que, para Huasteca Potosina las variaciones en el rendimiento potencial del cultivo de caña con relación al INDV como indicador inicial de productividad, están relacionadas directamente con la edafología y consecuentemente con las condiciones hídricas (Da Silva y

Alexandre, 2005); según Fauconnier (1975) estableció que a cada lugar corresponde un rendimiento máximo dependiente de las condiciones climáticas en el mismo año. A la media de esas condiciones climáticas, corresponde una media de rendimiento máximo o potencial específico.

Por consiguiente, el INDV como herramienta de diagnóstico, debe acompañarse de datos climáticos y edafológicos en un mapa de celdas agroecológicas con características climáticas y edáficas definidas (Salgado *et al.*, 2010; Begue, 2008; Ueno *et al.*, 2005).

Seguidamente, al sobreponer en la clasificación productiva generada por el análisis de INDV, nuevas capas de información edafológica y climática de aptitud específica para el cultivo de caña, permitió obtener nuevos mapas temáticos (Cuadro 5) que determinaron en primer lugar las características espaciales de la totalidad de la zona cañera de Huasteca Potosina y en segundo lugar la estimación de superficies de cada zona en relación a la productividad por INDV (Cuadros 6 al 9).

**CUADRO 5.** Nivel de aptitud al cultivo de caña (Fauconnier, 1975).

Variable	Nivel de aptitud al cultivo de caña			
	Alta	Media	Baja	No apta
Temperatura anual (°C)	22-32	20/22-32/35	18-20	<18
Precipitación media anual (mm)	>1,500	1,250-1,500	1,250-1,000	<1,000
Pendiente (%)	0-8	8-16	16-30	>30
Altitud (m.s.n.m.)	Hasta 400	400-850	850-1 300	>1 300
Índice de Severidad de la Sequía de Palmer	Leve	Moderada	Fuerte a muy fuerte	Severa
Rendimiento esperado (t.ha <sup>-1</sup> )	>80	80-55	55-40	<40

La información generada establece que el clima dominante es (A) Cm (semi-cálido, húmedo con temperatura media anual de 18 a 20 °C) para las zonas de alta (46,7%), media (60,53%) y baja productividad (53,8%) y Aw1 (muy cálido, subhúmedo con temperatura media mayor de 18 °C) para la de baja (25%) y Am (cálido, húmedo con temperatura media anual de 18 a 22 °C) para la de muy baja productividad (51%).

**CUADRO 6.** Condiciones meteorológicas predominantes de la zona cañera de Huasteca Potosina.

Clima		Lluvia		Temperatura máxima		Temperatura media		Temperatura mínima		Índice de Severidad de la Sequía de Palmer	
Tipo	ha	Isoyetas	ha	°C	ha	°C	ha	°C	ha	Tipo	ha
(A)Cm	40 775,3	<900	212 s	18-20	0,12	18-20	187,9	12-14	213,95	Fuerte	36 103
(A)Cw1	2 794,4	900-1000	944,9	24-26	209,6	20-22	503,6	14-16	1 065,3	Intenso	37 871
(A)Cw2	7 675,8	1 000-1100	4 215,9	26-28	482,8	22-24	3 284,5	16-18	45 207	Severo	1 212
Am	7 111,2	1 100-1200	10 568,9	28-30	23 477	>24	41 649	>18	28 699		
Aw0	4 090,81	1 200-1500	27 220,7	30-32	50 637						
Aw1	16 348,5	1 500-1800	31 997,2	>32	379,8						
Aw2	3 390,32	1 800-2000	12,39								

**CUADRO 7.** Condiciones edafológicas predominantes de la zona cañera de Huasteca Potosina.

Pendiente		Altitud		Suelo	
Tipo	ha	m.s.n.m.	ha	Tipo	ha
0-5%	65 361,03	0-100	19 699,28	Cambisoles	3 427,75
5-10%	5 641,45	100-200	6 689 45	Rendzinas	6 135,71
10-20%	2 874,44	200-300	30 352 06	Phaeozems	2 675,06
20-25%	615,91	300-400	12 421 59	Litsoles	9 384,28
25-30%	2 346,98	400-500	3 504 05	Castanozem	250,27
30-40%	274,25	500-600	1 156 43	Regosoles	4 778,65
40-50%	142,14	600-1000	887 09	Vertisoles	48 532,16
>50%	71,16	1 000-1 200	519 62	Otros	3,39

**CUADRO 8.** Condiciones meteorológicas por zonificación productiva en Huasteca Potosina.

Nivel de Productividad	Clima	Lluvia (mm)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura media (°C)	Temperatura mínima (°C)	Índice de Severidad de la Sequía de Palmer
Alta	(A)Cm Aw1	1 100-1 800	28-32	22-26	16-20	Fuerte
Media	(A)Cm Aw1 (A)Cw2	1 000-1 800	28-32	22-24	16-18	Fuerte a muy fuerte
Baja	(A)Cm Aw1	1 000-1 800	28-32	22-26	16-20	Fuerte a muy fuerte
Muy baja	(A)Cm Aw1	1 100-1 800	30-32	22-26	16-20	Fuerte a muy fuerte

**CUADRO 9.** Condiciones edafológicas por zonificación productiva en Huasteca Potosina.

Nivel de productividad	Tipo de suelo	Pendiente (%)	Altitud (m.s.n.m.)
Alta	Vertisoles	0-10	300
Media	Vertisoles	0-15	400
Baja	Vertisoles	0-15	200-500
	Litsoles		
Muy baja	Vertisoles	0-10	400

La zona de Huasteca Potosina presenta temperaturas elevadas mayores a 28 °C que predomina durante una parte del año, la mínima con un valor promedio de 22 °C favorable para el normal desarrollo de la planta. Para la edafología predomina el suelo Vp/3 (vertisol pélico) común para todas las zonas (51,7% alta, 51,2% media, 49,9% baja y 56,1% muy baja), con el predominio de pendientes de 0 a 20% de tipo llano o casi llano a moderadamente escarpado, es decir, pendientes en condiciones aptas para el uso de la mecanización. La proporción de este tipo de pendientes es 98% para la zona de alta productividad, 96,6% media, 98,4% baja y 99% muy baja con una altitud que varía desde 61 a 1 200 m.s.n.m.

En esta zona existen condiciones favorables para el crecimiento del cultivo de caña de azúcar y podrían esperarse altos rendimientos, como lo mencionaron Salgado *et al.* (2010); Sánchez *et al.* (1997) y Bautista (1998) con relación a factores edáficos. Sin embargo, de estos factores al igual que los climáticos analizados, el más importante es la disponibilidad de agua planteado por Inman-Bamber (2005), Jiménez (2004) y Aguilar y Zulueta (1993). La caña requiere para su desarrollo en un ciclo completo, valores superiores a 1 500 mm de agua de lluvia o riego; por lo que el 43% muestra la cantidad de agua suficiente para la evolución del cultivo en régimen de temporal distribuido en 2,73% a la zona de alta productividad, 15,12% media, 18% baja y 6,4% muy baja.

Al mismo tiempo, al contabilizar de forma anual diferentes niveles de precipitación, se observó que la distribución del gradiente fue irregular, presentando varios meses de escasas lluvias (noviembre a julio o agosto) incidiendo directamente en el vigor vegetal del cultivo, fundamental para la productividad del mismo en esta zona. De esta manera, la distribución tiene más influencia sobre la

producción de caña que los acumulados anuales, es decir, la cantidad de lluvia efectiva (Figura 8).

Puede inferirse que el Índice de Severidad de la Sequía de Palmer (función del déficit de precipitación, respecto a la media anual o estacional de largo período y su duración en una determinada región) predomina en la zona cañera según la distribución: muy fuerte (alta 58,5%, media 44%, baja 51,2% y muy baja 56,7%); fuerte (alta 39,4%, media 55%, baja 47% y muy baja 46,2%) y severo (alta 2,03%, media 1,2%, baja 1,76% y muy baja 1,72%).

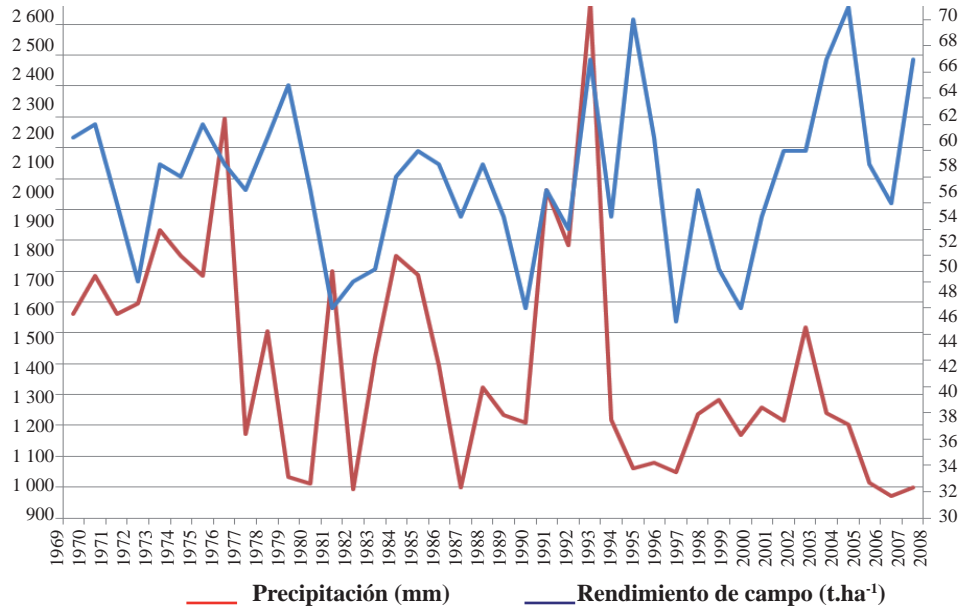
Los resultados mostraron que los diferentes factores climáticos que actúan sobre un lugar determinado como en Huasteca Potosina, condicionan en gran medida las fases del ciclo productivo de la caña y los rendimientos finales del cultivo.

Por lo tanto, en el sistema de producción y rendimiento cañero se consideran tres aspectos del impacto climático: primero, establece el proceso de crecimiento y la cantidad de azúcar producida; segundo, las condiciones influyen en el desarrollo de enfermedades y plagas en el cultivo que restringen su proceso; tercero, particularmente la lluvia determina el exceso o escasez de agua, como también el movimiento de nutrimentos y pesticidas.

Sin embargo, no basta con analizar sólo el clima como factor indicativo de una plantación, sino, que es necesario estudiar el suelo y cultivo como un sistema integrado. Cabe señalar, que ante las condiciones agrometeorológicas predominantes para el desarrollo de la caña de azúcar en Huasteca Potosina, un factor limitante es el manejo del cultivo (variedades de caña, cepas envejecidas, fertilización, riego, manejo de plagas y malezas, mecanización, entre otros) sobre todo para las zonas de baja y muy baja productividad, lo que implica el diseño de nuevas metodologías y esquemas de planeación.

En este sentido, la tenencia de la tierra como indicador social, manifiesta que el ejido (alta 30,86%, media 48,42%, baja 49,8% y muy baja 43,9%) es dominante en todas a excepción de la zona de alta productividad, involucrando factores sociales condicionantes que junto a los edafoclimáticos en Huasteca, son inferiores a la media nacional e impactan menos en los rendimientos de la agroindustria a nivel municipal (Cuadro 10). Al respecto, autores como Pérez (2007) y Singelmann (2003) concluyen que el minifundio cañero y algunas características de manejo y socioeconómicas, actúan como freno de la agroindustria al tener separados los dos factores más importantes de la producción agrícola: la tierra y el capital.





**FIGURA 8.** Precipitación y rendimiento de campo en la zona cañera de Huasteca (con datos del período 1969-2008 de las estaciones meteorológicas de El Naranjo, El Rosario, El Estribo, La Hincada, 5 de Mayo, Estación Coyoles, Plan de Ayala, Tampaya, Tamasopo y El Canal).

**CUADRO 10.** Factores socioeconómicos del campo cañero en Huasteca Potosina (SIAP, 2009).

Municipio	Rendimiento de campo (t.ha <sup>-1</sup> )	Tenencia de tipo ejidal (%)	Tamaño unidad productiva (ha)	Afectaciones al cultivo (%)	Sin acceso a crédito (%)	Sin capacitación y asistencia (%)	Cultivo en ciclo resoca (%)	Sin acceso a riego (%)
Tamasopo	43,3	86,0	3,27	14,1	42,2	96,0	74,9	77,1
El Naranjo	57,8	55,5	4,03	5,0	56,8	79,8	55,6	86,5
Cd. Valles	49,9	48,4	4,75	8,9	61,2	93,9	54,8	67,7
Tamuín	58,9	81,1	3,51	19,5	81,1	95,4	61,9	55,5
Aquismón	41,7	83,7	2,69	8,9	65,0	97,1	86,0	98,8
Tanlajás	42,8	88,0	1,54	6,9	94,5	96,7	71,8	100
San Vicente	48,6	71,2	4,06	8,4	63,3	53,3	49,8	8,1
Huasteca	49	61,6	3,4	9,5	60,8	92,5	61,1	74,8
Nacional	65	71,3	3,9	23,8	55,8	90,6	42,8	60,8

Por otra parte, no es prudente afirmar que la situación de la agroindustria cañera se atribuya a estos factores exclusivamente. Así mismo, García (2008) puntualizó que a finales de la década del 2000 los problemas fueron de tipo estructural, originados en gran parte por la evolución histórica de la misma, otros, fueron producto de

las nuevas condiciones que imperaban en la economía mundial y en el modelo de desarrollo impuesto para las zonas cañeras de México, donde la influencia de los productores e industriales se limita a los aspectos técnicos de sus operaciones y el subsistema campo no presentaba el rendimiento necesario.

## CONCLUSIONES

- El estudio evidencia la capacidad de las imágenes Landsat 7+ETM, principalmente en las bandas espectrales TM3 y TM4, pues, permite observar detalles que difícilmente se pueden identificar en campo sin una inversión considerable de recursos y tiempo al presentar: la localización, distribución, discriminación y diferenciación cuantitativa de los niveles de productividad del cultivo, mediante el análisis de los valores de vigor vegetal en las diferentes áreas con cañaverales, la gran dependencia entre INDV y la climatología de la zona.
- Se encuentra que del total de la superficie cañera evaluada (75 328,83 ha), el 7,98% (6 014,07 ha) se clasifica como de alta productividad, el 30,32% (22 838,35 ha) como media y el resto 61,7% (46 476,4 ha) de baja a muy baja productividad.
- En función de estas interpretaciones puede realizarse a mediano plazo, la planificación integral de una zona de interés mediante la determinación y diferenciación de ambientes productivos, debido a la homogeneidad en la toma de datos y a las posibilidades de procesamiento de la información obtenida, pudiéndose integrar con otras fuentes provenientes de diversos campos de estudio para generar otros productos todavía más específicos.
- Si se consideran la variabilidad de los factores productivos, tales como: el ambiente donde se encuentra el cultivo, variedades, tipo de suelo, fertilidad, rendimientos históricos, entre otros, se puede hacer un manejo más eficiente con la aplicación de insumos de acuerdo a las necesidades y al potencial de los predios cañeros.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abdel R., E. M. and F. B. Ahmed. 2008. The application of remote sensing techniques to sugarcane (*Saccharum* spp. hybrid) production: a review of the literature. *International Journal of Remote Sensing*, 29(13):3 375-3 767.
- Aguilar A., J. L. y R. Zulueta. 1993. Zonificación agroecológica para el cultivo de caña de azúcar en el estado de Veracruz. GEPLACEA, **In:** Memorias Simposio Nacional de Capacitación y Desarrollo Tecnológico del Campo Cañero Mexicano. Xalapa, México.
- Aguilar-Rivera, N., G. M. Galindo, J. M. Fortanelli y C. S. Contreras 2009. ¿Por qué diversificar la agroindustria azucarera en México? *Rev. Globalización competitividad y gobernabilidad*. GCG Georgetown University, Universia. España, 3(1):62-75.
- Ahumada, M. R. 2009. Diagnóstico agroindustrial de la caña de azúcar en México. *Memorias XXXII Convención de la asociación de técnicos azucareros de México*. Córdoba Ver. 27-28 pp.
- Almeida, T. I. R., F. C. De Souza and R. Rossetto. 2006. ASTER and Landsat ETM+ images applied to sugarcane yield forecast. *International Journal of Remote Sensing*, 27(19):4 057-4 069.
- Amaral, S., C. B. Costa and C. D. Renno. 2007. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) improving species distribution models: an example with the neotropical genus *Coccocypselum* (Rubiaceae) (en línea) **In:** Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil. 2 275-2 282 pp. Disponible en: <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.14.30/doc/2275-2282.pdf> [Consulta 20 oct 2009].
- Apoyos y Servicios a la Comercialización Agropecuaria (ASERCA). 2004. Plan Rector del sistema producto caña de azúcar en San Luís Potosí. **In:** Claridades Agropecuarias: La Caña de Azúcar. México. 60 p.
- Bautista, Z. F., H. Rivas S., C. Durán de Bazúa y G. Palacio. 1998. Caracterización y clasificación de suelos con fines productivos en Córdoba. *Rev. Investigaciones geográficas*. UNAM. México, 36:21-33.
- Begue, A., P. Todoroff and J. Pater 2008. Multi-time scale analysis of sugarcane within-field variability: improved crop diagnosis using satellite time series?. *Precision Agric.* 9(3):161-171.
- Benefetti, R. and P. Rossini. 1993. On the use of NDVI profiles as a tool for agricultural statistics: The case study of wheat yield estimate and forecast in Emilia Romagna. *Remote Sens. Environ.* 45: 311-326.
- Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar (CENGICANA). 2004. Avances del proyecto de zonificación agroecológica en la zona cañera de Guatemala. Memoria de presentación de resultados de investigación. Guatemala. 208 p.

- Lee, L. G. and L. Kirchner. 1990. The application of remotely sensed (Landsat TM) data to monitor the growth and predict yields in sugarcane. *Proc. Austr. Soc. Sug. Cane Technol.*, 65-72 pp.
- Luna G., C., J. H. Cock, A. E. Palma, L. V. Díaz y C. A. Moreno. 1995. Análisis de la productividad en la agroindustria azucarera de Colombia y perspectivas para aumentarla. **In:** CENICAÑA. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. Cali, Colombia, 373-394 pp.
- Manual Azucarero Mexicano. 2010. Editado por Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcohólica. 53 ed. México, 470 p.
- Medina G., G., J. A. Ruíz C., R. A. Martínez P. y M. Ortiz V. 1997. Metodología para la determinación del potencial productivo de especies vegetales. *Agric. Téc. Méx.* 23(1):69-90.
- Narciso, G. and E. Schmidt. 1999. Identification and classification of sugarcane based on satellite remote sensing. *Proc S Afr Sug Technol Ass* 73:189-194.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 1996. Adaptación de la metodología de zonificación agroecológica de la FAO para aplicaciones a diferentes niveles de zonificación en países de América Latina y el Caribe. **In:** Taller regional sobre aplicaciones de la metodología de zonificación agro-ecológica y los sistemas de información de recursos de tierras en América Latina y El Caribe. Santiago, Chile. 27-46 pp.
- Pérez, Z. A. 2007. Tenencia de la tierra e industria azucarera. Edit. Porrúa, México, 214 p.
- Pontes, P. P. B., J. V. Rocha e R. A. C. Lamparelli. 2005. Análise temporal de índices de índices de vegetação como subsídio à previsto de safras de cana-de-açúcar. *Anais XII SBSR, Goiania, Brasil.* INPE, 217-224 pp.
- PRONAC- SAGARPA. 2007. Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar, México.
- Rahman, R. M. 1995. NDVI Derived Sugarcane Area Identification and Crop Condition Assessment. Dept. of Geography and Environmental Studies, University of Rajshahi Bangladesh, 11 p.
- Comité de la Agroindustria Azucarera (COAAZUCAR). 2008. Estadísticas de la agroindustria azucarera (en línea). Disponible en: <http://www.sagarpa.gob.mx/COAAZUCAR.htm>
- Confederación Nacional de Productores Rurales (CNPR). 2009. Estadísticas de la agroindustria (en línea). Confederación nacional de productores cañeros rurales propietarios A.C., Disponible en: <http://www.caneros.org.mx/estadisticas.htm> (Consultado el 20 de marzo de 2009).
- Da Silva, J. R. and C. Alexandre. 2005. Spatial variability of irrigated corn yield in relation to field topography and soil chemical characteristics. *Precision Agriculture*. 6(5):453-466.
- Epiphanyo, J. C. N., J. M. Gleriani, A. R. Formaggio e B. F. T. Rudorff. 1996. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília*, 31(6):445-454.
- Fauconnier, R. y D. Bassereau. 1975. La caña de azúcar. Técnicas agrícolas y producciones tropicales. Editorial Blume. Barcelona, España. 405 p.
- Galindo, M. G. y L. Olvera. 2005. Inventario agropecuario en la Huasteca Potosina, construcción de cartografía básica y temática para el reordenamiento de las actividades agropecuarias apoyados en PR y SIG. **In:** Memorias del III Congreso Internacional de Ordenación del Territorio. Guadalajara, Jalisco, México.
- García Chávez, L. R. 2008. La agroindustria cañera de México "Libre comercio de edulcorantes" Universidad Autónoma Chapingo 30 p.
- Hernández, C. M. H. 2006. Mapas temáticos de la Huasteca Potosina escala 1:250,000, Proyecto SAGARPA-CONACyT, 2004-CO1-186. México.
- Inman-Bamber, N. G. and D. M. Smith. 2005. Water relations in sugarcane and response to waters deficits. *Fields Crops Research, Australia* 92(2-3):185-202.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2007. Censo agropecuario. Monterrey, México.
- Jiménez, C. A., V. T. Vargas, W. E. Salinas, M. Aguirre B. y D. Rodríguez. 2004. Aptitud agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el sur de Tamaulipas, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, (53):58-74.

- Rudorff, B. F. T. 1990. Dados LANDSAT na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. (En línea) Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto e Aplicações) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 114 p. Disponible en: <http://biblioteca.universia.net/irAREcursodo?page=http%3A%2F%2Fbibdigital.sid.inpe.br%2F-Frep%2Fsid.inpe.br%2Firis%401912%2F2005%2F07.18.22.34.40&id=7276893>
- Salgado S., D. J. Palma, J. Zavala, L. Lagunes, C. Ortiz, M. Castelán, A. Guerrero, E. Aranda, E. Moreno y J. Rincón. 2010. Lotificación del campo cañero: una metodología para iniciar la agricultura de precisión en ingenios de México. *Interciencia*. Venezuela. 35(3):183-190.
- Salgado S., D. J. Palma, J. Zavala, L. Lagunes, M. Castelán, C. Ortiz, J. Juárez, J. Rincón y E. Hernández. 2008. Programa sustentable de fertilización para el ingenio Pujiltilic, Chiapas, México. *Terra Latinoamericana*, 26(4):361-373.
- Sánchez, F. M. 2002. Desarrollo de la producción de caña y azúcar en la republica mexicana. Colegio de Posgraduados. Montecillo Texcoco, Edo. de México 143 p.
- Schmidt, E. J., C. Gers, G. Narciso and P. Frost. 2001. Remote Sensing in the South African Sugar Industry, Proceedings of the XXIV International Society of Sugar Cane Technologists, 24(2):241-246.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2009. Padrón de productores de caña de azúcar (Zafra 2006-2007). Secretaria de Agricultura Pesca y Alimentación SAGARPA. México.
- Simões dos Santos, M., J. Vieira Rocha and R. A. Camargo Lamparelli. 2005. Spectral variables, growth analysis and yield of sugarcane. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, 62(3):199-207.
- Simões dos Santos, M., J. Vieira Rocha e R. A. Camargo Lamparelli. 2003. Análise do comportamento espectral de uma área comercial de cana-de-açúcar em duas safras por meio de radiometria de campo. **In:** Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil, 05-10 abril 2003, INPE, 2 367-2 374 pp.
- Singelmann, P. 2003. La transformación política de México y los gremios cañeros del PRI. *Rev. mexicana de sociología*. Instituto de Investigaciones Sociales. México, 65(1):117-152.
- Ueno, M., Y. Kawamitsu, L. Sun, E. Taira and K. Maeda. 2005. Combined applications of NIR, RS, and GIS for sustainable sugarcane production. *Sugar cane international* 23(4):8-11.
- Xavier, A. C., B. F. T. Rudorff, Y. E. Shimabukuro, L. M. Sugawara Berka and M. A. Moreira. 2006. Multi-temporal analysis of MODIS data to classify sugarcane crop. *International Journal of Remote Sensing*, 27(4):755-768.
- Xavier, A. C., C. A. Vettorazzi e R. E. Machado. 2004. Relação entre índice de área foliar e frações de componentes puros do modelo linear de mistura espectral, usando imagens ETM+/Landsat Eng. Agríc., Jaboticabal, 24(2):421-430.
- Zhang, P., B. Anderson, B. Tan, D. Huang and R. Myneni. 2005. Potential monitoring of crop production using a satellite-based Climate-Variability Impact Index Agricultural and Forest Meteorology 132(4):344-358.