



# **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA**

**PROGRAMAS MULTIDISCIPLINARIOS DE POSGRADO EN CIENCIAS  
AMBIENTALES**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

## **DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**VARIABILIDAD ESPACIAL DE LAS ENFERMEDADES DE LA CAÑA DE AZÚCAR  
EN LA REGIÓN HUASTECA: IMPLICACIONES PARA SU MONITOREO CON  
PERCEPCIÓN REMOTA**

PRESENTA:

**M.C. LUIS ALBERTO OLVERA VARGAS**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DRA. MARÍA GUADALUPE GALINDO MENDOZA**

**ASESORES:**

**DR. RAÚL AGUIRRE GÓMEZ (CO-DIRECTOR)**

**DRA. LAURA YAÑEZ ESPINOSA**

**DR. NOÉ AGUILAR RIVERA**

**SEPTIEMBRE DE 2016**

## **CRÉDITOS INSTITUCIONALES**

**PROYECTO REALIZADO EN:**

**Coordinación para la Innovación y Aplicación de la Ciencia y Tecnología (CIACyT)**

**CON FINANCIAMIENTO DE:**

**Laboratorio Nacional de Geoprocesamiento de Información Fitosanitaria (LaNGIF)**

**A TRAVÉS DEL PROYECTO DENOMINADO:**

**“Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria (SINAVEF)”**

**AGRADEZCO A CONACyT EL OTORGAMIENTO DE LA BECA-TESIS**

**Becario No. 230829**

**EL DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES RECIBE APOYO ATRAVÉS  
DEL PROGRAMA NACIONAL DE POSGRADOS DE CALIDAD (PNPC)**

*Para Haydée y Nico*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por otorgarme la beca.

A la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) por aceptarme y formarme como profesionalista.

Al Programa Multidisciplinario de Posgrados en Ciencias Ambientales, a sus profesores, alumnos y administrativos.

Al Laboratorio Nacional de Geoprocésamiento de Información Fitosanitaria (LaNGIF) y a la Coordinación para la Innovación y Aplicación de la Ciencia y Tecnología (CIACyT).

A mis asesores, la Dra. Guadalupe Galindo Mendoza (LaNGIF) por dirigir esta tesis, apoyarme moral y económicamente y formarme durante todo este tiempo; al Dr. Raúl Aguirre Gómez (UNAM) por co-dirigir la tesis y mostrarme la importancia de la física en la descripción espectral; al Dr. Noé Aguilar Rivera (UV) por ser compañero y amigo y explicarme todo lo referente a la caña de azúcar; a la Dr. Laura Yañez Espinosa, por tenerme paciencia y retroalimentarme con todos los aspectos biológicos; y al Dr. Carlos Contreras Servín por ser sinodal en el examen previo. Al Dr. Hugo Navarro por apoyarme moralmente en la realización y conclusión de este proyecto.

Al Comité de Sanidad e Inocuidad de la Caña de Azúcar (COSICA) de San Luis Potosí en especial al Ing. Francisco Cortina Ruiz y a la Lic. Magda Melgarejo, por el apoyo proporcionado en campo. Al gerente general del ingenio Plan de Ayala Ing. Raúl Juárez, al Ing. Baltasar Peña del Campo, presidente de la Asociación de Cañeros CNPR del Ingenio Alianza Popular y al Ing. Carlos Moctezuma Vega por su apoyo para realizar los vuelos con drones.

A mi esposa Haydée Portillo, por apoyarme y nunca abandonarme, por su amor y comprensión en tantas salidas y ausencias. A mi hijo Nicolás, que ilumino mi vida. Gracias a ustedes valió la pena todo el esfuerzo.

A mi suegra Martha Salazar por cuidar a Nico, por todo su apoyo y amistad. A mi madre Flor Vargas por ser mi guía y principal referencia de superación. A mis hermanas (Paty y May) y sobrinos (Karen y Cesar) que tanto extraño. A mi familia adoptiva: Lilo, Mel, Vic, Deivid, Dany y Rock.

A mis compañeros del pmpca: Bety, Hugo, Ricardo, Carmelo. A mis amigos del LaNGIF: Edgar, Raúl, Joel, Moisés, y especialmente a Gladys y Margarita.

## ÍNDICE

	Págs
Índice de figuras.....	1
Índice de cuadros.....	2
<b>1. Introducción.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Antecedentes.....</b>	<b>7</b>
2.1 Contexto nacional del cultivo de la caña de azúcar.....	8
2.2 Factores de productividad cañera.....	15
2.3 Modelos agrícolas cañeros para la productividad.....	20
<b>3. Marco teórico – metodológico.....</b>	<b>31</b>
3.1 Sensores remotos aplicados a la agricultura.....	33
3.1.1 Características espectrales de la vegetación.....	37
3.1.2 Factores que afectan la reflectancia vegetal.....	41
3.2 Fitosanidad de precisión: vigilancia epidemiológica asistidas por sensores remotos.....	47
3.2.1 Vigilancia pasiva y activa.....	49
3.2.2 Mecanismos de vigilancia.....	50
3.3 Implicaciones metodológicas para el monitoreo con percepción remota de las enfermedades de la caña de azúcar .....	53
3.3.1 Caracterización fenológica de la caña de azúcar y su relación con presencia de plagas y enfermedades.....	57
3.3.2 Mediciones radiométricas hiperespectrales.....	58
3.3.3 Mediciones radiométricas multiespectrales.....	60
3.3.4 Adquisición de imágenes por Vehículos aéreos No Tripulados.....	61
3.3.5 Clasificación de imágenes a partir de firmas espectrales.....	62
<b>4. Caracterización ambiental y biológica de caña de azúcar en la huasteca potosina.....</b>	<b>65</b>
4.1 Localización de la zona de estudio.....	65
4.2 Características ambientales en la zona cañera de la Huasteca potosina... ..	66
4.2.1 Rasgos orográficos.....	66
4.2.2 Rasgos climáticos.....	70
4.2.3 Rasgos de uso de suelo y vegetación.....	74
4.3 Caracterización biológica de las principales plagas y enfermedades de la caña de azúcar.....	76
4.3.1 Barrenador de la caña de azúcar.....	76
4.3.2 Mosca pinta.....	81
4.3.3 Roya anaranjada de la caña de azúcar.....	84
<b>5. Variabilidad espacial de las plagas de la caña de azúcar y su detección a través de sensores hiperespectrales.....</b>	<b>89</b>

5.1 Calendarización de la presencia de plagas y enfermedades en la Huasteca potosina.....	89
5.2 Firmas espectrales.....	95
5.2.1 Diferenciación espectral de variedades de la caña de azúcar.....	97
5.2.2 Diferenciación espectral de las etapas fenológicas de la caña de azúcar.....	100
5.3 Detección de las áreas de riesgo.....	102
<b>6. Variabilidad espacial de las plagas de la caña de azúcar y su detección a través de sensores multiespectrales.....</b>	<b>106</b>
6.1 Firmas espectrales.....	106
6.1 Diferenciación espectral de variedades de la caña de azúcar.....	107
6.2 Crecimiento de superficie cañera.....	111
6.2 Detección de áreas de riesgo.....	113
<b>7. Conclusiones.....</b>	<b>115</b>
<b>8. Referencias.....</b>	<b>117</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Págs
Figura 2.1 Países productores de caña de azúcar.....	7
Figura 2.2 Zonas de abasto cañero en México según región epidemiológica.....	9
Figura 2.3. Aptitud agroecológica al cultivo de caña de azúcar.....	11
Figura 2.4 Variedades o cultivares de caña de azúcar en explotación comercial.....	13
Figura 2.5 Factores limitantes de la productividad del cultivo de caña de azúcar.....	19
Figura 2.6 Integración de técnicas, modelos y datos para la toma de decisiones en la agroindustria azucarera.....	23
Figura 2.7 Plagas de la caña de azúcar.....	28
Figura 2.8 Enfermedades de la caña de azúcar.....	29
Figura 3.1 Ventajas de la agricultura de precisión.....	32
Figura 3.2. Padrones de la reflectancia en distintas coberturas de uso de suelo.....	38
Figura 3.3 Patrón generalizado de la reflectancia de una hoja.....	39
Figura 3.4 Curva espectral vegetal.....	44
Figura 3.5 Etapa fenológica del cultivo y presencia de plaga.....	57
Figura 3.6 Ejemplo de mediciones en parcela.....	59
Figura 4.1. Localización de área de estudio.....	66
Figura 4.2 Hipsométrico.....	67
Figura 4.3 Geología.....	69
Figura 4.4 Edafología.....	71
Figura 4.5 Climas.....	73
Figura 4.6 Vegetación.....	75
Figura 4.7. Distribución nacional del barrenador de la caña de azúcar.....	77
Figura 4.8 a) Daño de la larva de <i>D. saccharalis</i> en tallo y b) Daño de corazón muerto.....	78
Figura 4.9 Ciclo biológico del barrenador de la caña de azúcar.....	80
Figura 4.10 Distribución nacional de la mosca pinta o salivazo.....	82
Figura 4.11 Disminución del área foliar para realizar la fotosíntesis por daños de mosca pinta.....	83
Figura 4.12 Distribución nacional de la roya anaranjada.....	85
Figura 5.1 Daño en tallo de caña de azúcar por <i>D. saccharalis</i> y síntomas de amarillamiento (corazón muerto) en la Huasteca Potosina.....	90
Figura 5.2. Presencia de barrenador ( <i>Diatraea saccharalis</i> y <i>Eoreuma loftini</i> ) respecto al ciclo fenológico de la caña de azúcar.....	91
Figura 5.3 Presencia de mosca pinta ( <i>Aeneolamia contigua</i> Walker) respecto al ciclo fenológico de la caña de azúcar.....	93
Figura 5.4 Presencia de Roya anaranjada ( <i>Puccinia kuehnii</i> ) respecto al ciclo fenológico de la caña de azúcar.....	94
Figura 5.5 Selección de cuadrantes para cada plaga.....	95
Figura 5.6 Localización de muestreo con radiómetro hiperespectral.....	96
Figura 5.7. Respuesta espectral por variedad de caña de azúcar.....	98
Figura 5.8. Clasificación de las variedades de caña de azúcar en la Huasteca potosina.....	99
Figura 5.9 Diferencia entre la superficie calculada por SAM y el porcentaje de superficie por variedad en la Huasteca potosina.....	100
Figura 5.10 Respuesta espectral por etapa fenológica.....	101
Figura 5.11 Clasificación de las etapas fenológicas de la caña de azúcar en la Huasteca potosina.....	102
Figura 5.12 Firmas espectral de las plagas de la caña de azúcar.....	103
Figura 5.13. Clasificación de imagen de satélite en base a biblioteca espectral del barrenador y la	104

roya anaranjada.....	
Figura 6.1 Localización de muestreo con radiómetro multiespectral.....	107
Figura 6.2. Respuesta multiespectral por variedad de caña de azúcar.....	108
Figura 6.3 Clasificación de las variedades de caña de azúcar en la Huasteca potosina a través del sensor multiespectral.....	109
Figura 6.4 Crecimiento de la superficie cañera en México.....	112
Figura 6.5 Crecimiento de la superficie cañera en la Huasteca potosina.....	112
Figura 6.6 Firma espectral de plagas de caña de azúcar.....	114
Figura 6.7 Clasificación de imagen de satélite en base a biblioteca multiespectral del barrenador y la roya anaranjada.....	115

## INDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1 Factores limitantes de la productividad cañera.....	23
Cuadro 3.1 Espectro de reflectancias por tipo de pigmento.....	43
Cuadro 4.1 Características generales de los ingenios cañeros de la Huasteca potosina.....	65
Cuadro 4.2. Daños de <i>D. saccharalis</i> por parte vegetal.....	78
Cuadro 4.3. Grado de infestación en base al muestreo de cogollos o corazones muertos.....	79
Cuadro 5.1 Temporalidad de presencia del barrenador, mosca pinta y roya anaranjada.....	95
Cuadro 5.2 Mediciones con radiómetro hiperespectral en caña de azúcar con problemas de barrenador y roya anaranjada.....	97
Cuadro 6.1 Mediciones con radiómetro multiespectral en caña de azúcar con problemas de barrenador, mosca pinta y roya anaranjada.....	106
Cuadro 6.2 Análisis de efectividad.....	110
Cuadro 6.3 Análisis de efectividad para áreas afectadas por plagas y su variedad de caña de azúcar.....	114

## 1. INTRODUCCIÓN

La incorporación de los Sensores Remotos (SR) en los estudios de agronomía ha aumentado en los últimos 10 años, debido al desarrollo de sensores con mejores resoluciones espectrales y espaciales, usando la información espectral para describir la variación en el espacio de la vegetación o del paisaje (Pettorelli *et al.* 2005; Cabello y Paruelo, 2008).

El uso de SR es eficaz, rápido, no destructivo, y accesible en forma operativa y exacta; permite obtener información de superficies extensas durante una temporada agrícola en numerosas ocasiones para detectar cambios en los procesos fisiológicos y bioquímicos de las plantas, aún con estrés hídrico, nutricional o derivado de afectaciones de plagas, malezas o enfermedades. También permite identificar especies, determinar el estado de salud y vigor vegetal, realizar inventarios de cultivos, analizar la estructura del dosel, todo en un intervalo amplio de escalas. Es decir, el uso de SR permite optimizar las prácticas agrícolas como una función de la variabilidad espacial y temporal dentro de los campos de cultivo, a través de métodos capaces de recuperar con precisión variables biofísicas a nivel dosel registradas por la reflectancia (Elwadie, 2005; Xie *et al.*, 2008).

La utilización de sensores (remotos) portátiles en la agricultura también se han especializado, particularmente los de tipo multi e hiperespectral, ya que a través de éste se puede ver la longitud de onda electromagnética detalladamente en términos de la posición específica de las bandas de absorción, forma del espectro, variabilidad espectral y similitud o diferenciación con otros tipos de vegetación (Rama *et al.*, 2007). Estos sensores, conocidos como espectralradiómetros de campo, se usan para obtener firmas espectrales in situ, que robustecen la calidad del análisis espacial y temporal; en estos sistemas óptico-electrónicos, la radiancia recibida por los componentes ópticos se descompone en un continuo de cientos de bandas, lo cual ofrece una mejora potencial en la evaluación de los cultivos (Shippert, 2004; Reisig y Godfrey, 2007).

La importancia de estos sensores portátiles de campo radica en la obtención pura de la firma espectral del objeto medido, el cual puede correlacionarse con los datos de sensores satelitales, y si son iguales y simultáneas, se puede generar un etiquetado

espectral dentro de la imagen que ayude a la sistematización automática a partir de píxeles de entrenamiento que diferencien características en cultivos de una misma área (Aspinal *et al.*, 2001). Por lo tanto, la organización e integración de estas firmas pueden hacerse partir de la construcción de librerías espectrales (también conocidas como bibliotecas) que pueden dar cuenta de la variabilidad entre especies vegetales y la discriminación entre vegetación sana (o sin daño aparente) y con deficiencias nutrimentales.

El uso de SR en estudios del cultivo de caña de azúcar *Saccharum officinarum* se ha aplicado en numerosos aspectos, debido principalmente a la importancia económica del cultivo y a su distribución espacial que generalmente es simétrica y uniforme. Parte de las aplicaciones son: (1) clasificación y mapeo de caña de azúcar, (2) identificación de etapas fenológicas y grados-día de crecimiento, (3) discriminación de variedades, (4) seguimiento del riego y estrés nutricional, (5) detección de daños por insectos y enfermedades, (6) predicción de rendimientos y (7) manejo de residuos de cosecha. En todos los casos, las aplicaciones que se han ejecutado son con el objetivo de incrementar la productividad (rendimientos y calidad de la cosecha) con la reducción de los costos de producción para mercados cada vez más competitivos (Galvão *et al.* 2006; Abdel *et al.*, 2010).

Según Moore (2009) existen tres tipos de factores limitantes en la productividad de la caña de azúcar: fisiológicos (fenología, dosel, características celulares), ambientales (agua, CO<sub>2</sub>, radiancia, climas, suelos, fertilidad) y agronómicos (malezas, plagas, enfermedades, toxicidad). De estos, las limitantes que más inciden en la productividad son las referentes a las características edafocológicas (32.2%) y la gestión en el manejo de plagas y enfermedades (20.3%) (Aguilar *et al.*, 2010a). Este último proceso, ha afectado en los cultivos de caña de azúcar al nivel de estrés vegetativo, donde la respuesta espectral es ocasionada por cambios bioquímicos a nivel celular y de hoja, que a su vez tienen influencia sobre los sistemas de pigmento y el contenido de humedad. Por otro lado, el estrés puede causar cambios en la estructura de la cobertura, el índice de área foliar (IAF) o la biomasa (Chuvienco, 1996).

La detección de la sanidad de la vegetación depende de la intensa relación entre transformaciones de reflectancia del rojo e infrarrojo y la absorción de la radiación fotosintéticamente activa (APAR) de la superficie de la vegetación (Kumar *et al.*, 2001). Abdullah *et al.*, (2004) proponen que los daños causados por las enfermedades y las plagas se pueden medir por variaciones en el contenido de clorofila de las plantas, las cuales se pueden analizar por cambios en los patrones de las imágenes espectrales tomadas por los satélites. Estas técnicas usan imágenes multiespectrales para detectar las áreas bajo estrés. Los autores citan diferentes fuentes para las que este sistema fue útil en la evaluación de enfermedades (Yang, 2009; Aguilar *et al.* 2010b), y el índice de vegetación diferencial normalizada (NDVI, por su sigla en inglés) fue el parámetro que mejor correlación presentó en la evaluación del estado sanitario de los cultivos.

Se conoce que muchas enfermedades y plagas causan cambios en los pigmentos de las hojas, en los componentes bioquímicos y generan alteraciones metabólicas en hojas infectadas (Lehrer *et al.*, 2007). Estas condiciones patológicas de la planta pueden influir en sus características espectrales del tejido de la hoja y pueden ser detectados en el visible y/o infrarrojo cercano (NIR) del espectro electromagnético. De hecho, las regiones del visible e infrarrojo son conocidos por proporcionar el máximo de información sobre el nivel de estrés fisiológico en las plantas (Xu *et al.*, 2007). Por lo tanto, la diferencia en la reflectancia espectral entre un cultivo sano (o sin daño aparente) y uno afectado por alguna enfermedad o plaga, sirve para diagnosticar el estado de salud de la planta (Palaniswami *et al.*, 2014).

El uso de estas tecnologías ofrece ventajas tanto en la investigación como en la implementación de técnicas, y aun cuando se siguen estudiando sus aplicaciones en los países más desarrollados, en México no se ha logrado establecer una sinergia con los trabajos convencionales de campo. Existe desinterés en el modelado de caña de azúcar utilizando sensores ópticos activos, y para las zonas cañeras, no se dispone de una herramienta que permita caracterizar la problemática asociada a la producción de caña de azúcar y no se ha generado una metodología de percepción remota que permita establecer espacial y cuantitativamente aspectos relevantes como el área ocupada por el cultivo de caña de azúcar, la productividad a nivel zonas de abasto de

los ingenios y predios, la estimación del rendimiento de caña de azúcar y el reconocimiento de plagas o enfermedades (Aguilar *et al.*, 2010b).

En este sentido, en el estudio sobre la variación espacio-temporal de la reflectancia, la radiación solar en las bandas del visible, infrarrojo y los índices de vegetación constituyen enfoques importantes para analizar a nivel geográfico los problemas relacionados con la evaluación de riesgos de plagas y enfermedades, su incidencia, propagación y severidad, así como dar apoyo a las actividades de muestreo y seguimiento que se llevan a cabo en la protección del cultivo de la caña de azúcar.

Por ello, el objetivo de este estudio fue detectar y caracterizar espacialmente los daños ocasionado por algunas plagas y enfermedades de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) a través de sensores remotos, para la detección temprana de problemas fitosanitarios en las zonas cañeras de la región Huasteca.

El uso de metodologías para el seguimiento de problemas sanitarios involucra diferentes actividades de medición en los cultivos de caña de azúcar. Algunos factores importantes en esta tarea son: el consumo de tiempo, intensidad de la labor y dificultad de acceso para recolectar muestras en el campo representativas para la detección de las enfermedades, que permitan su representación espacial y el desarrollo de un modelo de estimación robusto, dada la gran extensión del cultivo. Para esto, aproximarse a la definición de las condiciones que representan la presencia de enfermedades permite complementar los reportes históricos de campo (Rama *et al.*, 2007; Lutman and Perry, 1999; Robert, 1999).

Los sistemas de muestreo deben permitir incluir variables asociadas a los sistemas de trampeo y la presencia de las principales enfermedades de la caña de azúcar, lo cual debe poder complementarse con el dato geográfico sobre el cual se realiza la lectura en el campo. En este sentido, un sistema que permita generar mapas espectrales sobre el seguimiento de los problemas sanitarios es una importante herramienta para identificar el estado de sanitario de una planta, generalmente caracterizando los valores bajos de reflectancia en el espectro electromagnético visible y valores muy altos en el infrarrojo cercano (Auynirundronkool, 2008).

## 2. ANTECEDENTES

La caña de azúcar como materia prima se cultiva en más de 100 países y territorios y la superficie cosechada reportada por FAOSTAT (2014) de 25.78 millones de hectáreas; se distribuye en 10.93 millones de hectáreas en Asia, 10.54 millones en América del Sur, 0.135 millones en Centroamérica, 0.69 en el Caribe, 1.51 millones en África, 0.40 millones en Oceanía y 0.37 millones en América del Norte en países desarrollados y en desarrollo con diverso nivel tecnológico e indicadores de productividad. De estos, los principales países productores son Brasil (36.52 %), India (19.76 %), China (6.97 %), Tailandia (5.05 %), Pakistán (4.06 %), México (2.85 %), Cuba (1.98 %), Indonesia (1.77 %), Filipinas (1.68 %), Estados Unidos (1.44 %), Argentina (1.36 %), Australia (1.31 %), Sudáfrica (1.24 %), Vietnam (1.15 %), Guatemala (0.97 %) y Colombia (0.65 %) (Figura 2.1).

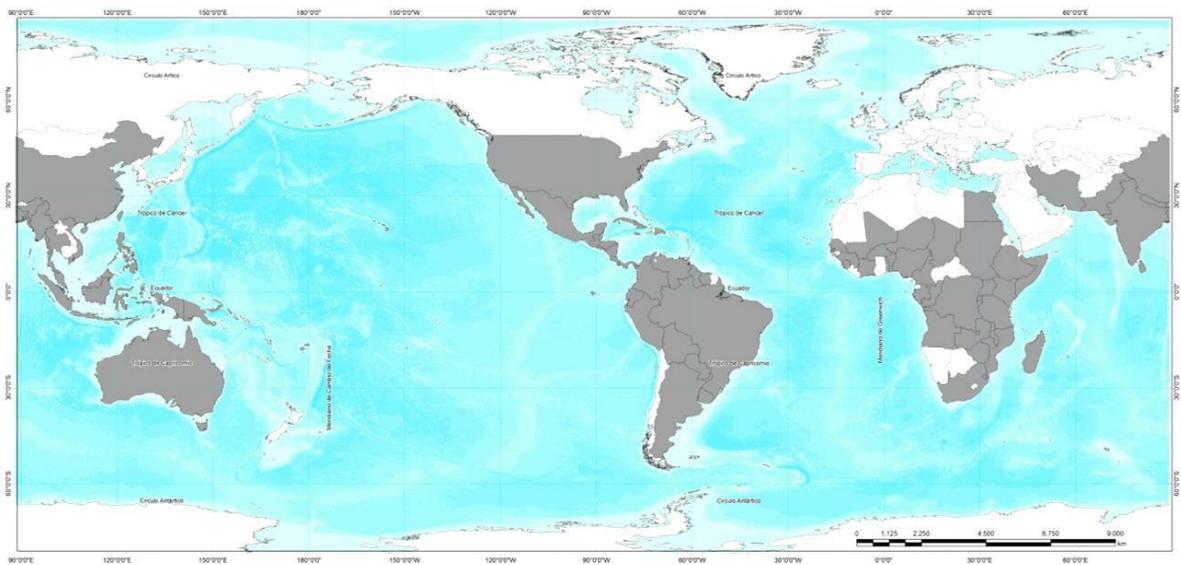


Figura 2.1 Países productores de caña de azúcar (FAOSTAT, 2014)

Así, la caña de azúcar como cultivo agroindustrial tiene probablemente la mayor distribución geográfica. Con algunas excepciones, se cultiva satisfactoriamente en las zonas situadas en las latitudes 30° y 30° Norte Sur del Ecuador (entre los Trópicos de Cáncer y de Capricornio). Sin embargo, la agroindustria de caña de azúcar es sin duda, el agregado de cierto número de regiones productoras separadas, en mayor o menor grado, por barreras naturales y con características agrícolas diferentes; lo que tiene

relación directa con la duración de la estación de cosecha (zafra) y por tanto en la productividad. Por lo tanto, la agroindustria azucarera es una de las más empresas más importantes en el mundo, por la obtención de un producto básico para la alimentación humana de alta calidad y pureza, por su contribución con la generación de empleo especialmente en las áreas rurales y las economías nacionales y regionales que muestra una tendencia de crecimiento en relación a la producción, exportación y consumo de sacarosa marginal, derivado de la competencia comercial con edulcorantes calóricos como el jarabe de maíz de alta fructosa (HFCS) y no calóricos (Aguilar *et al.*, 2016).

## **2.1. Contexto nacional del cultivo de la caña de azúcar**

La caña de azúcar, más que un cultivo y una actividad empresarial, ha representado toda una cultura para México, en virtud de que su presencia ha sido muy amplia e intensa desde el siglo XVI cuando ingresó al territorio nacional procedente de Cuba; la caña ha acompañado a los procesos de colonización y desarrollo del país, y son muchas las formas y manifestaciones a través de las cuales esa planta y sus subproductos han intervenido en el quehacer del pueblo mexicano. A nivel internacional, desde hace varios años México se ubica entre los primeros diez países productores y consumidores de azúcar en el mundo. Sin embargo, es una región productora deficitaria con producción y productividad a la baja (principalmente en el campo cañero), así su calidad como materia prima y la eficiencia en la extracción y recuperación de sacarosa en los ingenios azucareros, con importación creciente de azúcar de tipo refinado y blanco y alta tasa de adopción de Jarabes de Maíz de Alta Fructosa y otros edulcorantes principalmente en la industria de refrescos y bebidas; al mismo tiempo, ha afrontado cíclicas crisis económicas, originadas en un desajuste entre la capacidad de abastecimiento del campo cañero, producción de azúcar y derivados y el consumo nacional. Actualmente la agroindustria azucarera se encuentra espacialmente distribuida en más de 240 municipios productores ubicados en cinco regiones y 15 estados: Región Noroeste (Sinaloa), Región Pacífico (Nayarit, Colima, Jalisco y Michoacán), Región Centro (Morelos y Puebla), Región Noreste (Tamaulipas y San Luis Potosí), Región Golfo (Veracruz Tabasco y Oaxaca) y Región Sureste (Campeche, Chiapas y Quintana Roo) que aportan la materia prima a 54 ingenios

azucareros, destilerías autónoma y trapiches piloncilleros con diversos niveles productivos (Figuras 2.2). Se cultivan aproximadamente 783,000 ha, de las cuales 58% son de temporal y 42% de riego. Las principales entidades federativas que cultivan caña de azúcar son Veracruz (38.5%), Jalisco (11.4%), San Luis Potosí (8.7%), Oaxaca (5.3%), Chiapas (5.3%), Nayarit (3.8%); el resto de los estados participan con 26.7%. El rendimiento promedio de campo en la zafra 2014-2015 fue 69.7 t/ha con un valor de la producción de 30 mil millones equivalentes a casi 50 millones de toneladas cosechadas. Aproximadamente 0.5% del Producto Interno Bruto (PIB) de México corresponde a esta actividad, ya que de ella dependen 400 mil familias con empleos permanentes y temporales (165 mil productores de caña, 176 mil cortadores de caña y trabajadores de campo, 28 mil transportistas, 23 mil obreros sindicalizados, 16 mil personas en labores administrativas); es decir, 2.5 millones de mexicanos dependen directamente de la agroindustria azucarera (SIAP, 2014; SAGARPA, 2014; Aguilar, 2011; PRONAC, 2007).



Figura 2.2 Zonas de abasto cañero en México según región epidemiológica

El cultivo de caña de azúcar requiere, a partir de la siembra, aproximadamente dos años para empezar a producir y alcanzar su máximo de producción, para luego comenzar a decaer a partir del ciclo resoca. La vida de una plantación de caña de azúcar depende principalmente de las condiciones climatológicas, y puede alcanzar, un máximo de siete años o ciclos productivos; por otro lado, debido a que la caña de azúcar debe ser procesada dentro de 24 horas después del corte para maximizar la recuperación de sacarosa, se requiere una estrecha coordinación técnica entre el proceso de cosecha de caña y el proceso de industrialización en el ingenio o trapiche. Debido a este apremio del tiempo, los productores de caña de azúcar no pueden vender sus cosechas a otras agroindustrias, y los ingenios azucareros no pueden comprar materia prima de acuerdo a la mejor oferta en el libre mercado, sin reducir la calidad de la caña. Los altos costos de operación de la fábrica y el imperativo de que la caña se debe moler con el máximo contenido de sacarosa, son factores adicionales que requieren una cuidadosa planificación y coordinación entre productores, organizaciones cañeras y el ingenio para garantizar la plena utilización de la capacidad de molienda. Sin embargo, a pesar de enorme potencial la caña de azúcar se usa en su mayoría para abastecer ingenios azucareros (98.25 %) (Moore 2009, De Sousa, 1993, Gilbert *et al.* 2006)

En relación a la aptitud de tierras al cultivo de caña de azúcar tan solo 19 zonas cañeras (33 %) presenta capacidad productiva por arriba del 10 %, y el resto requiere acciones específicas para incrementar la productividad como desarrollo de variedades para diversos suelos, clima y disponibilidad de agua, optimización de la producción de semilla certificada, manejo agroecológico de plagas y enfermedades de los cañaverales, mecanización de la siembra, cosecha y mejora de la logística de transporte de la caña de azúcar a los ingenios y destilerías, geoposicionamiento y agricultura de sitio específico, capacitación de técnicos y productores, fertirrigación y herramientas de gestión administrativa para el manejo de insumos, maquinaria y mano de obra para producir más, con calidad y con el menor costo posible para alcanzar su productividad potencial y superarla (Figura 2.3) (Aguilar *et al.* 2014).

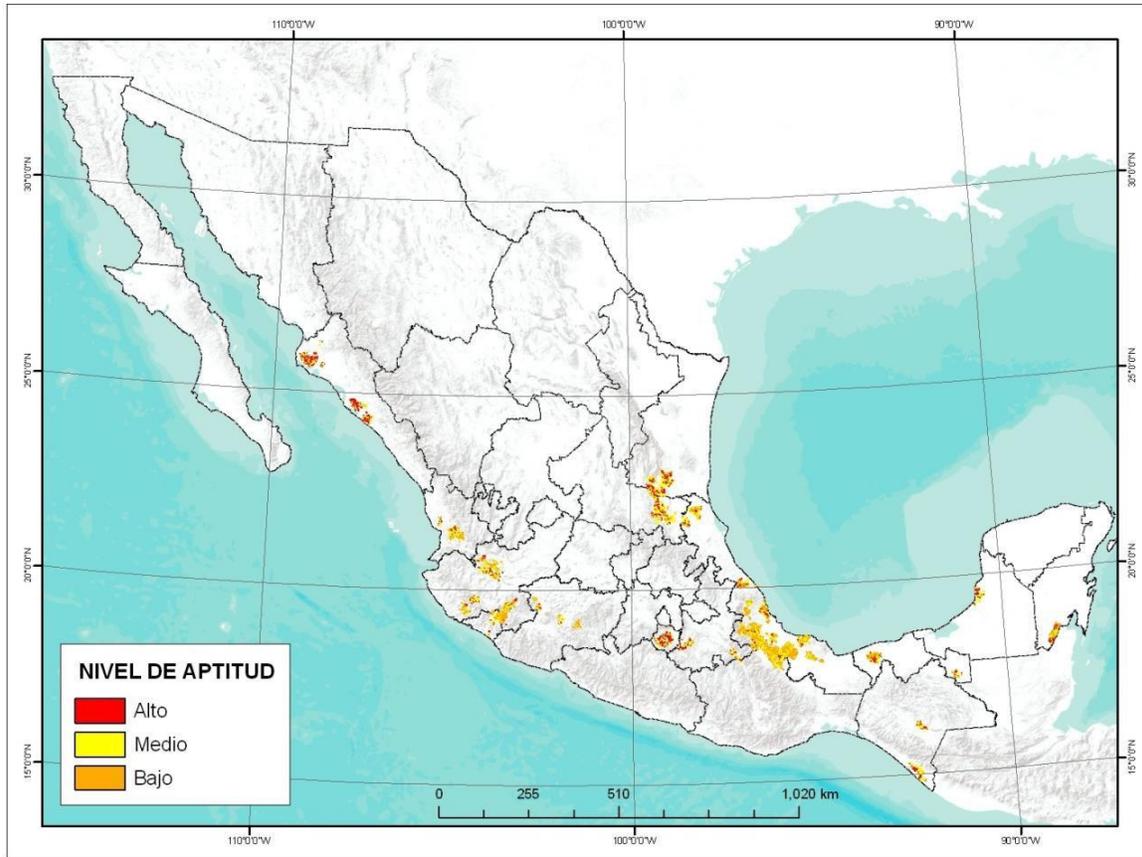


Figura 2.3. Aptitud agroecológica al cultivo de caña de azúcar (Aguilar y Olvera., 2015)

Sin embargo, la agroindustria azucarera mexicana se caracteriza por el uso masivo o socializado de la agricultura cañera, el creciente deterioro de los suelos, deforestación, salinización, compactación, erosión, pérdida de materia orgánica por la cosecha con quema de cañaverales, la gran dependencia de recursos externos (combustible, fertilizante, pesticidas, herbicidas, maquinarias), la cada vez menor respuesta productiva a los fertilizantes y el aumento de plagas, malezas y enfermedades por el rompimiento de las cadenas naturales y la extendida práctica del monocultivo con variedades en ciclo resoca, los cambios climáticos y de los sistemas de vientos por la deforestación, que figuran entre los muchos efectos negativos y el costo ambiental de la llamada agricultura convencional cañera; con el ejido como una estructura ineficiente de tierras, que para finales del siglo XX comenzó un desplome generalizado y en la zafra 2009/2010 presento los indicadores más bajos de su historia reciente; por lo tanto, el modelo de producción cañera o paradigma ideológico tecnológico no funciona como beneficio social y los 54 ingenios azucareros no muestran su potencial productivo

debido a la baja calidad y cantidad de materia que inclusive se cultiva por debajo del umbral económico (40 t/ha) a pesar de la promesa de hacer partícipes a los productores cañeros de los "beneficios" derivados de la riqueza de la caña, un mercado seguro, acceso a créditos, subsidios, seguridad social (IMSS) y para garantizar la estabilidad social sin considerar la productividad y la calidad del producto final. Por otra parte existen otros problemas estructurales como el minifundio presente en el 36% de la superficie cosechada donde el 69% productores tiene menos de 4 ha, donde la fragmentación de tierras y la baja rentabilidad en las economías de escala, el campo cañero es una estrategia de sobrevivencia para gran cantidad de agricultores. Para muchos de ellos la tierra representa identidad, cultura, ingreso y seguridad, ya que el hecho de tener un contrato firmado con el ingenio significa el soporte económico, capacitación técnica, información y financiamiento y a pesar de las continuas crisis de la agroindustria siguen cultivando la caña por el hecho de estar protegidos tanto el productor como su familia en el IMSS, el tener una jubilación para los cañeros ancianos que solamente se consigue al cultivar caña, un precio fijo y seguro por el producto final en cada zafra que no se consigue con otros cultivos más susceptibles a plagas, alta variabilidad climática y compradores monopólicos, la producción de caña es fácil, y finalmente la tradición de cultivar caña y el pertenecer a una organización cañera conserva el derecho de estatus y el apoyo político, algo que los productores libres y otros cultivos no tienen. Estos argumentos han determinado la omnipresencia del estado en las decisiones de la agroindustria (precio de liquidación, precio del azúcar, investigación etc.), pero no han logrado revertir los añejos problemas y son incapaces de responder a las necesidades actuales y pareciera que el sector cañero entro en una parálisis. Esta tesis resulta contundente para todas las regiones cañeras de México, ya que a la hora de tomar la decisión de modernizar la fábrica o el campo, para incrementar la producción de azúcar (producto básico para la población), el estado en su etapa de dueño de la agroindustria o los ingenios optaron por abrir nuevas tierras al cultivo de caña ampliando la frontera agrícola con un alto impacto ambiental.

En las zonas cañeras, se presenta de forma general, fragilidad y vulnerabilidad a los cambios del entorno (plagas, enfermedades, sequias etc), sin capacidad de adaptación derivado de cultivos estresados, sin renovación varietal ya que el 47 % del total de la

superficie está sembrado con dos variedades MEX69-290 y CP72-2086 y los heterogéneos rendimientos de campo obtenidos por la zona de abastecimiento de los ingenios están determinados por el manejo inadecuado del cultivo, principalmente el uso de variedades en declive, problemas de suelo y fertilización, entre otros. Comercialmente en el campo cañero existe poca diversidad de variedades de caña de azúcar, dentro de las cuales existen tempranas, medianas y tardías, aunque las diversas variedades de caña de azúcar se comportan de manera diferente en distintas condiciones de suelo, clima y manejo agronómico y han sido diseñadas para adaptarse a condiciones específicas y como respuesta a ciertas enfermedades y plagas; el problema en la actualidad es que existen mezclas entre dichos materiales, con una situación de envejecimiento (49 % del total nacional en ciclo resoca, 19.6 % en soca) Y desde 1990 no existe un programa formal de desarrollo de variedades (Figura 2.4)

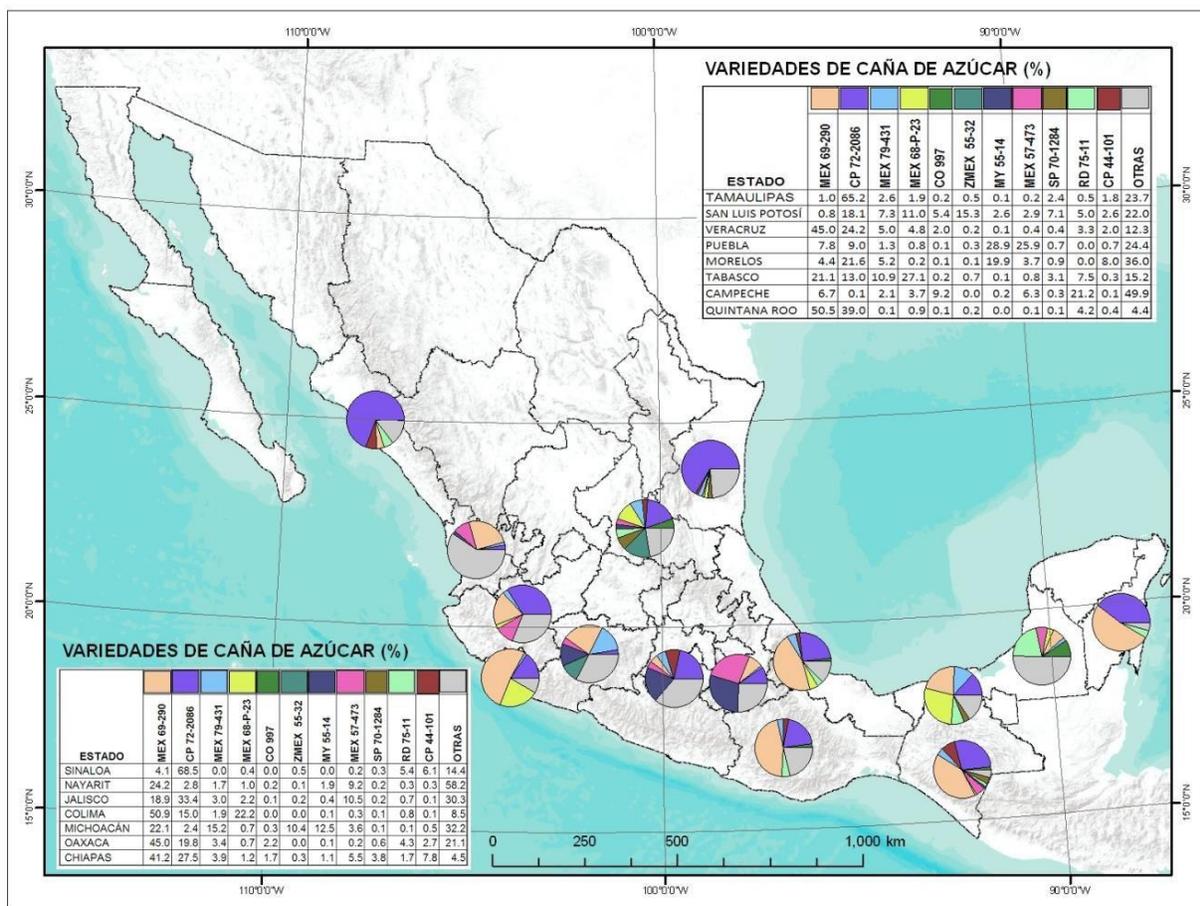


Figura 2.4 Variedades o cultivares de caña de azúcar en explotación comercial (INFOCAÑA, 2014)

La carencia de prácticas innovadoras básicas de mantenimiento del cultivo (abonos orgánicos, cosecha verde, acolchados, agricultura de precisión etc.) hace que se mantenga a la incertidumbre de las pre y liquidaciones finales y el campo se encuentra fragmentado (minifundio), desintegrado, improductivo y sobreexplotado, caracterizado por una agricultura de supervivencia altamente impactante al ambiente por el uso no adecuado de agroquímicos y la quema extendida de cañaverales (alrededor del 90 % de la superficie cosechada).

La sacarosa y el contenido de fibra en la caña depende de una serie de factores, entre ellos la variedad de caña, cantidad y disponibilidad de agua, cantidad, calidad y oportunidad en la aplicación de fertilizantes y agroquímicos, tipo de suelo utilizado para el cultivo, prácticas culturales, condiciones climáticas durante el cultivo, control de plagas, malezas y enfermedades etc. y junto al rendimiento agroindustrial son los indicadores de eficiencia del cultivo de la caña. Cuanto más alto sea el contenido de sacarosa en la caña, más altas serán las perspectivas de recuperación de azúcar en comparación con otros países azucareros en los que México se encuentra en desventaja comparativa y competitiva. Aunque existen diversas opiniones en cuanto a lo que se debe hacer en la nueva agroindustria de la caña de azúcar del siglo XXI a nivel nacional, regional y local en la búsqueda de la sostenibilidad y competitividad, como disminuir los costos de producción de la caña de azúcar, adecuar el marco regulatorio, limitar la extensión de tierras cultivadas, mantener las factorías más productivas, compactar las mejores tierras de los ingenios vecinos, cerrar los ineficientes ingenios reconvirtiendo las tierras a otros cultivos, promover la investigación, la innovación tecnológica y nuevas prácticas agrícolas, así como mejorar sustancialmente la infraestructura de riego y el drenaje agrícola, renegociar las cláusulas del Tratado de Libre Comercio de América del Norte, diversificar el uso de la caña de azúcar y garantizar certidumbre política, económica y social la productividad de la agroindustria azucarera, como factor limitante de la multifuncionalidad cañera (alimentos, energéticos, fibras, función medio ambiental y rural entre otros), como actividad económica estructurante, puede generar múltiples escenarios debido a la multitud de parámetros y puntos de vista de los productores que interactúan a menudo impredecibles y antagónicos; que trae como consecuencia en sus fundamentos teóricos

problemas metodológicos importantes para su abordaje, con el fin de crear alternativas y facilitar sus procesos de decisión y ejecución en un determinado lugar.

La agroindustria de la caña de azúcar en México, como actividad productiva, presenta una estructura rígida conformada por la producción de materia prima, el procesamiento y el consumo y en ella están interrelacionados diversos factores socioeconómicos, ambientales y geopolíticos; su análisis para encontrar alternativas para alcanzar la competitividad debe ser un trabajo interinstitucional y multidisciplinario. Es fundamental analizar y generar proyectos de investigación integrales, por los factores que intervienen como sistema de producción regional.

De lo anterior se infiere que potencialmente existen tantos proyectos de desarrollo para el sector, como posibles combinaciones entre factores existan; y que sería infructuoso tratar de explicarlos a todos en forma detallada, razón por la cual se debe abandonar la idea que existen recetas tecnológicas que al aplicarlas llevarán a obtener el anhelado estado de competitividad mediante la productividad y diversificación de la agroindustria azucarera y que por el contrario, lo que es necesario es que profesionales, líderes cañeros, gobierno, empresarios e investigadores, actúen sinérgicamente para llevar a cabo gestiones e innovaciones tecnológicas para lograrlo.

## **2.2 Factores de productividad cañera**

La evaluación del potencial productivo de la caña de azúcar para los proyectos actuales y futuros, como las biorefinerías y el impacto de diversos factores limitantes como las plagas, malezas y enfermedades es llevado a cabo, generalmente, al finalizar cada zafra anterior a la cosecha, basándose en la experiencia de técnicos, a través de observaciones de campo y muestreos utilizando datos estadísticos de años anteriores, sin considerar la distribución espacial del área plantada y su variabilidad a diversos factores ambientales, lo que trae como consecuencia errores en los estimados de producción, principalmente en zonas agrícolas de gran heterogeneidad, y solo los aspectos de aplicación de fertilizantes y riego en ciclos de plantilla, soca y resoca, constituyen los principales temas de estudio de este cultivo y no se dispone de herramientas como el modelado que permitan caracterizar las problemáticas asociadas a la producción de caña de azúcar en el ámbito regional como percepción remota y

análisis de las fases fenológicas asociadas a factores limitantes agrícolas, edafológicos y climáticos que permita establecer espacial y cuantitativamente el área ocupada por el cultivo de caña de azúcar y su relación con los factores limitantes climáticos y edafológicos a la productividad (precipitación, evapotranspiración, ENSO, tipo de suelos, altitud, pendiente, plagas, etc). Los sistemas agrícolas se caracterizan por complejas interacciones entre una variedad de factores económicos, ambientales y sociales. Esta complejidad ha llevado a la búsqueda de formas en que el conocimiento científico pueda ser incorporado para que los actores de la agroindustria puedan utilizarlo en la gestión y toma de decisiones. En este sentido, el campo cañero es el área de abastecimiento de caña que cada ingenio azucarero tiene delimitado en un cierto perímetro. También se denomina zona de abastecimiento, al área geográfica donde se ubican los terrenos de los productores de materia prima de cada ingenio, por otra parte, la unidad productiva cañera es la unidad económica fundamentada en la familia campesina, que desarrolla diversas actividades y entre las más importantes en cuanto al ingreso es la producción de caña de azúcar que se caracterizan por articulaciones e interrelaciones productivas, técnico-económicas y políticas, así como asimetrías económicas con los agentes participantes de la agroindustria azucarera (Sánchez, 2003).

Actualmente la caña de azúcar, como cultivo agroindustrial, ha sido revalorizado por su potencial para la obtención de energéticos y biocombustibles, en este sentido, para evaluar el potencial de producir derivados de caña de azúcar como bioetanol y/o electricidad entre otros en los ingenios azucareros, destilerías o en la unidad productiva agrícola, se requiere determinar el potencial actual y la expansión espacial del sector caña de azúcar. Lo anterior debe tener en cuenta a las múltiples variables relacionadas con dicho crecimiento mediante el uso de técnicas de análisis espacial. Esto permitirá integrar todos los aspectos relevantes a considerar al tener una visión espacial de los factores limitantes de gran dispersión espacial e impacto (sociales, culturales, económicos, biológicos, climáticos, geofísicos, etc.). Por lo tanto, para Waclawovsky *et al.* (2010) la obtención de altos rendimientos es la clave para el desarrollo de cultivos energéticos como la caña de azúcar y la generación de subproductos agrícolas que permitan la sostenibilidad y eviten la competencia con la producción de alimentos, es

decir, un incremento en la producción de etanol u otros derivados de la caña de azúcar, sin disminución de la producción de azúcar, debe ser logrado mediante el incremento del rendimiento existente en los cultivos de caña de azúcar.

En relación con lo anterior, la experimentación tradicional de campo ha proporcionado el conocimiento empírico de los efectos de clima, suelo, variedades, manejo, y los factores derivados de sus interacciones en la productividad de la caña de azúcar. La comparación de datos experimentales a través de unidades de manejo puede permitir la identificación de limitantes a la producción. Sin embargo, por su propia naturaleza, la experimentación no puede "mostrar" el número infinito de combinaciones de los factores de impacto de la productividad. Por lo tanto, existe la necesidad de cuantificar la importancia de diferentes procesos fisiológicos, tipos de suelo y los elementos climáticos en su contribución a la variación de rendimientos, e incorporar estas relaciones en los modelos de crecimiento espacial en una forma cuantitativa para ayudar a entender el comportamiento de los sistemas agrícolas complejos (Robertson *et al.*, 1996). Dicha información es básica en el diseño de estrategias regionales de desarrollo agrícola.

Según Romero (2009) el rendimiento de campo (productividad) y la rentabilidad de la caña de azúcar es consecuencia de la interacción de múltiples variables cuyo tipo, magnitud e intensidad, son función de las características del marco físico y socioeconómico de cada terreno o sitio de interés. Por su origen, es factible agrupar a estas variables en tres diferentes factores:

- a) Factores humanos: son inherentes a la actividad de los grupos humanos e interfieren o condicionan la producción, ya sea de manera directa o indirecta; algunas variables son la disponibilidad de crédito (en tiempo y forma), mano de obra, costos y precio de venta de la cosecha, y tenencia de la tierra, entre otras.
- b) Factores ambientales: condiciones de clima y suelo que predominan en el sitio de interés; algunas variables son la profundidad del suelo, textura, ambiente químico, frecuencia e intensidad de la lluvia, velocidad de infiltración, temperatura, y presión de vapor, entre otras.

c) Factores agronómicos: variables que se modifican o controlan a través de las acciones que se llevan a cabo mediante el manejo agronómico. Ejemplo de ellas son la humedad del suelo, presencia de plagas, arvenses nocivas y enfermedades, disponibilidad nutrimental, entre otros.

Por otra parte, la aptitud agroclimática al cultivo de caña de azúcar en las zonas de abastecimiento, tiene un impacto importante ya que determina la capacidad del territorio para producir materia prima, en cantidad y calidad, por ciclo productivo y expandir la frontera agrícola actual. Estos efectos están estrechamente vinculados con la calidad del suelo, las condiciones climáticas y la afectación por plagas bajo régimen de temporal. Por lo tanto, existe un fuerte vínculo entre la aptitud y el tipo de gestión agrícola que determina el desarrollo agrícola en la región.

Si bien las regiones agroecológicas (determinantes biológicos, químicos y físicos que tienen tiempos, condiciones y procesos independientes de lo económico) tienen un impacto significativo sobre la productividad de las explotaciones agrícolas tradicionales sin disminuir la entrega de caña para el ingenio debido a la disponibilidad de recursos a nivel familiar (fuerza de trabajo, tierra, agua, y capital); en este sentido, la productividad creciente del campo permitiría una mayor cantidad de subproductos para otras producciones o ingresos.

Por otro lado, en relación a la planta de caña de azúcar, su conformación anatómica y las características fisiológicas propias de la especie, proporcionan los atributos necesarios y suficientes para caracterizarla como una planta altamente eficiente, lo que favorece su capacidad de adaptación. Sin embargo, para manifestar su máximo potencial productivo, la caña requiere de un estudio preciso de las condiciones ambientales, meteorológicas, edafológicas óptimas manejo, región climática, tipo de suelo, tipo de cultivar (Moore, 2009; FAO, 2009). Los factores que limitan la productividad de este cultivo se presentan en la Figura 2.4.

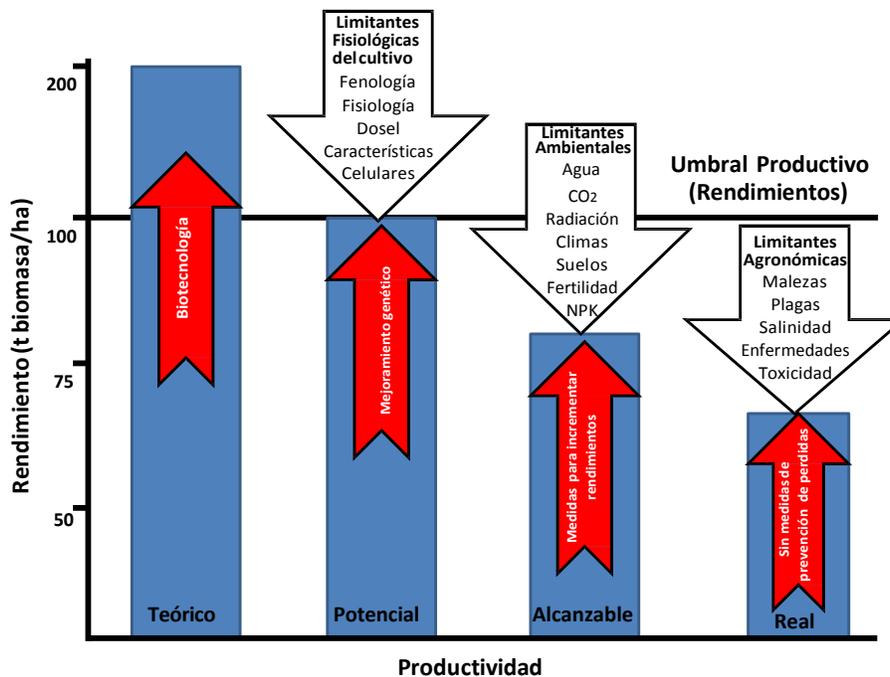


Figura 2.4 Factores limitantes de la productividad del cultivo de caña de azúcar (Traducido de Moore, 2009)

En relación a los factores anteriores, Kropff, (1997) estableció que la producción potencial de biomasa y sacarosa se logra cuando se dispone de humedad suficiente, pero también depende del fotoperiodo, la estructura y arquitectura de tallos y hojas, de la densidad de población y de la distribución de los tallos.

La producción alcanzable u obtenible depende de la acción de los factores que limitan a la producción potencial como son la disponibilidad de agua y de nutrientes. Estos factores se manifiestan en problemas para el cultivo, y son:

- La disponibilidad de agua y su suministro; es decir, la cantidad, frecuencia e intensidad de las lluvias, la disponibilidad y eficiencia del riego y la calidad del agua.
- Las características físicas y químicas del suelo: textura, estructura, profundidad, pH, salinidad y sodicidad
- La presencia de niveles freáticos elevados que son nocivos para el cultivo, lo que se relaciona con la existencia, profundidad, separación y eficacia de un sistema de drenaje.

- Los factores que se derivan del genotipo de caña, como floración temprana y el grado de erección del tallo.
- Un clima ideal para el cultivo de caña es el que presenta dos estaciones distintas: una caliente y húmeda, para proporcionar la germinación, el amacollado y el desarrollo vegetativo, seguida de otra fría y seca, para lograr la madurez y la consecuente acumulación de sacarosa en los tallos.

La producción real depende de la acción de los factores que reducen la producción obtenible o potencial:

- Arvenses nocivas, plagas, enfermedades, agentes contaminantes, fenómenos naturales (inundaciones, heladas, huracanes y quemas accidentales).
- Tecnología; por ejemplo, la disponibilidad de la infraestructura de riego y de drenaje, mecanización y el conocimiento del sistema.
- Administración, en lo relacionado con el manejo del cultivo.
- Factores ambientales, políticos, sociales y económicos.

Esto plantea enormes desafíos, principalmente por la falta de un adecuado desarrollo financiero, insuficiente base tecnológica y de investigación, debilidad institucional, nula capacidad de gestión, carencia de mano de obra calificada y diferencias conceptuales entre la comunidad científica agrícola en relación con el cultivo de caña y en general con la agroindustria. A este respecto, la información para el análisis del sector, se encuentra dispersa en diversas fuentes y es abordada por metodologías disciplinarias para el manejo de datos o indicadores. Lo anterior la hace heterogénea y poco robusta en sus conclusiones y esta falta de criterios impide el análisis comparativo y, con demasiada frecuencia conduce a la interpretación errónea de los resultados de la agroindustria.

### **2.3 Modelos agrícolas cañeros para productividad**

Los modelos de cultivos han sido diseñados para combinar la variabilidad climática, y las respuestas de las propiedades físico-químicas del suelo y fisiológicas de la vegetación, para explicar las diferencias de la vegetación ante el estrés, el crecimiento del dosel, y la productividad. Existen muchos modelos para predecir cómo las cosechas

responden al clima, nutrientes, agua, luz, plagas, etc. (Zhao *et al.*, 2010, Thorp, 2010 y Curran, 2001).

Las técnicas de percepción remota y el desarrollo de modelos en sistemas de información geográfica para determinar la composición bioquímica foliar, para el monitoreo de la productividad de cultivos a nivel unidad productiva y escala regional, fueron desarrolladas a gran velocidad durante 1980 y 1990, principalmente en dosel forestal y posteriormente en cereales y otros cultivos como las plantaciones cañeras (Bezuidenhout y Singels, 2007, Abdel-Rahman *et al.*, 2008).

Por lo tanto, los métodos de monitoreo en tiempo real en caña de azúcar requieren: (1) mejorar nuestra comprensión de la dinámica de los sistemas de producción; (2) servir como un sistema de alerta temprana, lo que permite acciones correctivas o preventivas más oportunas; y (3) proporcionar puntos de referencia para dar seguimiento a los cambios en el rendimiento cañero y los factores limitantes (Abdel-Rahman, 2010).

Las técnicas de percepción remota son eficaces, rápidas, no destructivas, y accesibles en forma operativa y exacta. Permiten adquirir información de extensas superficies durante una temporada agrícola en numerosas ocasiones para detectar cambios en los procesos fisiológicos y bioquímicos como fijación de carbono, producción primaria bruta (GPP), índice de área foliar (LAI), radiación fotosintéticamente activa (PAR), evapotranspiración (ET), ciclo de nutrientes (N, K, P, Ca, Mg), productividad primaria neta (NPP), materia seca, estrés hídrico, nutrimental o derivado de plagas, malezas o enfermedades; asimismo, permite la identificación de especies, la determinación del estado de salud y vigor vegetal, el posicionamiento in situ, el inventario de cultivos, el análisis de la estructura del dosel, en un amplio margen de escalas al incorporar conocimientos de matemáticas, física, química y biología en un contexto de agricultura de precisión. Es decir, optimizar las prácticas culturales como una función de la variabilidad espacial y temporal dentro de los campos de cultivo, requiere desarrollar métodos capaces de recuperar con precisión variables biofísicas, socioeconómicas e impactos a nivel dosel y regiones productoras registradas de la señal de reflectancia por plataformas de teleobservación y posteriormente integrarlas y procesarlas en modelos para la toma de decisiones (Olvera *et al.*, 2010; O'Leary, 2000)

- La Percepción Remota se enfoca en la exploración de la superficie de la tierra a través de imágenes obtenidas desde satélites y plataformas aéreas, a diferentes niveles de detalle espacial y espectral que posibilitan la extracción de diversa información ambiental, su clasificación y el monitoreo.
- Los Sistemas de información Geográfica representan una excelente plataforma para el tratamiento de la información fitosanitaria, ya que permiten almacenar, capturar, analizar y representar dentro de una misma interface y de manera integrada, la información espacialmente georeferenciada. Esta capacidad de análisis, permite descubrir relaciones entre diversas variables que influyen en la aparición de plagas y enfermedades, encontrar patrones de distribución y determinar tendencias de comportamiento en la difusión de las diversas plagas; todo ello a través de un lenguaje visual como son los mapas.
- El modelado es la fase final del análisis espacial, e incluye procedimientos para probar las hipótesis acerca de las causas de las enfermedades y los procedimientos de su transmisión. En general, el modelado incluye la integración de los SIG con métodos estadísticos, información epidemiológica, agroclimática, imágenes de satélite y datos que puedan explicar las relaciones espaciales entre plantas y plagas que influyen en la aparición y difusión de enfermedades (Smith, *et al.*, 2009). El modelado debe contar con información que refleje la situación de las plagas en la escala correcta en la que se requiera hacer el análisis para hacer el seguimiento de la dinámica y problemas fitosanitarios (Figura 2.5).

La caña de azúcar (ha evolucionado para resistir diversos factores limitantes que son comunes en ambientes semi-tropicales y afectan el cultivo. Entre estos, los factores limitantes bióticos de la productividad cañera: enfermedades, plagas, roedores y malezas y las restricciones abióticas como la sequía, inundaciones, estrés salino (salinidad y alcalinidad), heladas, bajas temperaturas, deficiencia de minerales y vientos. Estos factores limitantes individuales o en conjunto afectan a la calidad y producción de caña de azúcar (Tabla 2.1).

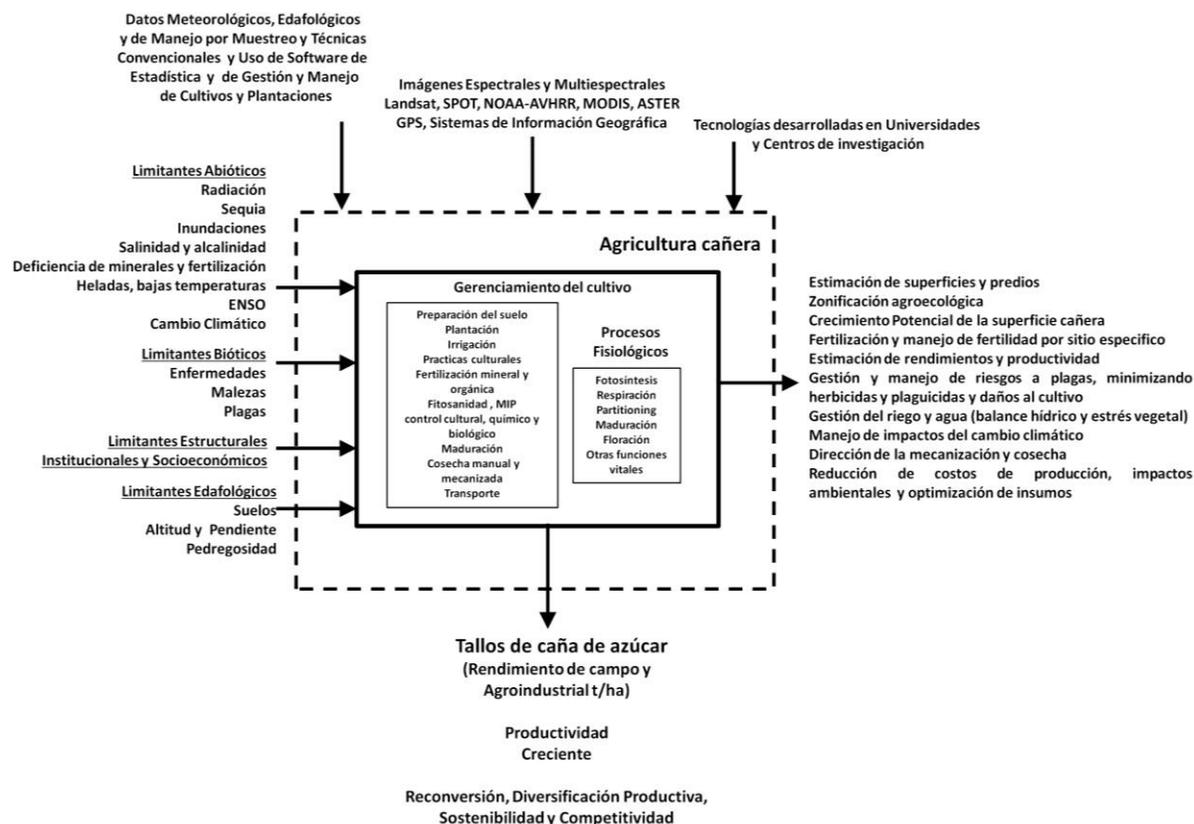


Figura 2.5 Integración de técnicas, modelos y datos para la toma de decisiones en la agroindustria azucarera (Aguilar *et al.*, 2016).

Tabla 2.1 Factores limitantes de la productividad cañera (Solomon, 1996)

<b>Factor Limitante</b>	<b>Porcentaje de pérdida de productividad de la caña</b>
Estrés abiótico	67-100 %
Sequia	15-20
Inundación	15-20
salinidad y alcalinidad	10-20
heladas, bajas temperaturas	2-7
deficiencia de minerales y fertilización	25-45
Estrés biótico	14-20 %
malezas	10-15
enfermedades	2-5
Plagas	2-5

En los últimos tiempos, las enfermedades y las plagas están planteando grandes amenazas para la producción de caña de azúcar. Las pérdidas colectivas varían de 15 a 20% en términos de calidad y cantidad y los cambios en el clima pueden generar

modificaciones en la distribución geográfica de las enfermedades y plagas, alterando el actual escenario fitosanitario de la agricultura cañera, es decir, desde un punto de vista integral, las enfermedades y plagas de los cultivos cañeros, generan un ambiente particular, que se modificarán en función del cambio climático y en las proyecciones de los escenarios climáticos del futuro se producirán cambios en la distribución espacial de los problemas fitosanitarios asociados a los cultivos de caña de azúcar. Por lo tanto, la fitoprotección del cultivo de la caña de azúcar requiere de la aplicación de modernas herramientas y procedimientos tecnológicos con la finalidad de mantener la vigilancia y facilitar el proceso de toma de decisiones en el control fitosanitario (Balmaseda y Romero, 2012).

La situación actual del combate de plagas en las zonas cañeras establece que el uso de insecticidas no siempre es efectivo, la dosis de insecticidas y plaguicidas se aplica por lo regular sin evaluaciones previas aumentando el número de aplicaciones y a mediano plazo con problemas de resistencia a insecticidas, reducción de la presencia de insectos benéficos e incremento de los costos de producción. Por lo tanto, las pérdidas de rendimiento debido a la infestación pueden ser considerables dependiendo de la variedad y ciclo fenológico y manejo del cultivo y está en función del comportamiento de la producción y el riesgo ambiental en los distintos niveles de control en el cultivo comercial, ya que las formas de manejo del suelo, la profundidad y la densidad de plantación, riego, clima, control de la maduración, vigilancia y el pronóstico de plagas y enfermedades etc., Como en todo sistema agrícola complejo, los problemas fitosanitarios de importancia económica, causados por organismos o agentes nocivos que forman plagas en un determinado tiempo y espacio, son uno de los diversos factores limitantes que han reducido la producción agrícola, lo que ha conllevado a problemas sociales, políticos, económicos, ecológicos y ambientales. En este caso, las principales causas de los problemas fitosanitarios, como el principal obstáculo que tienen las actividades agrícolas, en su producción y comercialización nacional e internacional, se han referido clásicamente a un triángulo con vértices a la plaga, el hospedero y el medio ambiente climático o favorable (medio ambiente hospedero y patógeno); los cuales interactúan en medio de las relaciones ecológicas

que se establecen entre los distintos seres vivos provocando problemas fitosanitarios en la economía agroindustrial.

Dentro de los sistemas productivos cañeros, se define a la amenaza dentro del enfoque fitosanitario como la probabilidad de que un cierto fenómeno destructivo pueda ocurrir en un espacio y tiempo determinado, es decir, como la agresividad del fenómeno en términos absolutos de magnitud, intensidad, frecuencia y la cobertura espacial, en este caso se puede decir que una amenaza o peligro biológico se consideraría a los brotes de enfermedades epidemiológicas de origen vegetal o plagas de insectos e infestaciones masivas; y la vulnerabilidad sería la susceptibilidad de sufrir daño económico o social, así como el grado de preparación de las personas para recuperarse, ubicada en un área y momento dado, finalmente el Riesgo sería la probabilidad de ocurrencia de daños, pérdidas o efectos indeseables sobre sistemas agrícolas como consecuencia del impacto de eventos o fenómenos perturbadores (plagas y/o enfermedades). Es así, que la existencia de un riesgo implica la presencia de un agente perturbador en este caso una plaga, que tenga la probabilidad de ocasionar daños económicos en cuestión de producción agrícola a tal grado que constituya un desastre fitosanitario.

Sin embargo es difícil llegar a estimar o evaluar el riesgo total, ya que en algunos casos se carece de información ya sea para estimar la vulnerabilidad o amenaza, puesto que es común que el riesgo sea estimado solamente en términos físicos. Según Cardona (1993) el alcance de los estudios y el tipo de metodologías para la identificación, evaluación de peligros, amenazas, análisis de vulnerabilidad y de riesgos dependen de:

- La escala del espacio geográfico involucrado
- El tipo de decisiones de mitigación que se esperan tomar
- La información disponible, factible y justificable de adquirir
- La importancia económica y social de los elementos expuestos
- La consistencia entre los niveles de resolución posibles de obtener en cada etapa de la evaluación.

El combate y manejo de plagas exige un conocimiento científico de las mismas, a través de técnicas de taxonomía y bioecología; monitorizar su crecimiento; ejercer un control de las variedades, utilizando las más resistentes; favorecer el control del cultivo a través de técnicas mecánicas y fitotécnicas, así como el control biológico, con sus enemigos naturales, y el químico, con insecticidas de baja toxicidad. La lucha contra las plagas no es nada nuevo. Lo que existe es un trabajo para combinar el tratamiento químico y el biológico, que debe mejorar el panorama de la caña de azúcar por lo que respecta al control de las plagas.

Las plagas mantienen una estrecha relación con el clima, por lo que las variaciones de éste pueden afectar la distribución espacial de los problemas fitosanitarios al favorecer condiciones para el establecimiento de las plagas. El cambio climático, las oscilaciones de temperatura, las sequías o las inundaciones más severas causadas por fenómenos de El Niño, la Niña o los huracanes, que pueden además ser medios de transporte de organismos patógenos, son fenómenos que no pueden ser entendidos si no se tiene una perspectiva mundial o regional de la problemática (Dawson *et al.*, 2014; Singels *et al.*, 2013, Deressa *et al.*, 2005)

Actualmente, se han desarrollado estudios científicos en particular, la agricultura de precisión, sobre problemas ambientales como los desastres fitosanitarios con apoyo de nuevas tecnologías computacionales como son los Sistemas de Información Geográfica, percepción remota y las técnicas de análisis multicriterio (Galindo *et al.*, 2011, 2009) con la finalidad de evaluar la dinámica espacial de plagas y enfermedades que se presentan en las regiones agrícolas que cuentan con sistemas productos de importancia económica. Es decir, la necesidad de desarrollar modelos espaciales como los mapas de riesgo para la toma de decisiones, ha generado el requerimiento de sistemas que posean la capacidad de manipular extensas bases de datos espaciales y temporales que permitan el manejo computacional de criterios, factores limitantes (medio ambiente, economía y sociedad) y modelos biológicos con el objetivo de llegar a evaluar la amenaza y el riesgo en relación con ciertas variables ya sean cuantitativas o cualitativas así como también en la prevención de los desastres fitosanitarios y/o planificación.

A partir de la información generada por el modelado con imágenes satelitales y técnicas de geoprocésamiento en sistemas de información geográfica (SIG) y sistemas de geoposicionamiento global (GPS) y otras herramientas como plataformas de vigilancia productiva o epidemiológica inclusive con la sinergia con las técnicas actuales de muestreo convencional, se pueden derivar varios productos y ventajas y las posibilidades de aplicación de estos sistemas son muy variadas, aunque en diferentes grados y con distinta efectividad, por otra parte, la identificación, evaluación y modelado de zonas productivas cañeras se dificulta debido al (a) tamaño pequeño de los predios, (b) la diversidad de cultivos establecidos en un área, (c) gran variabilidad de predio a predio en relación con fechas de siembra y cosecha, prácticas culturales y manejo de cultivos, (d) grandes áreas bajo temporal o secano con pobre desarrollo foliar, (e) cultivos intercalados y/o mixtos, y (f) amplia cobertura de nubes durante la temporada del cultivo de interés (Dadhwal, 2002).

En el plano ambiental, la localización geográfica de las zonas cañeras en México, las condiciones físicas y climáticas de su entorno, así como las variedades cultivadas, la hacen vulnerable al establecimiento de plagas y enfermedades donde el 12 % de la superficie presenta mosca pinta (*Aeneolamia spp.*), 7 % con gusano barrenador (*Diatraea saccharalis*), 4 % de rata cañera (*Sigmodon hispidus*) y el restante a otras plagas y enfermedades que afectan la maduración, el contenido de azúcar y la productividad con prevalencia del control químico (30%) o sin control (60%) del total de la superficie cañera (Figuras 2.6 y 2.7).

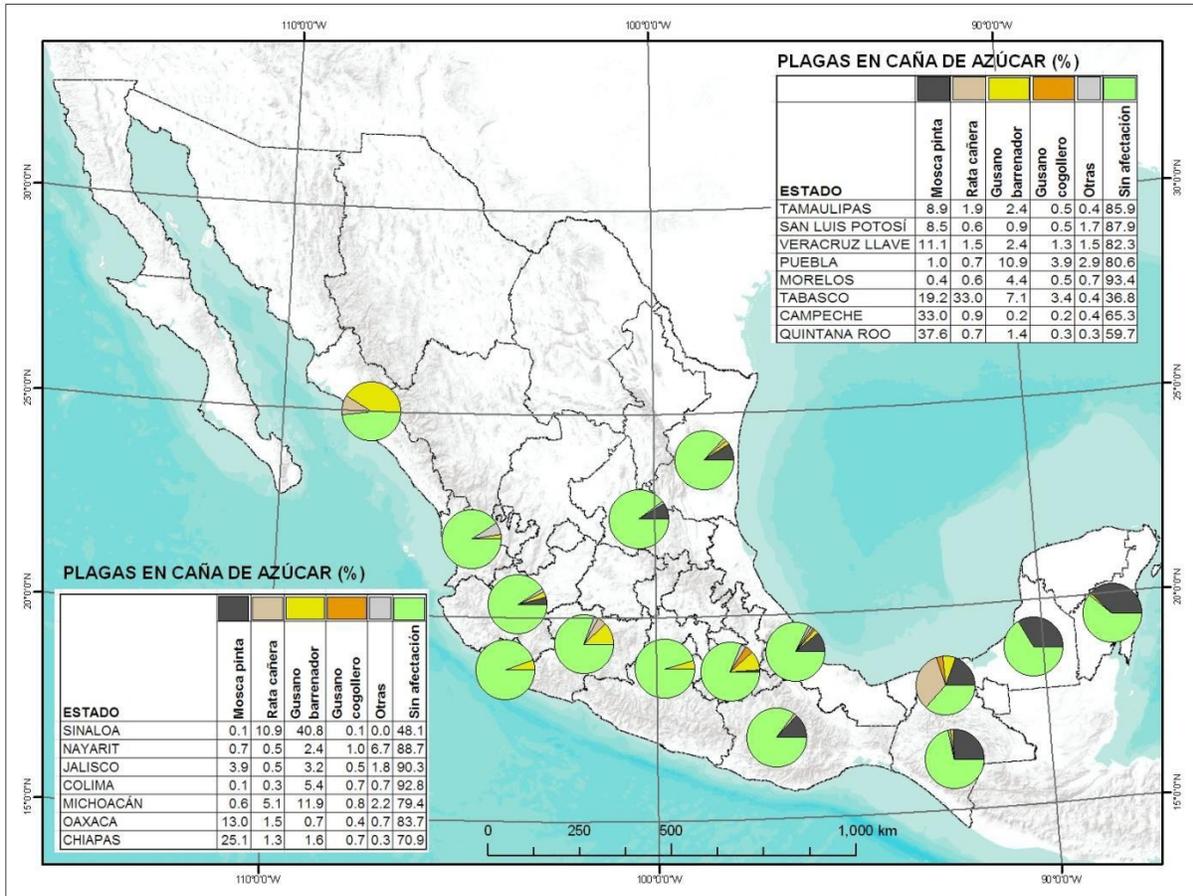


Figura 2.6 Plagas de la caña de azúcar (INFOCAÑA, 2014)

Por lo anterior es fundamental la necesidad de contar con un sistema informático o plataforma de vigilancia epidemiológica (distribución y propagación) orientado a proveer información de organismos que pudieran afectar la sanidad vegetal del cultivo de caña de azúcar a través de un monitoreo sistemático, activo y continuo del daño o posibles daños causados por plaga, enfermedad y/o por factores ambientales asociados a éstos, brindando la posibilidad de actuar, de manera rápida y expedita en la atención de las contingencias en función del riesgo que llegaran a presentarse integrando recursos científicos, tecnológicos y técnicos para realizar, de manera conjunta, la vigilancia epidemiológica fitosanitaria el modelado y los pronósticos de riesgo sobre plagas y enfermedades en las zonas cañeras de México, funja como un elemento estratégico dentro de las políticas de desarrollo agropecuario y constituya un instrumento de vital importancia, para que los productores y los diferentes actores sociales que participan en el proceso de vigilancia, puedan identificar, medir y analizar los indicadores que

advierten sobre la necesidad de intervención y tomar decisiones fundamentadas para evitar el establecimiento de plagas y enfermedades o su posible dispersión.

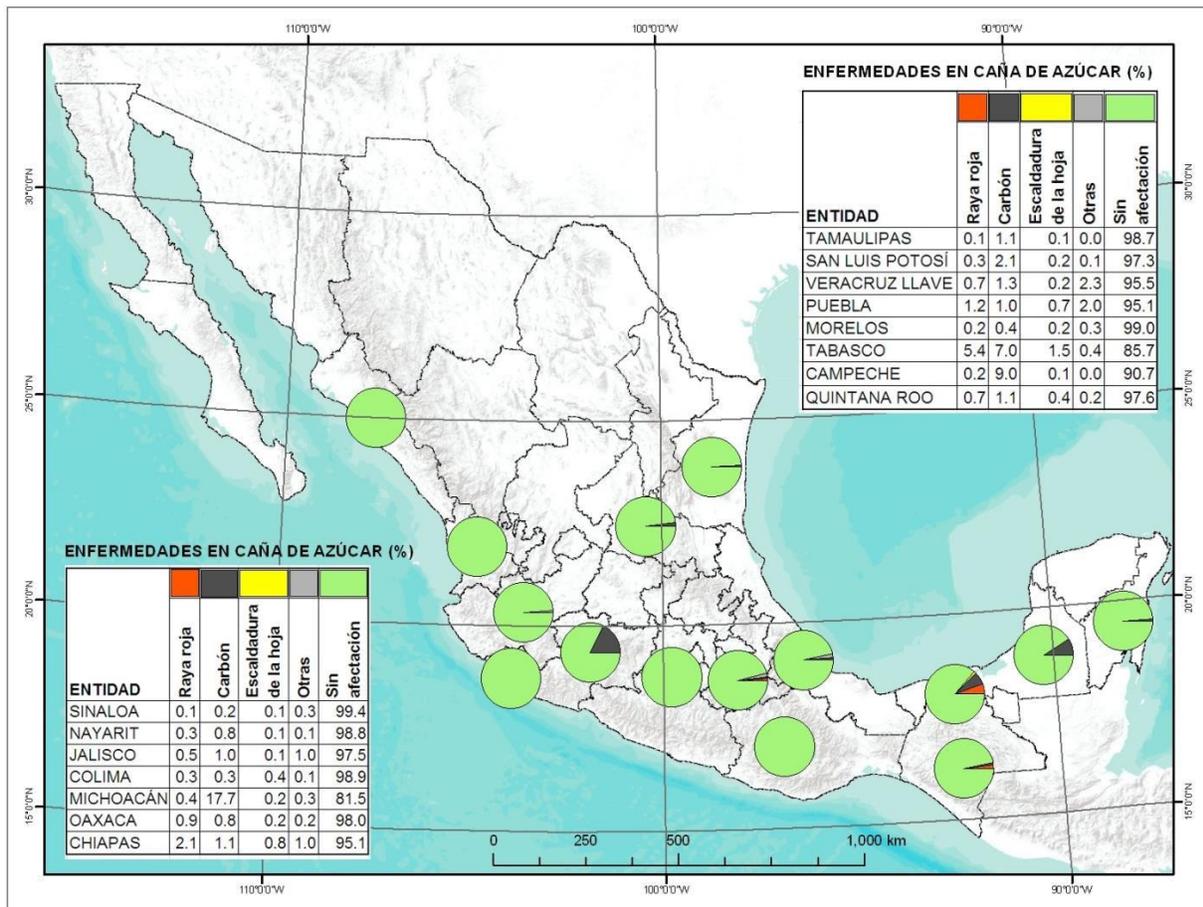


Figura 2.7 Enfermedades de la caña de azúcar (INFOCAÑA, 2014)

Las condiciones socioeconómicas de la producción cañera denotan la importancia que tiene este cultivo para México, pero también las condiciones ambientales muestran un sistema producto sensible y susceptible a ser dañado por plagas y enfermedades, por lo que contar con sistema de vigilancia que permita aportar información oportuna acerca de los riesgos fitosanitarios asociados con la caña, representa un elemento estratégico para mitigar los daños proveer elementos para la planeación, programación y evaluación de actividades e intervenciones en sanidad vegetal para tomar decisiones y mitigar los daños (Aguilar, 2012). Si se cuantifica la variabilidad de los factores productivos que inciden en el desarrollo de plagas cañeras se puede hacer un manejo más eficiente del cultivo, el cual permita la aplicación de insumos de acuerdo con las

necesidades y el potencial de cada punto, con lo que se puede estar en condiciones de recurrir a las técnicas de la agricultura de precisión (AP). Por lo tanto, los métodos alternativos de gestión de plagas y fitosanidad podrían ser muy beneficiosos al generar bases de datos con información georeferenciada para realizar cartografía y análisis de y permitan monitorear los riesgos asociados a la producción que impactan significativamente en los rendimientos y calidad de los cultivos y en la economía de la región es decir, con el fin de que los modelos puedan generar predicciones sobre grandes áreas cañeras, es esencial su asociación con Sistemas de Información Geográfica (SIG). En este contexto, el uso de técnicas geomáticas permite, según Almeida *et al.* (2006), discriminar la información innecesaria y es una herramienta muy ventajosa en términos de la relación costo-beneficio, en comparación con el muestreo de campo. Lo anterior, porque permite obtener datos homogéneos de extensas superficies y realizar análisis multitemporales, y mapeo de las diferencias en el vigor de los cultivos (variaciones de la biomasa), lo que ayuda a orientar mejor la toma de muestras y observaciones de campo, y una mejor evaluación del potencial de producción de la superficie cultivada y tiene la ventaja de integrar información procedente de diversas disciplinas tales como la meteorología, climatología, edafología, manejo de cultivos, fisiología vegetal y tecnologías de producción. Para conjuntar y analizar cada uno de los factores involucrados en la problemática fitosanitaria, evaluarlos, ponderarlos y representarlos en forma de mapas, es necesaria la utilización de técnicas y herramientas especializadas en la recolección, manejo y análisis espacio-temporal de los datos que permitan la construcción de modelos y productos gráficos que asistan en la toma de decisiones comunicación, difusión e intercambio de conocimientos.

### 3. MARCO TEÓRICO METODOLÓGICO

La agricultura es una de las prácticas más importantes del ser humano, ya que la supervivencia de la población mundial depende de ello. En este sentido, se ha hecho uso de avances tecnológicos con el afán de asegurar y mejorar esta práctica. La contaminación, erosión, deforestación, sequías, plagas, entre otras, son las causas principales del porqué la tecnología debería implementarse en la mejora de los procesos de producción agrícola. A mitades del siglo XIX, Liebig y Jonhston comenzaron a hablar de una agricultura científica, con la incorporación de químicos para el aumento de la producción. El uso de estos compuestos son a corto plazo y con consecuencias ecológicas y económicas (Persson & Eriksson, 2000). Por ello, la misma tecnología tuvo que buscar alternativas amistosas con el medio ambiente, llamando a procesos sustentables, menos costosos y con fuentes de energía renovables, como la biotecnología (en el sentido ecológico); mientras que en el sentido computacional, la creación de aparatos de ubicación geográfica, sensores remotos y sistemas de almacenamiento de datos, pretenden cambiar la forma en cómo se maneja y controla los cultivos (Stafford, 2000). Es así que la agricultura constituye un campo de pruebas particularmente útil por lo que respecta a la productividad (Commoner, 1992).

La llamada agricultura de precisión (AP) ha generado un perfil muy alto en la industria agrícola, principalmente en la última década del segundo milenio. Se considera un término agronómico de gestión de parcelas agrícolas, basado en esa existencia de variabilidad espacial, y más que un concepto nuevo y revolucionado, es considerado como una serie de elementos y sistemas que permiten mejorar, facilitar y automatizar todas las operaciones que habitualmente se venían practicando dentro de la agricultura convencional (Marote, 2010; Bongiovanni, 2004). Las definiciones de agricultura de precisión pueden ser variadas. McBratney *et al* (2006) la define como el tipo de agricultura que aumenta el número de decisiones (correctas) por unidad de superficie de tierra por unidad de tiempo, asociada con los beneficios netos. Esta definición no implica una o un conjunto de tecnologías, las decisiones pueden ser apoyadas por algunas herramientas, pero también por el conocimiento de recursos humanos preparados. Valero (2010) define que el objetivo de la AP es poner a disposición del agricultor toda la información necesaria sobre las variaciones agronómicas dentro de la

parcela, para que en cada metro cuadrado de terreno se labre, fertilice, siembre, riegue, en la proporción idónea para conseguir la máxima producción posible en cada punto; esto conlleva una reducción de costos de producción y una gestión agrícola más respetuosa con el medio ambiente (Figura 3.1) (Saurabh, 2012). Por su parte Lowenberg-DeBoer y Swinton (1997) definen que es el control y monitoreo electrónico aplicado a la recolección de datos, procesamiento de la información y apoyo para la toma de decisiones, para la ubicación temporal y espacial de insumos en la producción de cultivos.

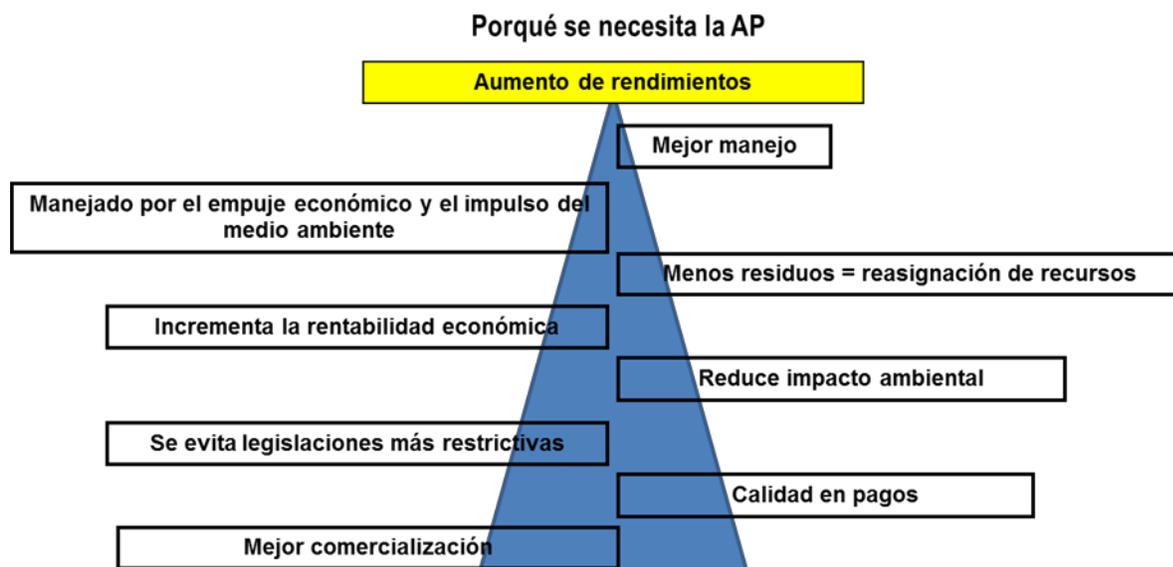


Figura 3.1 Ventajas de la agricultura de precisión (Saurabh, 2012)

La AP tiene la ventaja de proporcionar a los productores información y conocimiento, acercando potencialmente el campo al ideal del balance biológico, apoyado principalmente por tecnologías informáticas. Dentro de estas herramientas se consideran al Sistema de Posicionamiento Global (GPS) como uno de los más importantes. En la década de los 70's, y con desarrollo de la era aeroespacial, Estados Unidos de América comenzó un proyecto de sistema de posicionamiento global, que consiste en una red de satélites geoestacionarios ubicados alrededor de la tierra, con el propósito de localizar objetos de forma exacta y rápida. Esta red de satélites actualmente está disponible para cualquier uso civil. Uno de los usos más importantes de esta herramienta ha sido en la parte de la investigación, ya que al ser un instrumento muy preciso, permite monitorizar numerosos fenómenos del medio ambiente (Stafford,

1999; Marote, 2010). También el diseño y la incorporación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la Percepción Remota (PR), ha ayudado a recopilar datos sobre el terreno (antes, durante y posterior a la cosecha) ordenar y representar esa información, de tal manera que sean tratados por sus características espaciales y no como superficies homogéneas (Zuang *et al.*, 2013; Suman *et al.*, 2013; Bakhtiari y Hematian, 2013)

Las tendencias en la agricultura de precisión para el uso óptimo de los insumos, requerirá investigación en Técnicas de Diagnóstico más precisas (SIG, GPS, PR, espectroscopía RAMAN, Vehículos Aéreos No Tripulados) y Tecnologías de Información (Smartphone, plataformas geoweb) (Melgar, 2010).

### **3.1 Sensores remotos aplicados a la agricultura**

La incorporación de las geotecnologías en la agricultura ha aumentado en los últimos años. De hecho casi un 9% de los artículos publicados en los últimos cinco años en revistas de agronomía de alto impacto hacen uso de la percepción remota, si bien de manera desigual de acuerdo con los ámbitos de estudio. La mayor parte de estos trabajos utilizan la información espectral para describir la variación en el espacio de la vegetación o del paisaje en términos más generales, asumiendo una perspectiva holista de los sistemas ecológicos. Las publicaciones de carácter aplicado (Journal of Applied Ecology Ecological Applications), en las que las descripciones del territorio y la resolución de cuestiones de gestión ambiental cobran más importancia, hacen mayor uso de los sensores remotos que aquellas otras más orientadas a los aspectos básicos de la ciencia ecológica (Journal of Ecology o Ecology). Sin embargo, son los estudios asociados a escalas regionales o globales o al nivel de organización ecosistema (Global Ecology and Biogeography, Global Change Biology y Ecosystems) los que incorporan en una proporción sensiblemente mayor de los artículos publicados (casi un 20%) a la teledetección. Particularmente bajo, es el uso de las herramientas basadas en datos satelitales en las principales revistas dedicadas a la biología de la conservación (Conservation Biology y Biological Conservation) (Cabello y Paruelo, 2008). El uso más generalizado de la teledetección suele estar asociado a las descripciones de tipos de cobertura del suelo. Este enfoque tiene un enorme impacto en el desarrollo de las

investigaciones ecológicas ya que mejora la caracterización de la heterogeneidad del paisaje y permite describir patrones espaciales de unidades ecosistémicas estructurales (distribución de tipos de vegetación, por ejemplo). La identificación de estos patrones es un paso crucial en la elaboración de hipótesis acerca de los controles de procesos ecológicos, y en el seguimiento de los cambios y usos de cobertura del suelo. Este ámbito de trabajo, representa la aplicación de la teledetección a la ecología desde un enfoque estructural, y en su vertiente más aplicada permite la evaluación de la fragmentación de hábitats, o los cambios en la estructura de la vegetación (Cabello *et al.*, 2008; Chuvieco, 2009).

Sin embargo, la percepción remota brinda la posibilidad de ir más allá de lo estructural y describir aspectos funcionales de los sistemas ecológicos, particularmente a nivel de ecosistemas. A este nivel el funcionamiento involucra los intercambios de materia y energía de la biota con el medio físico, para cuya caracterización han demostrado ser muy efectivos los índices espectrales, particularmente los relacionados con las ganancias de C y las pérdidas de agua. Bajo este enfoque es posible vincular las características espectrales de porciones de territorio con atributos relacionados con la productividad, estacionalidad, fenología, eficiencia en el uso de la precipitación o el nivel de estrés de la vegetación. En este sentido, la percepción remota es vista como una herramienta que permite hacer mayores progresos en los aspectos aplicados de la ecología, no sólo en la evaluación de la respuesta de los ecosistemas a los cambios ambientales (Pettoirelli *et al.* 2005), sino también al seguimiento de las acciones de gestión de la naturaleza, desde el nivel de especie hasta el de ecosistema (Kerr y Ostrowsky, 2003; Nagendra y Gadgil 1999; Turner *et al.* 2003).

Una definición formal y comprehensiva de la percepción remota aplicada es la adquisición y medida de datos y/o información de alguna(s) propiedad(es) de un fenómeno, objeto o material por un instrumento que no se encuentra en contacto íntimo con los rasgos bajo observación. Las técnicas involucran una gran cantidad de ambientes: mediciones de campo de fuerza, radiaciones electromagnéticas, energía acústica utilizando cámaras, láser, receptores de radio, sistemas de radar, sonar, sensores térmicos, etc. Sin embargo, una definición más circunscrita al estudio del medio ambiente sería: la percepción remota es una tecnología basada en el muestreo

de la energía electromagnética reflejada o emitida por los diferentes tipos de cobertura de la tierra (González, 2004)

En el caso de los sensores remotos en la agricultura su aplicación ha aumentado en los últimos años, debido al desarrollo de sensores con mejores resoluciones espaciales y espectrales (Rama *et al.*, 2007). Existe un mayor interés por los métodos espaciales automatizados para la identificación de plantas o cultivos. En particular, la agricultura de precisión necesita métodos que reduzcan costos y tiempo a la hora de evaluar las condiciones del cultivo y hacer recomendaciones de manejo (Lutman and Perry, 1999; Robert, 1999). Tradicionalmente, los cultivos agrícolas eran identificados usando imágenes de satélite, ya sea por interpretación visual o por algún sistema clasificatorio como el de máxima similitud (Philipp and Rath, 2002). Estos clasificadores estadísticos usan como ejemplo datos de entrenamiento obtenidos de cartografía temática o básica, de imágenes de satélite o de visitas a campo. Sin embargo, la limitación de estos métodos ocurre cuando un mapa debe ser cubierto por varias escenas de imágenes, se tiene un limitado rango de temporalidad por el número de imágenes, los mosaicos tienen desfases y son mal ortorectificados, entre otros. Pero los errores más comunes con estos métodos convencionales, es la subjetividad en la determinación de valores y sus correctos métodos clasificatorios y los algoritmos de clasificación están limitados en la diferenciación de similitudes espectrales de varios cultivos y que no son detectables con imágenes de satélite convencionales (Broge and Leblanc, 2000).

El uso de sensores remotos en el manejo agronómico inició particularmente en la aplicación de firmas espectrales en la agricultura, que se han enfocado a diferenciar las características de las hojas su estructura, nutrientes, cantidad de agua, edad y pigmentos. Uno de los avances importantes son las imágenes con datos multi e hiper-espectral, que permiten tener una resolución espectral muy fina, para el reconocimiento detallado de cualquier tipo de suelo, roca o vegetación (Chen *et al.*, 1999). En el contexto de las nuevas aplicaciones de la percepción remota al estudio de la vegetación, las posibilidades que dan el uso de imágenes multi e hiper-espectrales son relevantes para la agricultura, ya que se puede ver detalladamente la longitud de onda electromagnética en términos de la posición específica de las bandas de absorción, forma del espectro, variabilidad espectral y similitud o diferenciación con otros tipos de

vegetación. La correlación de firmas espectrales en campos colectivos de diferentes cultivos con la reflectancia espectral de los sensores espectrales es importante para la identificación y cuantificación automática de varios tipos de vegetación en un área. Una posible forma de integración *in-situ* de datos con imágenes multi e hiperespectrales es a partir de librerías espectrales de varias características de la superficie de interés (Aguilar *et al.*, 2013).

Teóricamente, una librería espectral está hecha para determinar especies de cultivos agrícolas y debe contener diversos factores en su realización, tales como la temporalidad, etapa de crecimiento, tipo de cultivo, descripción de suelo y clima, con esto es posible marcar la firma espectral del cultivo desconocido y correlacionarlas con las firmas espectrales derivadas de las mediciones en las imágenes de satélite espectrales (Price, 1992). Además, si estas correlaciones son iguales y simultáneas, se puede generar un etiquetado espectral dentro de la imagen que ayude a la sistematización automática del cultivo desconocido a partir de píxeles de entrenamiento que diferencien cultivos de una misma área. MacLellan (2010) sugiere la necesidad de construir librerías (también conocidas como bibliotecas) espectrales que puedan dar cuenta de la variabilidad entre especies vegetales y la discriminación entre vegetación sana y con deficiencias nutrimentales.

Varias bibliotecas de reflectancia espectral de objetos naturales y artificiales están disponibles al público (<http://speclab.cr.usgs.gov/>, <http://speclib.jpl.nasa.gov/>, <http://www.peptideatlas.org/speclib/>, <http://www.spectraonline.com/about/collections.asp>) estas, proporcionan una referencia de la respuesta espectral del objeto que ayudan a la interpretación, tanto en imágenes hiperespectrales como multiespectrales.

Por lo general, estas bibliotecas se proporcionan como una base de datos para su lectura en software especializados (SIG's), con la posibilidad de asociarlas a la información espectral de las imágenes. Sin embargo, la mayoría de estas librerías se han desarrollado para reconocimiento de minerales, rocas y sólo algunas especies de vegetación forestal y no tanto para especies de cultivos agrícolas. Las bibliotecas pueden cubrir un área suficiente dentro espectro electromagnético para dar cabida a la variabilidad de tipos de cultivo, suelos y climas.

La espectroscopía es el estudio de la luz en función de la longitud de onda que ha sido emitida, reflejada o dispersada por un sólido, un líquido o un gas (Clark, 1999). El mismo autor menciona que en la comunidad de la percepción remota se aplican diferentes términos para referirse a la espectroscopía de imágenes, como por ejemplo espectrometría de imágenes, imágenes hiperespectrales o ultraespectrales y espectroscopía de reflectancia. Un término común para referirse a la adquisición de las curvas o firmas espectrales in situ es espectroscopía de campo, con el cual se indica la utilización de aparatos hiperespectrales portables llamados espectroradiómetros. Estos sistemas pueden contener cientos de bandas espectrales, de un ancho de hasta 1 nm en intervalos de 10 a 20 nm, aunque Aspinal *et al.* (2001) mencionan que existen algunos sensores llamados hiperespectrales que sólo utilizan 48 bandas con una resolución espectral de 20 nm de ancho. Sin embargo, no es la cantidad de bandas lo que determina que un sensor sea hiperespectral, si no lo angosto de las bandas y su disposición contigua (Shippert, 2004).

### **3.1.1 características espectrales de la vegetación**

La principal fuente de energía del planeta proviene del sol. Esta energía, de la cual la luz visible forma parte y nos resulta más familiar, es la radiación electromagnética. La energía puede ser transferida de un punto a otro de tres maneras posibles: conducción, conexión o radiación. Esta última es de especial interés en percepción remota. La energía radiada se comporta básicamente acorde con la teoría ondulatoria de la luz: es un continuo de ondas que se caracterizan por su tamaño (longitud de onda,  $\lambda$ , que se mide en micrómetros,  $\mu\text{m}$ ) y frecuencia ( $n$ , que se mide en Hertz, Hz), el número de ondas por unidad de tiempo. La radiación electromagnética que llega a un objeto, puede ser reflejada, absorbida o transmitida. Si la proporción del flujo radiante que es reflejado, absorbido o transmitido es muy diferente para los distintos rasgos de la superficie terrestre, entonces es posible identificar objetos de acuerdo a sus propiedades espectrales. La cantidad de energía que refleja, transmite o absorbe cada objeto es diferente para cada longitud de onda. Este es el sustento teórico básico para la percepción remota. Y esto que parece muy sofisticado, es algo que cotidianamente aplicamos cuando observamos cualquier objeto: vemos una hoja verde por el hecho de

que tiene una alta reflectancia en la longitud de onda que corresponde al verde, un papel blanco posee una alta reflectancia en todas las longitudes de onda, etc. Sin embargo, el que un sensor remoto (cámara fotográfica, radiómetro, etc.) pueda o no detectar las diferencias espectrales de un objeto con respecto a otro depende de 4 factores determinantes: 1) la resolución radiométrica del sensor; 2) la cantidad de dispersión atmosférica; 3) lo irregular de la superficie del objeto y 4) las variabilidad espectral de los objetos en la escena en cuestión (Chuvienco, 1995; González, 2004).

La forma en que los objetos de la superficie reflejan la radiación electromagnética constituye una de sus propiedades fundamentales y de interés para la percepción remota. En la Figura 3.2 se presentan los patrones característicos de reflectancia de distintos tipos de clases de cobertura del suelo.

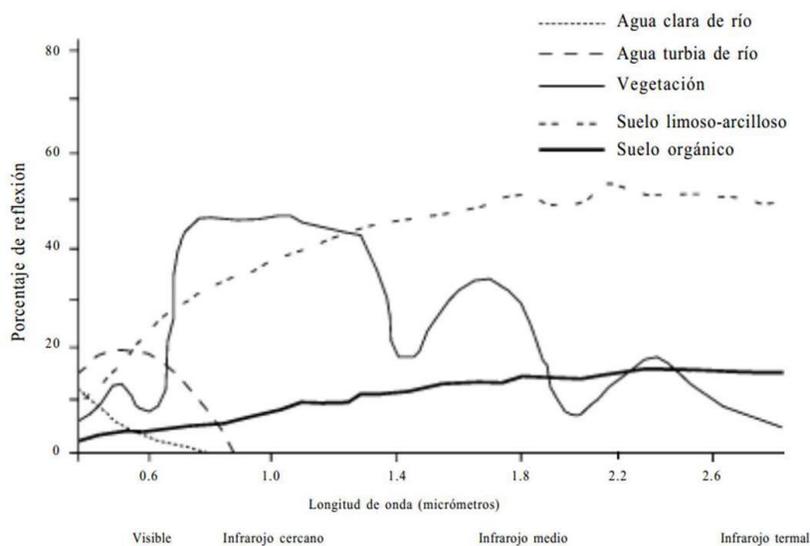


Figura 3.2. Patrones de la reflectancia en distintas coberturas de uso de suelo (González, 2004)

El comportamiento espectral de la vegetación depende fuertemente de las propiedades de las hojas y la estructura del dosel de la vegetación (número de capas de hojas) y la orientación de las hojas (Figura 3.3). Al nivel de la hoja, la radiación que llega parte se refleja, parte se absorbe y parte se transmite. La proporción de la radiación que es reflejada, en las diferentes partes del espectro (patrón de reflectancia) depende de la pigmentación de la hoja, el grosor y la composición (estructura celular) y la cantidad de agua libre dentro del tejido foliar. Dado que estos parámetros varían de especie a

especie y con el tiempo, el patrón espectral de las hojas presenta una gran variación. El comportamiento espectral varía de acuerdo a la longitud de onda que se trate.

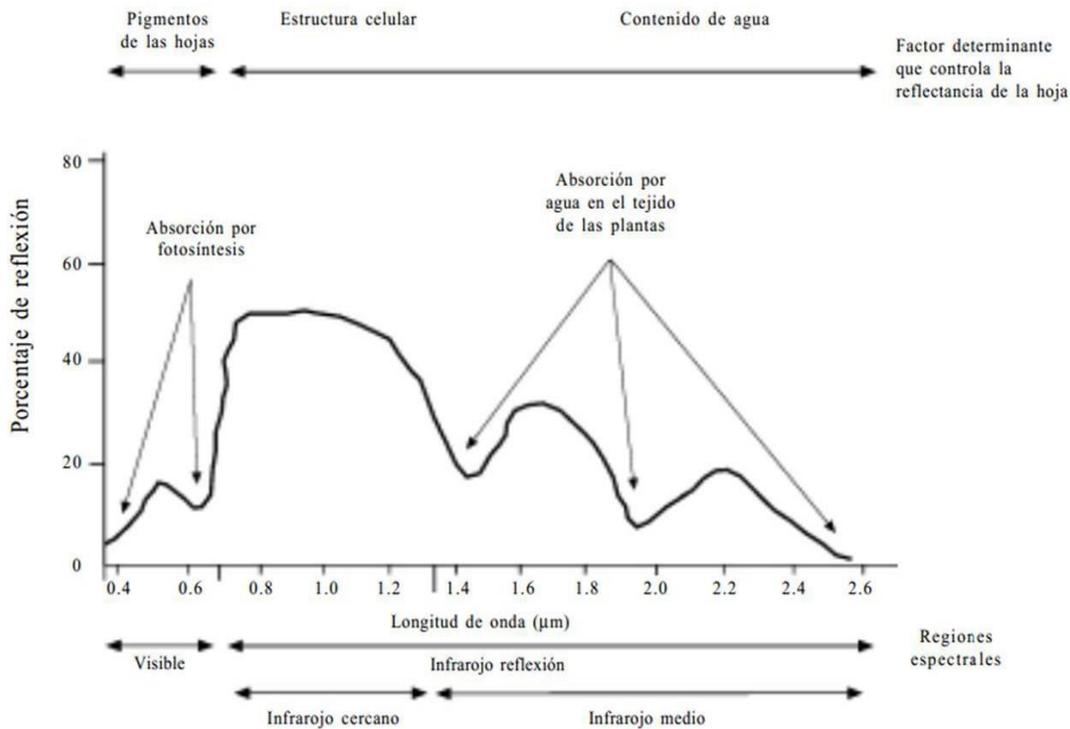


Figura 3.3 Patrón generalizado de la reflectancia de una hoja (González, 2004)

En las porciones azul y roja del espectro, la radiación es fuertemente absorbida por los pigmentos foliares (en particular la clorofila) presentes en los cloroplastos para el proceso fotosintético. En la porción verde, la absorbancia es menor y la reflectancia mayor que en las longitudes de onda del azul y el rojo. La radiación en el infrarrojo es fuertemente reflejada por el aire presente en el parénquima esponjoso de las hojas: mientras más desarrollados estén estos tejidos con aire, mayor será la reflectancia. La senescencia de las hojas implica la desaparición de la clorofila y la aparición de otros pigmentos (que le dan colores amarillentos o rojizos) y que causan un fuerte incremento de la reflectancia en el rojo. Otros factores alteran también la reflectancia de las hojas: las enfermedades y plagas afectan directamente a la clorofila (por lo tanto la tasa fotosintética) y desaparecen los espacios de aire; asimismo las esporas y las hifas cubren la superficie de las hojas con consecuencias en el comportamiento espectral. Al nivel macro, el comportamiento espectral de una masa de vegetación (cultivo, vegetación natural o modificada) está determinado por la combinación de sus

componentes: el tipo, la densidad, el grado de desarrollo, su estado fenológico, y la naturaleza del suelo entre las plantas, si está desnudo o si posee materia orgánica, etc. (González, 2004; Chuvieco, 1995).

Las propiedades reflectivas de la vegetación dependen de tres tipos de variables (Baret, F. y Andrieu, B., 1994):

1. Estructura de la cubierta vegetal, principalmente caracterizada por su índice foliar, por la orientación de las hojas y por su distribución y tamaño.
2. Propiedades ópticas de los elementos reflectantes (tallos, hojas, flores y frutos).
3. Geometría de la observación, determinada por la orientación relativa entre el sol y la superficie y por la situación del sensor con respecto a esta última

Con carácter general, en fitotecnia se habla de plantas de hoja estrecha y de hoja ancha, correspondiendo estas denominaciones a las categorías botánicas de mono y dicotiledóneas. En un corte transversal de una hoja pueden distinguirse varias capas de tejidos diferentes. La más externa de ambas caras se denomina epidermis y está formada principalmente por células epidérmicas, si bien también se presentan algunas otras entre las que destacan las células oclusivas de los estomas u orificios de intercambio gaseoso, que abundan más en el envés que en el haz. Las paredes de las células epidérmicas suelen estar cubiertas de una cutícula, es decir, de una fina película protectora que juega un papel importante en la reflectancia resultante de la hoja. El mesófilo es la zona media de la hoja, situada entre la epidermis de las caras superior e inferior y contiene las células especializadas en realizar la fotosíntesis. Se distinguen dos tipos de tejidos: el parénquima empalizada y el parénquima lagunar. El primero está situado inmediatamente debajo de la epidermis del haz (en algunas especies con hojas verticales, también en el envés) y sus células tienen forma de prismas muy bien ordenados. Debajo se sitúa el parénquima lagunar, caracterizado por contener células irregulares que dejan amplios espacios intersticiales que se comunican con las estomas. Los cloroplastos son corpúsculos celulares ricos en clorofilas y fotosintéticamente activos. Se concentran especialmente en el parénquima empalizado que, por su situación, recibe mayor cantidad de energía radiante (Thorp et al., 2012).

Aunque en mayor medida son las hojas las responsables de la respuesta espectral de las cubiertas vegetales, también en determinados casos cobran gran relevancia los tallos, las flores y los frutos, cuyas proporciones determinarán en definitiva la signatura espectral de la cubierta.

El estudio de la firma espectral de una masa de hojas permite extraer algunas conclusiones (Ormeño, 1991):

1. En el intervalo visible-infrarrojo medio, las hojas presentan tres zonas diferenciadas: una en el visible (0,4-0,7  $\mu\text{m}$ ) caracterizada por su baja reflectancia, otra en el infrarrojo cercano (0,7-1,3  $\mu\text{m}$ ) y otra en el infrarrojo medio (1,3-2,5  $\mu\text{m}$ ).
2. En el visible, la reflectancia de las hojas no supera el 15 % y la transmitancia es también pequeña. Esto es debido a que los pigmentos fotosintéticos (clorofilas, xantofila, antocianinas y carotenos) tienen fuertes bandas de absorción en este intervalo espectral. Entre ellos, las clorofilas a y b, que son las más absorbentes con un 65 % del total, presentan dos bandas de absorción centradas en el azul y en el rojo, por lo que producen un máximo relativo en la signatura espectral en torno a los 0,55  $\mu\text{m}$ , responsable del color verde de las hojas.
3. En el infrarrojo próximo las hojas presentan una meseta de alta reflectancia (alrededor del 50 %). De la energía restante, la mayor parte es transmitida, ya que la absorbancia es sólo del 10 %, por lo que puede considerarse prácticamente transparente en esta región del espectro. Además hay que considerar que la energía transmitida podrá ser interceptada por otra hoja, será reflejada con mayor probabilidad y así sucesivamente.
4. En el infrarrojo medio, el agua marca su presencia en las hojas produciendo tres fuertes bandas de absorción en la signatura resultante, al igual que ocurre con los suelos: 1,4; 1,9 y 2,5  $\mu\text{m}$ .

### **3.1.2 Factores que afectan la reflectancia vegetal**

Como ocurre en toda superficie parcialmente lambertiana, la radiación incidente es en parte reflejada especularmente y en parte dispersada. La responsable de la reflexión

especular es la cutícula que cubre las hojas, la cual le confiere el brillo característico de algunas en algunas especies. La luz no reflejada penetra en el interior de la hoja y es sucesivamente refractada, reflejada y difractada. Como consecuencia de ello, la radiación emergente tiene un carácter difuso. Esta dispersión depende de la propia estructura de la hoja, de la composición de sus células, —la presencia de cristales de almidón, por ejemplo— y su grado de humedad.

En el infrarrojo próximo, las hojas con mayor desarrollo del parénquima lagunar producen mayor dispersión. Por esta razón las plantas de hoja ancha suelen ser más reflectantes en esa región espectral que las de hoja estrecha (Ormeño, 1991). De otra parte, la presencia de cloroplastos incrementa la absorción, por lo que necesariamente debe disminuir la reflexión. Esta es la razón por la cual las hojas suelen tener mayor reflectancia en el envés que en el haz. La vellosidad de algunos tipos de hojas incrementa también la reflectancia en el visible y el infrarrojo próximo, no alterando sin embargo la del infrarrojo próximo.

La región visible del espectro de reflectancia de la vegetación está caracterizada por las bajas reflectancias y transmitancias debido a las fuertes absorciones por parte de los pigmentos foliares. Los pigmentos son compuestos químicos que determinan los matices y combinaciones de colores del espectro para cualquier tipo de vegetación, existiendo un predominio general de los colores primarios: verde, rojo y azul. El color particular que presenta un determinado órgano vegetal depende generalmente del predominio de uno u otro o la combinación de ellos. Dentro de estos pigmentos se encuentran las clorofilas, clorofila a y clorofila b, de tonalidades verdes, las cuales se encuentran prácticamente en todas las plantas. Estos pigmentos se encuentran en el interior de las células vegetales específicamente en un organelo llamado cloroplasto. Los compuestos clorofílicos están ligados químicamente con las estructuras internas del cloroplasto, además existen también en los cloroplastos dos clases de pigmentos amarillos y amarillo-anaranjados que son las xantofilas y carotenos (Jensen, 2000; Van de Meer, 2001).

Los pigmentos de la clorofila absorben luz violeta, azul y roja para el proceso de fotosíntesis. La luz verde no es absorbida para realizar tal proceso, y por tal motivo la

mayoría de plantas son verdes. El espectro de reflectancias de la vegetación verde muestra los principales mínimos de absorción causados por la clorofila en las longitudes: 420, 490 y 660 nm del espectro visible; en el Cuadro 3.1 se muestran otros puntos mínimos de absorción que se pueden considerar importantes en cualquier estudio de pigmentos:

Cuadro 3.1 Espectro de reflectancias por tipo de pigmento

<b>Tipo de pigmento</b>	<b>Absorción (nm)</b>
Clorofila a	420,490,660
Clorofila b	435, 643
$\beta$ Caroteno	425, 450, 480
$\alpha$ Caroteno	420, 440, 470
Xantofila	425, 450, 475

Fuente: Van deMeer, 2001

Un fenómeno interesante de resaltar es la senescencia de las hojas, es decir el proceso de envejecimiento que conduce a la clorosis (amarilleamiento) y a la marchitez permanente. Durante el mencionado proceso, el contenido en clorofilas decrece en favor de los carotenos, que producen colores rojizos y marrones, y de las xantofilas, que producen colores amarillentos. En el infrarrojo próximo la reflectancia solamente varía cuando, como consecuencia de la muerte de la hoja, cambia su estructura interna. Sin embargo, en el infrarrojo medio sí que se registra un incremento de la reflectancia en todo el intervalo espectral, debido a la progresiva pérdida de agua, aunque las bandas de absorción características del agua solamente desaparecen cuando la humedad se hace prácticamente inexistente.

De acuerdo con Clevers *et al.* (2002), en la franja de transición entre el rango visible rojo y el rango del infrarrojo cercano se presenta una de las características de absorción más importante de las curvas de reflectancias de la vegetación, debido a que se da un contraste o fuerte cambio entre el rango rojo y el infrarrojo cercano, caracterizado por un valor de reflectancia extremadamente bajo en el visible rojo, seguido por altas reflectancias en el rango infrarrojo cercano, lo cual se asocia con la poca reflectancia de luz roja de la clorofila, la estructura interna y contenido de agua foliar. Esta característica de absorción tiene un ancho de aproximadamente 30 nm, entre los 700 y 740 nm, conocida como *red edge*, se considera su punto de inflexión para realizar comparaciones entre curvas espectrales de diferentes especies vegetales, debido a que este punto es el de máxima pendiente de la absorción sobre la curva (Figura 3.4) y considerado como indicador del estrés y la senescencia vegetal.

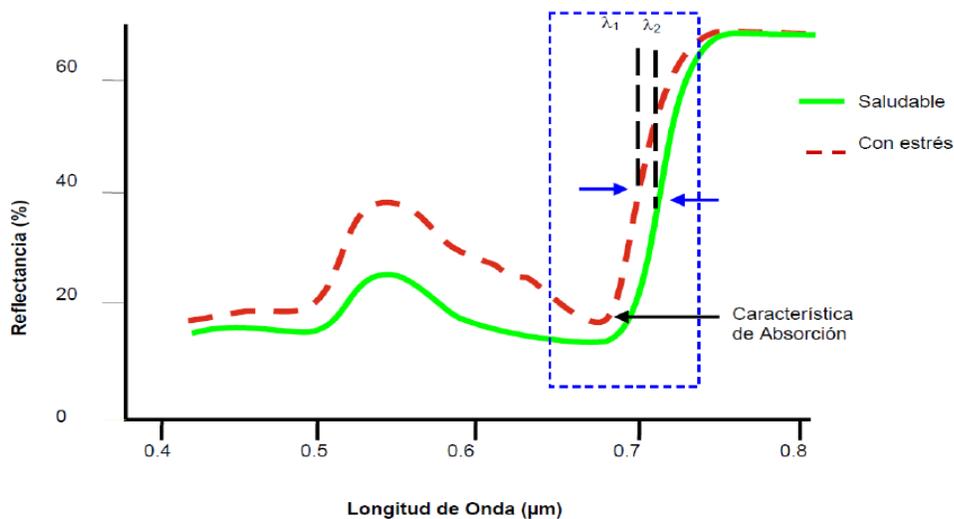


Figura 3.4 Curva espectral vegetal

En cuanto al contenido de agua del material vegetal influye en la reflectancia no sólo de forma directa, afectando la signatura espectral mediante las bandas de absorción que le son propias, sino también de forma indirecta, ya que de la humedad depende la turgencia celular y este factor determina la estructura interna de la hoja. En general, en laboratorio se obtienen reflectancias mayores en todo el espectro al disminuir el contenido en agua. En la práctica, sin embargo, tal efecto solamente se hace evidente cuando el estrés hídrico es muy acusado.

También el estado nutritivo de las plantas influye en la reflectancia espectral. La característica principal que puede detectarse en relación con el vigor vegetal es el amarilleamiento o clorosis y numerosos estados carenciales dan como resultado la clorosis. Salvo las plantas leguminosas, el resto del material vegetal es extremadamente sensible a la carencia de nitrógeno soluble en el suelo. Una escasa dotación de este elemento en forma amoniacal produce un típico color amarillo en la planta debido a la disminución del contenido en clorofila. Ello produce un incremento de la reflectancia en el visible, mientras que, como consecuencia de la pérdida de capas celulares, se produce un descenso de la reflectancia en los infrarrojos próximos y medios. Pero las clorosis también pueden estar producidas por la carencia de algún elemento no tan esencial como el nitrógeno. Tal es el caso del hierro, cuya deficiencia da lugar a la denominada clorosis férrica, caracterizada por un amarilleamiento de las hojas que, al igual que antes, causa un incremento de la reflectancia en el visible. Efectos similares producen las plagas y/o enfermedades sobre las plantas, precisamente por lo cual es posible el seguimiento de sus efectos mediante teledetección.

Determinados cultivos de floración muy perceptible durante un período dilatado de tiempo modifican su signatura espectral en estado de floración con respecto a otros períodos vegetativos. Por lo tanto deberá tenerse en cuenta este factor en los períodos afectados, contrastando los registros digitales obtenidos desde satélite con los resultados de la radiometría de campo que, bajo estas circunstancias, se hace especialmente útil. En especies leñosas también cobra importancia el color y la distribución del fruto por los motivos expuestos. El caso es patente en las coníferas, en las que la proporción de infrutescencias (piñas) tiene, junto con la corteza de troncos y ramas, gran repercusión espectral.

Existen numerosos factores que, si bien no modifican sustancialmente la reflectancia espectral del material vegetal, sí condicionan en cierta medida sus peculiaridades. Uno de ellos es la orientación relativa de la superficie vegetal con respecto a la luz incidente, la cual depende de tres variables: elevación solar, pendiente de la ladera y orientación geográfica de la misma.

La variación horaria de la reflectancia de una cubierta vegetal durante el día está, en principio sujeta al albedo. Sin embargo, el efecto de incremento de la reflectancia para alturas solares pequeñas se ve en cierto modo contrarrestado por las sombras producidas por las propias plantas sobre las vecinas, especialmente cuando se trate de cubiertas forestales. Los estudios realizados por diferentes investigadores demuestran que la reflectancia en el visible aumenta a medida que el sol asciende, disminuyendo, por el contrario, la correspondiente al infrarrojo próximo. Sin embargo esta tendencia general puede quedar matizada en función de la densidad de los árboles y de la forma de sus copas (Li y Strahler, 1985; Otterman y Weiss, 1984).

La reflectancia medida también depende de la posición relativa del sensor con respecto a la dirección de iluminación. Considerando el sensor en el mismo plano que el de incidencia y en el lado de los rayos reflejados, la reflectancia en el visible aumenta conforme aumenta el ángulo cenital de la posición del sensor hasta alcanzar el máximo en una posición próxima a los  $45^\circ$ , a partir de cuyo momento disminuye; la del infrarrojo próximo aumenta cuando aumenta el ángulo cenital (el efecto es similar a mantener el sensor fijo y variar la elevación solar). Si el sensor está colocado del lado de incidencia, la reflectancia en el infrarrojo próximo se mantiene constante y la del visible disminuye al aumentar el ángulo cenital. Si se considera el sensor situado en un plano perpendicular al de incidencia de los rayos solares, la reflectancia en el visible disminuye y la del infrarrojo próximo aumenta al aumentar el ángulo cenital del sensor. La explicación a tales fenómenos reside por un lado en el hecho de que las sombras son menos reflectantes en el visible que en infrarrojo próximo, y por otro, que el suelo en el visible es más claro que la vegetación. Además, cuando aumenta el ángulo cenital del sensor, la contribución del suelo disminuye al ir perdiéndose visibilidad, en favor de la de las sombras (Ormeño, 1991).

La reflectancia, como se ha visto, depende de la geometría del triedro formado por la normal a la superficie, la dirección de incidencia de los rayos solares y la de posición del sensor. Sin embargo no afecta sólo la orientación general de la superficie con respecto al sol, sino también la orientación relativa hoja a hoja. Por ello es importante considerar la inclinación de las hojas, caracterizando la distribución espacial de dicha inclinación —materializada por la función LIDF—, pues no todas las hojas presentan el

mismo ángulo con respecto al sol. Ciertas plantas cultivadas presentan fototropismo, en virtud del cual las hojas siguen diariamente el movimiento del sol, modificando su LIDF, y con ella, la reflectancia resultante.

### **3.2 Fitosanidad de precisión: vigilancia epidemiológica asistidas por sensores remotos**

La Norma Internacional de Medidas Fitosanitarias (NIMF) No.6, menciona que la vigilancia general es un proceso a través del cual la información sobre plagas de interés específico para un área, obtenida de diversas fuentes, donde ésta esté disponible y proporcionada para su uso por la Organización Nacional de Protección Fitosanitarias (ONPF). Estas fuentes pueden incluir: las ONPF, otras agencias nacionales y gobiernos locales, instituciones de investigación, universidades, sociedades científicas (incluyendo especialistas por afición), productores, consultores, museos, el público en general, periódicos científicos y comerciales, datos históricos inéditos, y observaciones contemporáneas. En este sentido, la NIMF No. 11, que refiere al análisis de riesgo para plagas cuarentenarias (ARP), incluido el análisis de riesgos ambientales y organismos vivos modificados, indica que si la plaga está presente se deberá mencionar su estatus reglamentario y se deberá analizar el Potencial de establecimiento y dispersión en el área de ARP, en el cual deberán facilitarse evidencias que justifiquen la conclusión de que la plaga podría establecerse o dispersarse en el área de ARP. Esta área deberá tener las condiciones ecológicas/climáticas incluyendo aquellas en condiciones protegidas adecuadas para el establecimiento y dispersión de la plaga y donde sea apropiado las especies hospedantes (o afines), hospedantes alternos y vectores relevantes deberán estar presentes en el área de ARP.

Por otra parte si consideramos una nueva perspectiva de la Fitosanidad en la que responda en espacio y tiempo para atender procesos de dispersión y control de agentes nocivos que pongan en riesgo la salud de las plantas y por ende los productos que de ellas deriven para el bienestar humano, requiere de actualización constante de información lo cual implica una importante inversión económica. Desde el 2013, el Laboratorio Nacional de Geoprocesamiento de Información Fitosanitaria (LaNGIF) propuso el término Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria Asistida por Sensores

Remotos (FASER) o Ventanas FASER el cual debe entenderse como el uso de herramientas y técnicas de percepción remota que permiten adquirir información de plagas y enfermedades de los cultivos de manera no destructiva y eficiente sobre grandes extensiones de modo rápido. Las Ventanas FASER cuyo punto de partida son los datos de campo como observaciones directas o de trampeos, indirectas o bien de algún sensor remoto y de imágenes satelitales. La relación de datos de campo y satelitales le permiten a la Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria Asistida por Sensores Remotos mantener una observación sistemática, activa y continua de un daño o posible daños causados por plaga y/o enfermedades dentro de una determinada comunidad vegetal (LaNGIF, 2014).

El avance conceptual de la vigilancia epidemiología ha seguido ganando terreno. La teoría de la transición epidemiológica (que desde su nacimiento proporcionó valiosos elementos para interpretar la dinámica de las enfermedades y plagas) ha sido objeto de profundas reformulaciones teóricas. Los conceptos de causa, riesgo, asociación, sesgo, confusión, etc., aunque cada vez son más sólidos, se encuentran en proceso de revisión permanente, lo que hace la epidemiología una disciplina viva y en constante movimiento (Hernández, 2007).

De acuerdo con Kleinbaum (1982), la nueva epidemiología tiene como propósito: a) la descripción de las condiciones de la vegetación y/o cultivos (mediante la caracterización de la ocurrencia de plagas y enfermedades, de las frecuencias relativas en el interior de sus subgrupos y de sus tendencias generales); b) la explicación de las causas de enfermedad de la vegetación (determinando los factores que la provocan o la influyen en su desarrollo); c) la predicción del volumen que ocurrirá, así como su distribución espacial, d) el buen desarrollo del cultivo mediante el control de plagas y la prevención de los nuevos casos entre las que están en riesgo. También es propósito de la epidemiología generar los métodos de abordaje con los cuales puede realizar adecuada y rigurosamente estas tareas. Una parte esencial del control de la enfermedad es la capacidad de documentar la aparición de plagas y enfermedades con el objetivo de desarrollar control efectivo y las estrategias de erradicación, lo que es la vigilancia (Trustfield, 2005).

Se han utilizado dos términos en la epidemiología agrícola, "monitoreo" y "vigilancia" como sinónimos y de manera intercambiables. Sin embargo, existe un consenso actual que, estos dos términos son estrechamente interdependientes (Weatherall y Haskey, 1976), que ahora tienen por separado y significados distintos. El monitoreo es la recogida sistemática de información sobre las características de la enfermedad, la productividad y otros posiblemente relacionados con ellos en los cultivos. Vigilancia, por el contrario, es una forma más intensiva del registro de datos de control, y tiene tres distintos elementos (Trustfield, 2005):

1. La recolección, registro y análisis de datos;
2. Difusión de información a las partes interesadas, de modo que:
3. Se pueden tomar medidas para controlar la plaga o enfermedad.

Los objetivos generales de la vigilancia es saber: el mantenimiento de los altos estándares de la salud vegetal y el bienestar y la protección de los cultivos.

### **3.2.1 Vigilancia pasiva y activa.**

La vigilancia pasiva se define como la revisión de los casos de enfermedades y/o plagas específicas; esto contrasta con la vigilancia activa, que envuelve el muestreo (incluyendo el post-mortem) de las áreas agrícolas que no han sufrido ningún daño, por lo tanto, la vigilancia activa de las enfermedades es importante en los casos asintomáticos o sin daños aparentes (Greenland, 1987).

La vigilancia activa y pasiva cada una tiene sus pros y contras. La vigilancia pasiva utiliza los datos que pueden estar sesgados con frecuencia carecen de valores de denominador, y por lo tanto, no pueden dar estimaciones sin sesgo de la enfermedad de frecuencia. En contraste, la vigilancia activa, basada en encuestas bien diseñadas, pueden producir estas estimaciones. También puede subestimar la frecuencia de la enfermedad, sin embargo es el primer paso, en la identificación de nuevas enfermedades emergentes. Implica un costo menor que la activa, por lo tanto, ambas son componentes necesarios de los sistemas nacionales de vigilancia (Greenland, 1987).

### **3.2.2 Mecanismos de la vigilancia.**

Existen seis principales mecanismos de vigilancia (SENASICA, 2011):

1. Notificación voluntaria.
2. Notificación obligatoria.
3. Investigación de brotes.
4. Vigilancia centinela.
5. Sistemas estructurados.
6. Censos.

Por lo tanto, si reconocemos que uno de los pilares dentro de la economía nacional es la producción agrícola y pecuaria, por tal motivo la protección de la sanidad vegetal y animal es factor decisivo en la comercialización tanto nacional como internacional. Por otra parte, el intercambio de productos y subproductos agropecuarios, los compromisos que a nivel nacional e internacional tiene nuestro país y el mayor flujo comercial, implican un incremento constante de la movilización de animales y vegetales, sus productos y subproductos, lo cual conlleva el riesgo de diseminación de plagas y enfermedades, por lo que se hace indispensable reforzar las medidas de control fitosanitario, en este contexto, la visión del Gobierno Federal es la de apoyarse en Centros de Investigación y Enseñanza para la generación de metodologías, sistemas, lineamientos y protocolos que permitan el desarrollo de estrategias y herramientas para el monitoreo y alerta de plagas y enfermedades con enfoque epidemiológico (Galindo *et al.*, 2010).

Por ello, tener un conocimiento actualizado de la situación fitosanitaria en México es una herramienta estratégica y de vital importancia para los productos agrícolas y pecuarios, considerando que la Sanidad Vegetal y Animal es un activo público y un elemento de seguridad nacional. Así mismo, la vigilancia epidemiológica fitosanitaria proveerá el apoyo analítico para la planeación, programación y evaluación de actividades e intervenciones de las acciones en sanidad vegetal.

La preservación de la sanidad de las plantas y animales como un bien público debe ser atendida por los gobiernos, ya que está relacionada con la seguridad alimentaria de la población y su bienestar general. Parte de esta atención, se facilita con la vigilancia epidemiológica fitosanitaria, como aquella que es llevada por una institución gubernamental oficialmente designada para ello, mediante el cual se recoge y registra información relacionada con la presencia o ausencia de plagas y enfermedades, utilizando metodologías confiables de monitoreo.

La implementación de la vigilancia epidemiológica fitosanitaria para plagas y enfermedades reguladas permitirá detectar de manera oportuna, así como identificar y verificar la incidencia, dispersión y comportamiento de plagas y enfermedades existentes en el Estado. Así mismo, permitirá la delimitación de posibles introducciones de plagas y enfermedades que no existen en el Estado y que presentan posibilidades de provocar daños con consecuencias económicas (Galindo *et al.*, 2010).

Establecer y fortalecer en el Estado un sistema de vigilancia epidemiológica fitosanitaria, permitirá tomar medidas fitosanitarias urgentes para mantener niveles de protección adecuados contra los peligros que representen las plagas y enfermedades reglamentadas que aún no se encuentren; por ésta razón, implementar un sistema de vigilancia epidemiológica se convierte en un instrumento valioso en la transparencia de la comunicación de los peligros de plagas y enfermedades, esto permitirá realizar las acciones de control para mitigar o evitar su diseminación hacia otras áreas no infestadas. La vigilancia epidemiológica debe ser considerada como un elemento estratégico de apoyo analítico para la planeación, programación y evaluación de actividades e intervenciones de las acciones en sanidad vegetal y animal para quienes formulan y toman políticas de alto impacto fitosanitario.

La existencia de infraestructuras y servicios para prevenir y combatir plagas y enfermedades se convierten en un bien público; los gobiernos pueden garantizarla con mayor eficiencia que los agricultores por separado. Sin embargo, la forma más eficaz de intervención gubernamental dependerá de la plaga o enfermedad de que se trate. La experiencia ha demostrado que el hecho de que el gobierno brinde servicios para combatir plagas o enfermedades, o ambas, puede crear dependencia entre los

agricultores y hacerlos desistir de utilizar los enfoques del manejo integrado de las plagas que ellos aplican frente a los problemas. En esos casos el aporte de conocimientos, asesoramiento científico e información por parte del gobierno quizás sea, a largo plazo, la forma mejor, y también más sostenible, de ayudar al mundo agrícola. Para las plagas y enfermedades transfronterizas se justifican más ciertas intervenciones gubernamentales tendentes a controlarlas de lo que sería para las otras que se presentan sólo localmente. Más aún, en algunos países la pérdida de alimentos debida a las plagas y enfermedades quizás plantee una amenaza para la seguridad alimentaria o la subsistencia rural haciendo que tal intervención resulte inevitable desde el punto de vista político.

Las plagas y enfermedades de los animales y las plantas pueden plantear la máxima amenaza inmediata en caso de invasión o cuando recién se introducen en condiciones ecológicamente favorables, con pocos factores naturales que limiten su propagación y sin disponer de experiencia en su manejo. Esta situación, suele tener efectos económicos sumamente evidentes y, en muchos casos, afectan también con mayor gravedad a la población marginada. La propagación de enfermedades emergentes y especies invasivas ha sufrido un drástico aumento en los últimos años (para México de 1995 a la fecha, se ha determinado la entrada de más de 78 plagas y enfermedades emergentes). Al mismo tiempo se han producido muchos cambios, como el rápido aumento de los desplazamientos transfronterizos de bienes y personas, la liberalización del comercio, el aumento de la preocupación por la inocuidad alimentaria y el medio ambiente, que han acentuado la necesidad de una cooperación internacional para combatir y controlar las plagas y enfermedades transfronterizas. De aquí, la necesidad de nuevos enfoques epistémicos y metodológicos para lograr la seguridad nacional y alimentaria a través de la sanidad vegetal. No es, sino el escenario propicio para el trabajo multidisciplinario, integrador y holístico y donde la coyuntura histórica logra converger a los sectores gubernamentales, productores y científicos con una visión común (SINAVEF, 2010).

La globalización de los mercados ha traído consigo la caída de las barreras arancelarias, pero ha incrementado la importancia de las barreras sanitarias y de inocuidad como mecanismo de protección ante el posible ingreso de plagas, así como

para la protección de los consumidores ante el riesgo de contaminación de alimentos de origen agropecuario. Considerando la globalización de los mercados agroalimentarios, la sanidad e inocuidad se convierten en bienes públicos internacionales, y por tanto, de la estrecha colaboración entre países a fin de controlar y eliminar plagas que representan un riesgo a los sistemas productivos de los países y que además representan un riesgo a la salud pública. Es por ello que se han establecido estándares internacionales para el control de plagas, además de esquemas de asistencia técnica y de financiamiento con la participación tanto de países desarrollados como de países en desarrollo para establecer mecanismos globales de prevención y control (Galindo *et al.*, 2013).

### **3.3 Implicaciones metodológicas para el monitoreo con percepción remota de las plagas y enfermedades de la caña de azúcar**

La percepción remota en la producción de caña de azúcar ha sido aplicada en numerosos países en aspectos como: (1) clasificación y mapeo de caña de azúcar, en Australia, Brasil, Sudáfrica, Tailandia, Guatemala, Colombia, Argentina, Cuba, India, y Guadalupe, (2) identificación de etapas fenológicas y grados-día de crecimiento, en Sudáfrica, India y Australia, (3) discriminación de variedades, en Sudáfrica, Brasil, Australia y EE.UU., (4) seguimiento del riego y estrés nutricional, en EE.UU. y Australia, (5) detección de daños por insectos y enfermedades, en Australia, (6) predicción de rendimientos, en Brasil, India, Australia, Sudáfrica e Isla Reunión (Francia) y (7) manejo de residuos de cosecha, en Australia, Estados Unidos y Brasil. En todos los casos, con el objetivo de incrementar la productividad (rendimientos y calidad de la cosecha) con la reducción de los costos de producción para mercados cada vez más competitivos (Abdel-Rahman, 2008, Galvão *et al.* 2006, Soares 2005, Daughtry *et al.* 2005 Bappel, 2005, Hajj, 2009 y Bramley, 2001).

A partir de la información generada por imágenes satelitales y técnicas de geoprocusamiento en sistemas de información geográfica (SIG) se pueden derivar varios productos y ventajas; por ejemplo:

- a) la obtención de mapas temáticos que contienen la distribución espacial de áreas agrícolas.

- b) mayor confiabilidad y rapidez en la obtención de la información del cultivo, y respaldo en el análisis de consistencia de los datos recogidos por el método convencional (muestreo)
- c) manejo de los datos que se mantienen uniformes a través del desarrollo del cultivo, por ejemplo: superficie de parcelas, distancia entre lotes, tipo de suelo, topografía, profundidad del horizonte, etc., los cuales pueden servir para definir zonas homogéneas. La ventaja de este sistema (SIG-GPS) radica en que los registros y datos solamente son medidos una sola vez, ya que cambian muy poco a través del tiempo y se pueden generar mapas de utilidad a largo plazo.
- d) Orientación del trabajo de campo para recoger datos zonificados sobre el cultivo de caña de azúcar, con la consecuente reducción de costos mediante el procesamiento digital y la generación de mapas que muestran su variabilidad espacial
- e) elaboración de modelos universales aplicables a la predicción bajo diversas condiciones agroclimáticas y fenológicas.

Lazcano (2008) estableció que estas nuevas tecnologías están cambiando la forma en que el ingenio, los productores y sus consultores toman las decisiones. Las posibilidades de aplicación de estos sistemas son muy variadas, aunque en diferentes grados y con distinta efectividad, y aun cuando se siguen estudiando sus aplicaciones en los países más desarrollados, en México no se ha logrado establecer una sinergia con los trabajos convencionales de campo

Por otra parte, la identificación y evaluación de zonas productivas se dificulta debido al tamaño pequeño de los predios, la diversidad de cultivos establecidos en un área, la gran variabilidad de predio a predio en relación con fechas de siembra y cosecha, prácticas culturales y manejo de cultivos, grandes áreas bajo temporal o secano con pobre desarrollo foliar, cultivos intercalados y/o mixtos, y amplia cobertura de nubes durante la temporada del cultivo de interés (Dadhwal, 2002).

En México, existe desinterés en el modelado de caña de azúcar utilizando sensores ópticos activos, y para la zona cañera de la Huasteca Potosina, no se dispone de una herramienta que permita caracterizar la problemática asociada a la producción de caña

de azúcar y no se ha generado una metodología de percepción remota que permita establecer espacial y cuantitativamente aspectos relevantes como el área ocupada por el cultivo de caña de azúcar, la productividad a nivel zonas de abasto de los ingenios y predios, la estimación del rendimiento de caña de azúcar y el reconocimiento de plagas o enfermedades; lo anterior, debido a la falta de conocimiento del comportamiento espectral de la caña de azúcar y otros usos del suelo; además de lo anterior, se desconocen otros factores limitantes correlacionados con los aspectos temporales de desarrollo del cultivo como la variedad, condiciones agroclimáticas, prácticas de manejo, y ciclo del cultivo entre otros. Todo ello, a pesar de que ha sido documentado que la variabilidad espacial de los cultivos de caña de azúcar es una de las principales causas de errores en la estimación de la producción (Hajj, 2009 y Daamen *et al.* 2002). Los ingenios azucareros sólo toman en cuenta una serie de factores basados en la experiencia, entre ellos se destacan: la percepción de los patrones de crecimiento en cada predio, el desarrollo de la zafra anterior, las condiciones agroclimáticas pasadas y previstas, el estado del cañaveral, y las estimaciones de superficie, rendimientos culturales y rendimientos fabriles realizadas en pre-zafra (Aguilar, 2015).

Xavier *et al.* (2006) y Gers (2003), concluyeron en sus estudios que, si bien las herramientas de sensores remotos no reemplazarán lo métodos tradicionales de monitoreo de caña de azúcar en el futuro próximo, facilitarán la identificación de áreas nuevas de producción o expansión de pequeños productores con mejores resoluciones espaciales, espectrales y temporales.

Por lo tanto, los métodos de muestreo de suelos y monitoreo en tiempo real en caña de azúcar requieren: mejorar nuestra comprensión de la dinámica de los sistemas de producción de caña de azúcar, servir como un sistema de alerta temprana, lo que permite acciones correctivas o preventivas más oportunas, y proporcionar puntos de referencia para monitorear los cambios en el rendimiento cañero (Abdel-Rahman, 2010, 2008).

En este contexto, la percepción remota en caña de azúcar (Johnson *et al.*, 2005, Narciso, 1999) puede jugar un papel único por su capacidad de proporcionar en tiempo real, y de forma rápida, sinóptica, y relativamente accesible datos en grandes áreas

cañeras, es decir, la percepción remota, como modelo agrícola, permite llevar a cabo mediciones radiométricas ( $\approx 400\text{--}2500\text{ nm}$ ) a gran escala integrando las características bioquímicas y biofísicas del dosel, donde diferentes datos o información deben ser integrados a diversas escalas combinándola de diversas fuentes, tales como modelos matemáticos y observaciones en el espacio y el tiempo de las variables de interés para obtener resultados confiables (Murillo *et al.*, 2010, Xie *et al.* 2008).

Dorigo *et al.* (2007) definieron que la aplicación de la percepción remota en los modelos agrícolas se divide en dos categorías: métodos de base empírica o estadística que buscan una relación estadística entre información espectral (reflectancia, absorbancia, y transmitancia) de los cultivos y medidas biofísicas, o bien las propiedades bioquímicas del dosel y métodos físicos que se basan en los principios de propagación de radiación dentro de un dosel agrícola. Sin embargo, la mayoría de las aplicaciones de la percepción remota en la agricultura son enfoques híbridos o combinación de ambos métodos, el uso de modelos físicos ayuda a establecer la relación estadística entre la señal espectral y los parámetros biofísicos de interés.

Las técnicas de percepción remota son técnicas eficaces, rápidas, no destructivas, y accesibles en forma operativa y exacta, al adquirir información de extensas superficies durante una temporada agrícola en numerosas ocasiones y en detectar cambios en los procesos fisiológicos y bioquímicos como fijación de carbono, Producción primaria bruta (GPP), índice de área foliar (LAI), radiación fotosintéticamente activa (PAR), evapotranspiración (ET), ciclo y deficiencia de nutrientes (N, K, P, Ca, Mg), productividad primaria neta (NPP), materia seca, estrés hídrico, nutrimental o derivado de plagas, malezas o enfermedades, identificación de especies y estado de salud y vigor vegetal, posicionamiento *in situ*, inventario de cultivos, estructura del dosel, topografía, en la interface de la interacción energía radiante-dosel a un amplio margen de escalas al incorporar conocimientos de matemáticas, física, química y biología en un contexto de agricultura de precisión. Es decir, optimizar las prácticas culturales como una función de la variabilidad espacial y temporal dentro de los campos de cultivo, por lo que se requiere desarrollar métodos capaces de recuperar con precisión variables biofísicas a nivel dosel registradas de la señal de reflectancia por plataformas de

teleobservación (Aguilar *et al.* 2010, Xie *et al.* 2008, Xavier *et al.*, 2006, Elwadie, 2005, Schaepman, 2005 y Koetz, 2005).

### 3.3.1 Caracterización fenológica de la caña de azúcar y su relación con presencia de plagas y enfermedades

Un ejemplo de la calendarización fenológica de la caña de azúcar y la presencia de las plagas es la desarrollada por Aguilar *et al.* (2011) y Benvenuti (2005), donde describen las etapas de establecimiento, la cual implica a) fase de germinación y emergencia, ya sea en plantación (plantillas) o en rebrote (socas y resocas) de los cuales crecerán nuevos tallos (amacollado); b) fase de ahijamiento, formativa o reposo fisiológico; c) fase de crecimiento rápido; y c) fase de maduración y cosecha. A este calendario, se sobrepone las etapas de desarrollo de las plagas y enfermedades y se busca una correspondencia entre ambas (Figura 3.5).

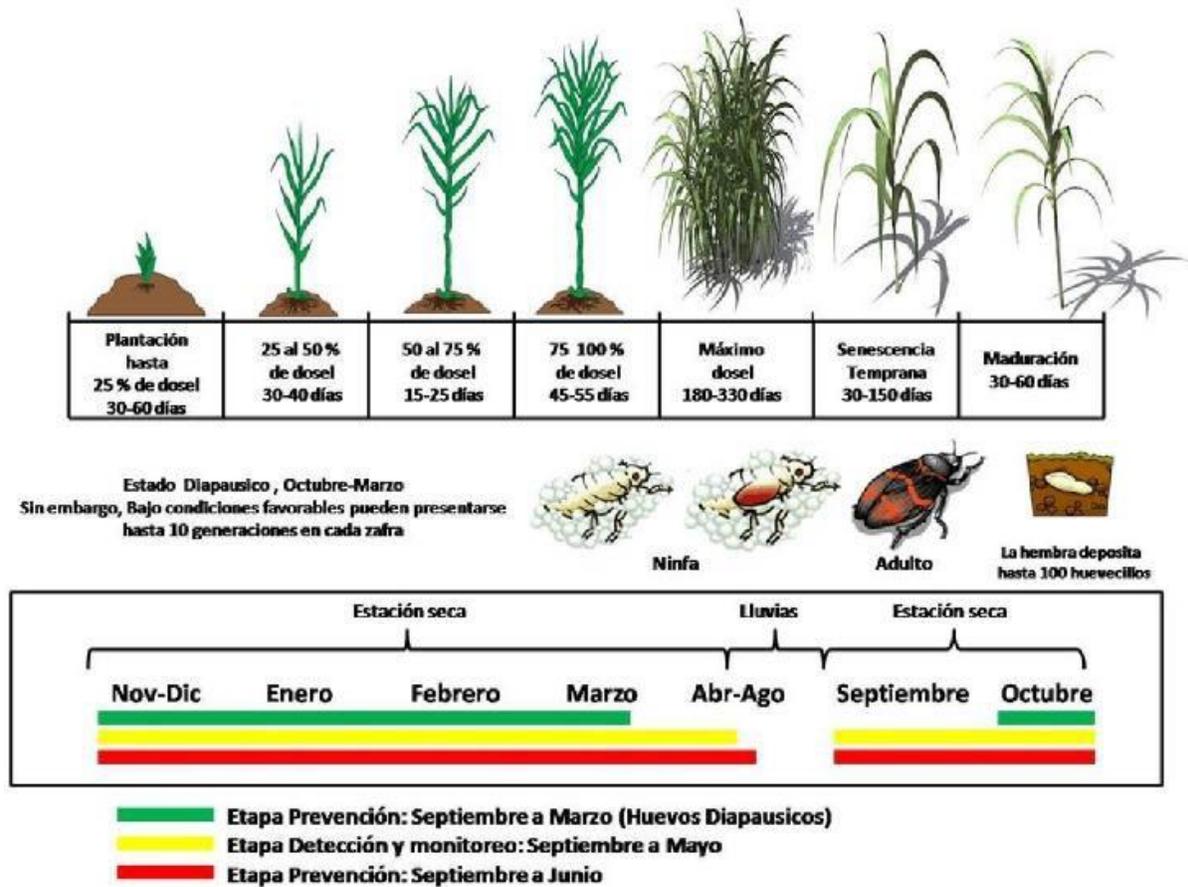


Figura 3.5 Etapa fenológica del cultivo y presencia de plaga

Para el caso de las plagas y enfermedades estudiadas en este trabajo, se harán calendarios similares, esto a partir de literatura y de bases de datos (robustas) generadas por el monitoreo de las plagas en cada uno de los ingenios. Los resultados servirán para calendarizar las visitas a campo y realizar el muestreo.

Una vez definidas las plagas a monitorear y conociendo su presencia temporal, se seleccionaran los sitios a muestrear. En estos sitios se realizarán seguimientos temporales sobre el avance de dichas plagas y para definirlos se tomará como base los trabajos hechos por los ingenios a partir del diseño del padrón cañero, donde se identifica por parcela la variedad del cultivo de caña, además de reconocer las características edafocológicas de cada región. Se tratará de buscar zonas homogéneas y donde las variedades de caña sean las más predominantes. Además, se usara como principal insumo, la base de datos de presencia de plagas histórica del Comité de Sanidad e Inocuidad de la Caña de Azúcar (COSICA) y lo comentado por los productores. Para la selección de las áreas de muestreo, las bases de datos georreferenciarán y se estandarizarán con las capas de información geográfica. Una vez teniendo toda la información geográfica almacenada en el SIG, se aplicará análisis multicriterio para facilitar la selección de las áreas.

### **3.3.2 Mediciones radiométricas hiperespectrales**

El objetivo de una campaña de radiometría de campo es caracterizar la respuesta espectral de superficies naturales y/o artificiales mediante radiómetros o espectrómetros, así como el estado de la atmósfera mediante fotómetros solares. Estas medidas dan soporte para la calibración de los sensores a bordo de satélites, para la corrección atmosférica de imágenes, así como el análisis y validación de productos de teledetección. Una campaña de radiometría de campo consiste en la adquisición de un conjunto de firmas de reflectancia espectral, denominado librería espectral, que caracterizan la respuesta de un tipo de material o superficie. Independientemente del objetivo de la campaña, la heterogeneidad de los datos es considerable en cuanto a los tipos de superficies, instrumentación aplicada, variedad de región espectral observada, y condiciones de adquisición. La optimización del uso de estos datos tiene que estar

basada en un sistema muy organizado de documentación y almacenaje (Hueni *et al.*, 2007).

Para las mediciones hiperespectrales se usara el escáner GER 1500 hiperespectral. Se medirá la respuesta espectral de las diferentes variedades de caña y en hojas con daños provocados por las plagas y enfermedades seleccionadas para este estudio. El muestro corresponderá al calendario fenológico del cultivo de la caña y de la presencia temporal de cada plaga y enfermedad. Se harán mediciones *in-situ* que colecta la radiación proveniente de la tierra en las bandas visibles e infrarrojas, presentando un registro continuo (~1.5 nm en 512 bandas) de la radiación emitida por la superficie en un ancho de banda espectral entre los 450 y 900 nanómetros (Darvishzadeh, 2008; SVC, 2009). Se harán entre 3 y 5 mediciones por punto, el espectroradiómetro será colocado en posición del nadir a una distancia de entre 0.3 y 0.4 m de la hoja, para que cubra campo de visión de 4° (0.02 m<sup>2</sup>) (Figura 3.6).



Figura 3.6 Ejemplo de mediciones en parcela

Los datos obtenidos por el barrido del espectroradiómetro GER 1500, se descargarán e importarán a una hoja de cálculo, se ordenarán por longitud de onda en forma ascendente y se hará el cálculo entre los datos de reflectancia del objeto (hojas de caña) y los datos del spectralon, para así obtener el coeficiente espectral. Los datos se graficarán, para su posterior presentación y se ordenarán en una hoja de cálculo en formato delimitado por tabulaciones, para su exportación al SIG y de esa manera crear la biblioteca espectral. Además, se usará como blanco de referencia un panel portátil de

spectralon cuya reflectancia espectral está caracterizada con precisión (Aguirre, 2001; SVC, 2009; De Miguel *et al.*, 2009; Agapiou *et al.*, 2012). Las mediciones se harán durante el periodo de presencia de la plaga o enfermedad, preferentemente 9:00 – 16:00 del día, con el fin de minimizar el efecto de la variación de la posición solar en la radiación incidente (Jerlov, 1976; Aguirre, 2001). Los resultados obtenidos se trabajaran según el manual de usuario de ENVI (en [http://aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso\\_SR/biblio\\_sr/ENVI\\_userguid.pdf](http://aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso_SR/biblio_sr/ENVI_userguid.pdf)), en la organización y descripción de las firmas espectrales, la clasificación de las firmas espectrales sobre imágenes hiper y multiespectrales se hará según los manuales ENVI (2004) y USGB (2010) (<http://speclab.cr.usgs.gov>).

### **3.3.3 ciones radiométricas multiespectrales**

Para las mediciones multiespectrales se usó el espectroradiómetro CROPSCAN MR modelo MSR5 multiespectral. Para tener representatividad, se hicieron entre tres y cinco lecturas por parcela (Webster y Oliver, 2001), además de tener la suficiente superficie para poder ser extrapolada en imágenes Landsat (30 x 30 m). Las mediciones se hicieron sobre los bordes de la parcela, para el caso de caña en crecimiento o maduración y dentro de la parcela en el caso de que la caña fuera plantilla.

Los datos radiométricos obtenidos en campo se escalarán a nivel pixelar (unidad espacial mínima que forma parte de una imagen satelital) y se correlacionaron con los diferentes niveles de daño para conocer su distribución espacial en zona cañera. Junto con las mediciones radiométricas, se tomará una fotografía a nadir con una cámara sony de 10 MGP, esto con el objetivo de estimar la cobertura del cultivo y el porcentaje de daño provocado por la plaga o enfermedad (Hernández *et al.*, 2011).

Se analizará el comportamiento espectral del dosel, los factores que afectan su reflectividad (proporción de hojas, lignina, el efecto del suelo, la geometría de las hojas y los ángulos de observación de éstas) (Hernández *et al.*, 2011). Para diferenciar la vegetación sin daño de aquellas con algún grado de afectación se calibrarán con información de campo (radiometría, % de cobertura, índice de área foliar, entre otros.) para así tener resultados con mayor precisión y confiabilidad. Los datos radiométricos

obtenidos en campo se escalarán a nivel pixelar (unidad espacial mínima que forma parte de una imagen satelital) y se correlacionaron con los diferentes niveles de daño para conocer su distribución espacial en zona cañera. Junto con las mediciones radiométricas, se tomará una fotografía a nadir con una cámara sony de 10 MGP, esto con el objetivo de estimar la cobertura del cultivo y el porcentaje de daño provocado por la plaga o enfermedad.

### **3.3.4 tura de imágenes a través de Vehículos Aéreos No Tripulados**

Un vehículo aéreo no tripulado (VANT), esta equipados con instrumentos de última generación como GPS, sensores infrarrojos, cámaras de alta resolución y controles de radares. Los VANT's, son capaces de enviar información detallada a satélites, que luego la dan a conocer al control de tierra, todo en cosa de milésimas de segundos. La agricultura de precisión, en síntesis, consiste en el empleo de nuevas tecnologías para un estudio detallado de la parcela, de manera que pueda aplicarse cada tratamiento de manera localizada. La agricultura de precisión empezó a estudiarse en los años ochenta, pero ha sido a partir del nuevo siglo cuando el desarrollo tecnológico y sobre todo el acceso barato a la tecnología han permitido su despegue definitivo.

Los beneficios de la agricultura de precisión son triples, permite reducir costes, mejora la rentabilidad de los cultivos y disminuye el impacto ambiental, ya que la aplicación de agroquímicos es dirigida y ajustada a los requerimientos reales de cultivo. Ejemplos de países que llevan usando VANT en la agricultura desde hace tiempo son Japón y Brasil. En el caso de Japón, Yamaha en 1991, sacó al mercado un helicóptero no tripulado concebido para rociar herbicidas y fertilizantes. En la actualidad, se los conoce bajo la denominación comercial RMAX, y son alquilados para tareas de fumigación. Brasil, es de los pocos países que cuenta con normativa que regula el uso de los vants y se suelen emplear en los campos de soja.

En estudios al respecto del uso de vants para detectar el crecimiento de malas hierbas en los cultivos extensivos (Peña *et al.*, 2013), se han tomado imágenes multiespectrales para el análisis de las distintas zonas de la parcela. El empleo de cámaras multiespectrales, implica que no sólo se toman imágenes ópticas convencionales sino también otras partes del espectro, como cámaras térmicas o de infrarrojos. El infrarrojo

permite discriminar estados de la vegetación, para conocer, por ejemplo, el estado nutricional o la salud del cultivo. Además, si la cámara lleva sensor térmico se puede conocer el estrés hídrico de las distintas zonas del cultivo. Los vants pueden volar a alturas dependiendo la necesidad del estudio permitiendo tomar fotografías de una gran resolución espacial.

### **3.3.5 Clasificación de imágenes de satélite a partir de firmas espectrales**

Los datos de reflectancia fueron sometidos al análisis geoestadístico conocido como "Análisis de Cúmulos". Este análisis se utiliza en algoritmos de clasificación multiespectral de imágenes digitales, aunque puede ser extendido a cualquier conjunto de datos multiespectrales. El análisis de cúmulos consiste en mapear los diferentes valores multiespectrales en un espacio  $n$  – dimensional ( $n$  es el número de bandas o longitudes de onda utilizados). Este mapeo origina que datos similares se agrupen formando cúmulos. Existen varios métodos para identificar cúmulos en el espacio multiespectral: supervisadas y no supervisadas (Aguirre, 2001). En la primera las áreas se denominan campos de entrenamiento (*training fields*) y sirven para entrenar a la máquina para que reconozca dichos tipos de cobertura. Una vez seleccionadas las áreas de entrenamiento, se calculan las estadísticas elementales de cada categoría: media, rango, desviación estándar, matriz de varianza-covarianza, entre otras, a partir de los números digitales de todos los píxeles incluidos en los campos de entrenamiento asignados a esa clase. Se asume que las áreas de entrenamiento son una representación fiel de las distintas categorías, y que, por lo tanto, los cálculos efectuados a partir de sus números digitales definen convenientemente a esas clases (Chuvienco, 1990). El método no supervisado es un conjunto sistemático o aleatorio de elementos es seleccionado del área de estudio. Esta muestra es analizada para encontrar grupos de elementos que sean similares espectralmente y no implica ningún conocimiento previo del área de estudio. A este método generalmente se le denomina de agrupamientos (*clúster*), debido a que se asume que los números digitales de la imagen forman una serie de agrupaciones o conglomerados. Estos grupos equivalen a píxeles con un comportamiento espectral homogéneo, por lo que deben definir clases espectrales de interés. La delimitación de cada grupo espectral se inicia indicando dos criterios: uno que mida la similitud entre píxeles y otro que marque las condiciones del

proceso de agrupamiento (Chuvienco, 1990). Para medir la similitud de los píxeles se utiliza el criterio de la distancia euclidiana y, en cuanto al proceso de agrupamiento, el algoritmo empleado para la clasificación se denomina ISODATA (*Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique*).

Con la base de datos de firmas espectrales por cobertura se construye un árbol de decisión. Este es un proceso de clasificación binaria que repetidamente divide un conjunto de datos en subgrupos sobre la base de una regla lógica en cada nodo del árbol. Estos métodos tienen ventajas sustanciales para las clasificaciones con imágenes debido a su naturaleza no paramétrica, lo cual les provee mayor robustez con respecto a las relaciones no lineales entre características y mayor velocidad de procesamiento. Numerosos trabajos señalan la inexactitud y complicaciones al generar clasificaciones a nivel de píxel (Espindola *et al.*, 2006; Peña-Barragán *et al.*, 2011 y Ursani *et al.* 2012). Utilizando imágenes multiespectrales (Landsat o SPOT) o hiperespectrales (EOA 1) se segmenta el territorio en unidades de cierta homogeneidad que representan las unidades de manejo agrícolas-ganaderas (lotes). Los píxeles puros seleccionados son clasificados con el árbol de decisión y el resultado es asignado a nivel de lote según la clase mayoritaria representada en cada segmento. La clasificación es evaluada utilizando el método de la matriz de confusión a partir de los datos relevados a campo en la campaña que se está clasificando. A partir del mapa resultado se estima la superficie cultivada mediante el método de regresión. El objetivo del método es generar una ecuación con la cual se corregirá el valor de superficie para cada clase arrojado por la clasificación. La variable independiente (X) es la superficie estimada a partir de la clasificación y la variable dependiente (Y) es la superficie muestreada a campo. Con las regresiones calculadas para cada clase, se ajustan la superficie obtenida en la clasificación corrigiendo sub o sobrestimaciones. El resultado es la superficie correspondiente a cada clase ajustada por regresión.

Para escalar los datos obtenidos en campo a las imágenes de satélite Landsat 8, se debe hacer un proceso de calibración radiométrica, ya que los datos que vienen almacenados en la imagen (o cualquier otra imagen obtenida mediante un sensor óptico), son valores digitales (ND). Estos niveles digitales no representan de manera directa ninguna variable biofísica y, por tanto, no se puede obtener algún índice

espectral usando dichos valores "crudos". Esto es debido a que los índices espectrales obtenidos con los sensores de campo contienen valores de reflectancia espectral de la superficie terrestre, mientras que los niveles digitales de dichas imágenes no proporcionan dicha información (Chander *et al.*, 2009).

Se usó el método de escalamiento de la radiancia espectral

$$L_{\lambda} = ((LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}) / (QCALMAX - QCALMIN)) * (QCAL - QCALMIN) + LMIN_{\lambda}$$

En donde:

$L_{\lambda}$  es la radiancia espectral en la banda de interés

QCAL = es el nivel digital (ND) que se desea convertir

$LMIN_{\lambda}$  = es la radiancia espectral en la banda  $\lambda$  correspondiente a QCALMIN

$LMAX_{\lambda}$  = es la radiancia espectral en la banda  $\lambda$  correspondiente to QCALMAX

QCALMIN = es el nivel digital mínimo calibrado (usualmente = 1; Landsat 8 = 1)

QCALMAX = es el nivel digital máximo calibrado (usualmente = 255; Landsat 8 = 65535)

Para convertir la radiancia a reflectancia se usa la siguiente fórmula (NASA, 2007):

$$\rho_p = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos \theta_s}$$

En donde:

$L_{\lambda}$  es la radiancia espectral en la banda de interés

d = es la distancia entre la tierra y el sol, en unidades astronómicas, que se puede calcular usando la ecuación de Eva and Lambin (1998).

ESUN<sub>i</sub> = es la irradiancia solar en la banda de interés (i) medida en el tope de la atmósfera

$\Phi_s$  = es el ángulo cenital solar (ángulo cenital = 90 – ángulo de elevación solar), que se puede obtener en el archivo de metadatos.

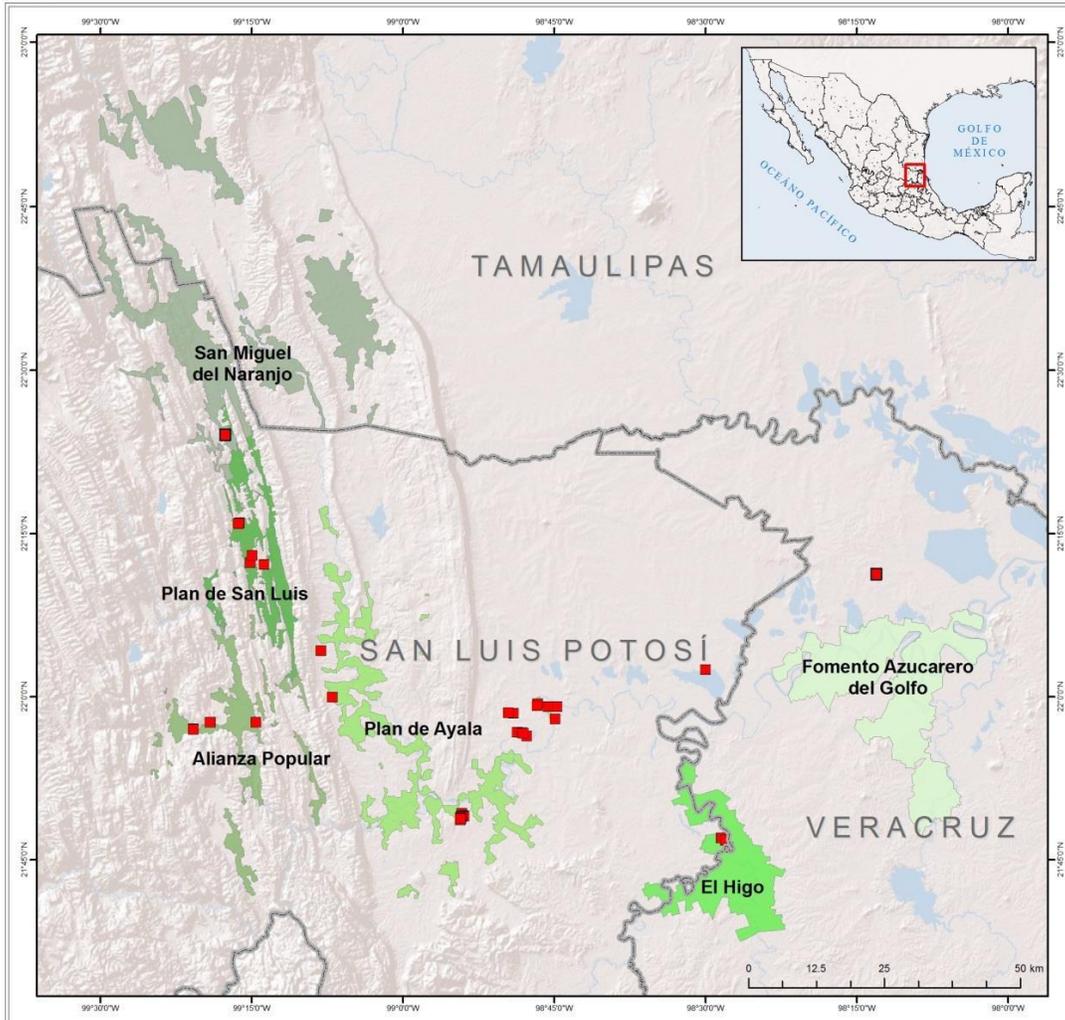
## 4. CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL Y BIOLÓGICA DE LA CAÑA DE AZUCAR EN LA HUASTECA POTOSINA

### 4.1 Localización del área de estudio

La región cañera de Huasteca potosina se encuentra al Este del estado de San Luis Potosí, entre las coordenadas extremas 21°41' - 23°4'N y 97°59' - 99°29'W. Abarca los ingenios de Plan de Ayala, Plan de San Luis, Alianza Popular y San Miguel el Naranjo. Esta zona es importante por la superficie de caña cultivada (> 120,000 hectáreas) que representa el 8.8% del total sembrado de todo el país (cuadro 4.1). Presenta la mayor tasa media anual de crecimiento agrícola con 3.1% en el periodo de 1998 – 2008 (SIAP, 2009). La Huasteca se define por ser el límite boreal de las selvas mexicanas y ser la línea divisoria entre Aridoamérica y Mesoamérica. Las características físicas y climáticas hace de esta zona potencialmente favorable para las actividades agropecuarias, sobre todo para el cultivo de la caña de azúcar, que constituye el principal cultivo perenne y agroindustrial detrás del maíz blanco para consumo humano y de los pastos de gramíneas para el ganado (Aguilar *et al.*, 2010; Galindo, 2006; INEGI, 2007). Las variedades de caña de dominan la región son MEX 55-32, MEX 68-1345, CP 722086, Co997 y MEX 68P23, aunque se cultivan cerca de 50 variedades más en esta zona (CNIAA, 2010).

4.1 Características generales de los ingenios cañeros de la Huasteca potosina

Ingenio	Estado	Superficie Ha	Zafra 2012 Caña molida (ton)	Rendimientos en campo Ton/ha	No. productores
San Miguel del Naranjo	San Luis Potosí, Tamaulipas	62,476	1,070,436	57	3,471
Plan de San Luis	San Luis Potosí	17,063	560,841	51	1,995
Plan de Ayala	San Luis Potosí	30,661	572,453	48	3,372
Alianza Popular	San Luis Potosí	16,595	574,642	43	4,211
<b>Total</b>		<b>126,795</b>	<b>2,778,372</b>	<b>49.7</b>	<b>13,049</b>
<b>Nacional</b>		<b>8.8%</b>	<b>8.9%</b>	<b>76</b>	<b>7.9%</b>

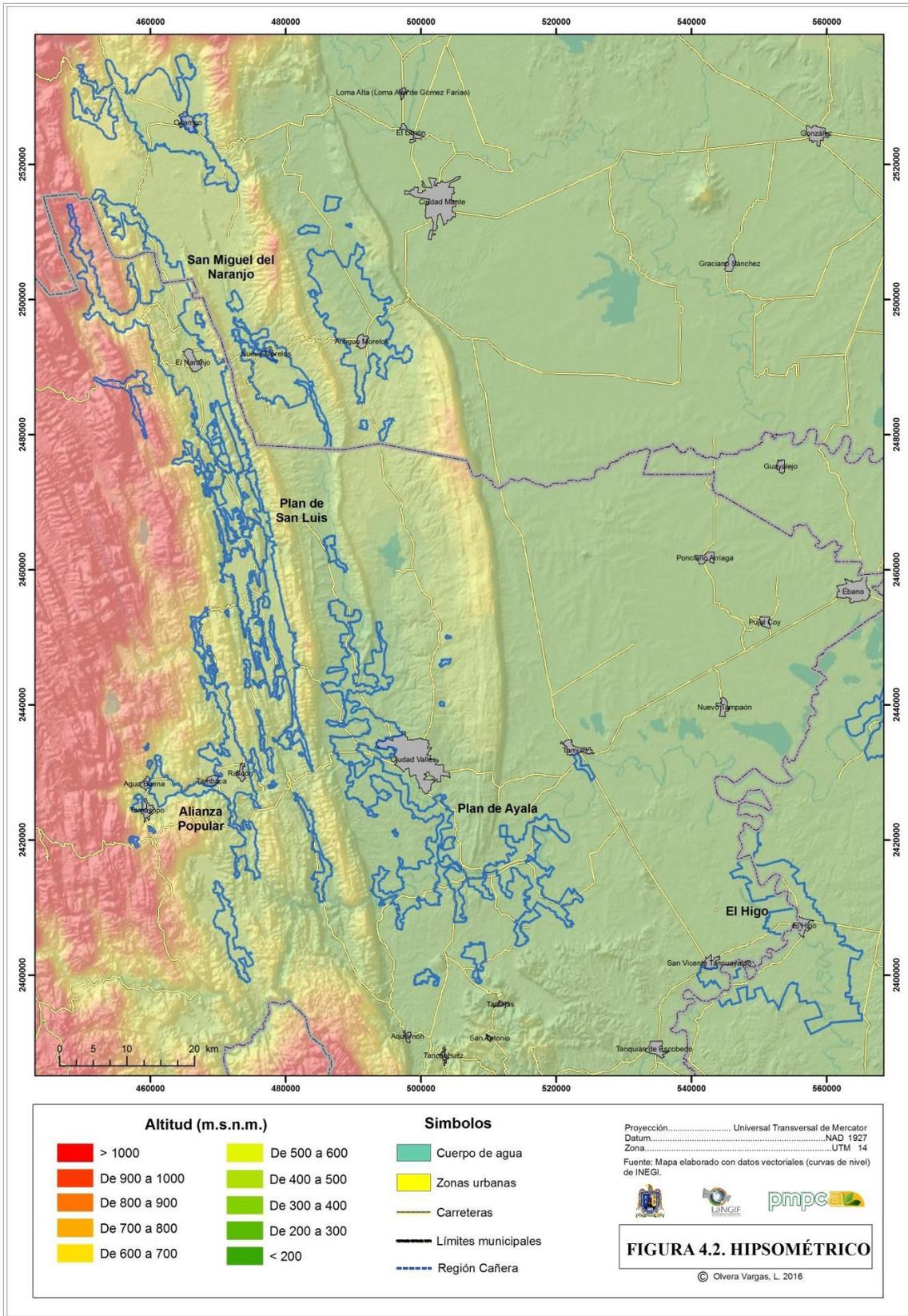


4.1. Localización de área de estudio

## 4.2 Características ambientales

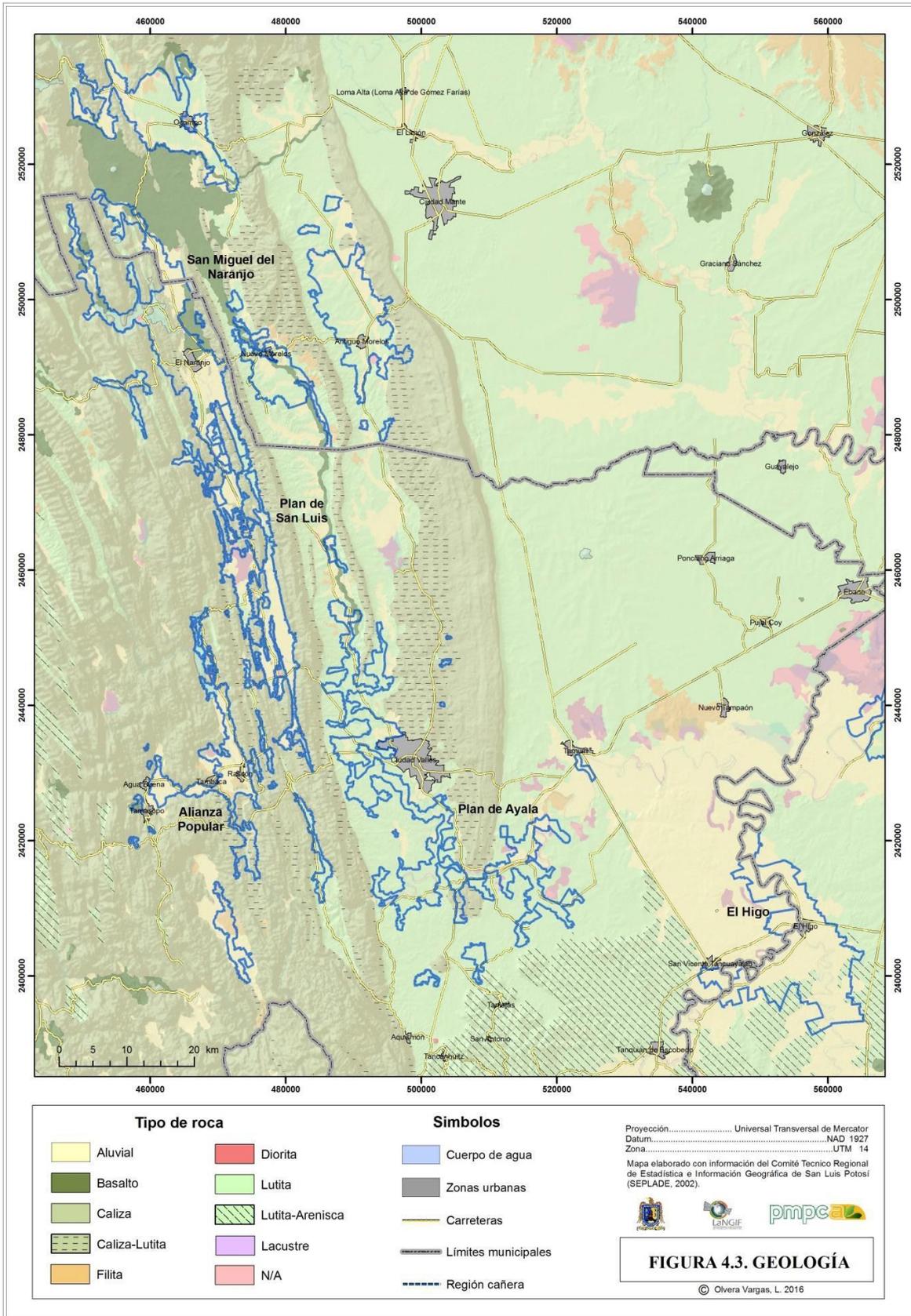
### 4.2.1 os orográficos

La Zona Cañera de la Huasteca Potosina (ZCHP) se localiza al extremo noreste de la provincia fisiográfica Sierra Madre Oriental, cercana con los límites de la Planicie del Golfo de México. En la zona se puede observar paisajes como: planicies costeras, lomeríos suaves de pendientes moderadas, valles intermontanos y valles de laderas tendidas en las partes bajas; piedemontes que presentan fuertes disecciones y acumulaciones aluviales; y las zonas altas, donde el relieve es abrupto y escarpado.



La zona cañera se encuentra desde los 10 msnm y hasta más de 1000 msnm, el 80% de la caña está a menos de 400 msnm, y el resto se encuentra a más altitud, encontrándose algunas huertas hasta los 1,200 msnm. Las áreas por encima de los 400 msnm predominan las laderas con pendientes mayores a los 15°, sin embargo existen valles intermontanos muy extensos de origen fluvial con reducida inclinación en donde se establece el cultivo de la caña. Debido a la forma de los plegamientos, la dirección de las laderas son predominantemente NE y SW (Figura 4.2).

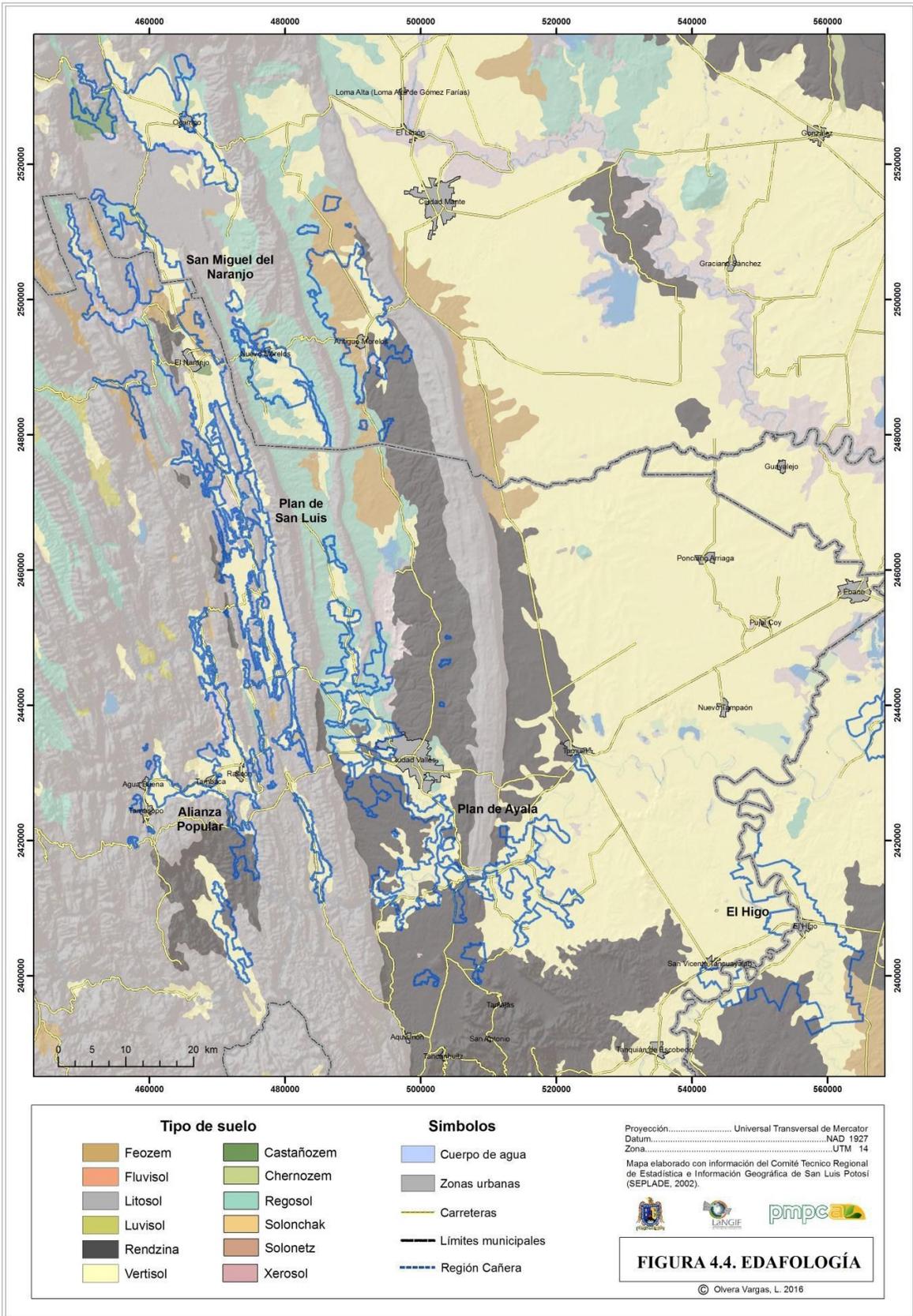
La morfología de la Huasteca potosina data del Cretácico y principios del Terciario, los levantamientos orogénicos y el retiro de los mares dio origen a plegamientos sedimentarios, de forma ondulada y paralelos, conocidos como anticlinales (crestas o cimas) y sinclinales (concauidades). La flexión en los anticlinales hace que la roca (predominantemente caliza) sea más susceptible a la erosión, por lo que la estructura de esta zona está constituida por dos flancos residuales y un valle en el centro. Los plegamientos de la zona están formados por antiguas rocas sedimentarias marinas, que sufren procesos de disolución por el agua, lo que define a la zona como cárstica. El llamado Carso Huasteco (subprovincia) presenta fuertes grados de disección en la roca, inclusive desarrollando fuertes cañones y mogotes (rocas picudas). En la ZCHP los diferentes eventos geológicos de tipo orogénico, asociados al relleno de las cuencas oceánicas, dieron origen a estratos sedimentarios. Formadas durante el Mesozoico y el Cenozoico, las rocas se encuentran de forma cronoestratificada con más de 2000 metros de espesor. La mayor parte de la zona pertenece al Cenozoico, específicamente formadas en el cretácico superior, predominando rocas caliza, caliza-lutita, lutitas, y algunas lutita-arenisca del jurásico medio (Figura 4.3). Las calizas se encuentran en las partes donde el relieve es abrupto, y predominan por arriba de los 400 msnm, sobre franjas con dirección NW-SE. Estas rocas se caracterizan por tener residuos calcáreos de organismos, con frecuencia contienen minerales de dolomita, partículas arcillosas y arenosas; son de color gris claro y crema y están dispuestas en estratos gruesos y masivos. Las caliza-lutitas son de color gris claro a gris oscuro y rojizo, tiene concreciones calcáreas, algunas de ellas fosilíferas, se encuentran sobre la misma franja que las calizas, pero sobre los lechos de los ríos más disectados (INEGI, 2002b; Lugo, 1989).



Referente a los suelos, en la ZCHP predominan los rendzina y litosoles (Figura 4.4). Estos suelos se encuentran dentro de un paisaje cárstico, lo que hace que tengan altos contenidos de carbonatos, derivados de calizas y lutitas que son intemperizados por la acción del agua y la temperatura. La mayoría de los suelos de esta región tienen fases líticas, son de origen residual, someros y de desarrollo moderado o incipiente. Las diferentes asociaciones vegetales (predominantemente selvas) los proveen de grandes cantidades de materia orgánica en forma de humus y es en parte por esta circunstancia que los suelos en su mayoría son de color oscuro. Los litosoles tienen una cobertura del 45% en la zona cañera, presentándose arriba de los 400 msnm sobre pendientes mayores a los 30°, están asociados con rendzinas y luvisoles crómicos (Figura 3.4). Son suelos someros, rocosos, de textura fina y media, presentan una capa superficial oscura, suave y rica en materia orgánica. Por su desarrollo en laderas abruptas se erosionan con mucha facilidad y sus rendimientos para la agricultura son bajos. Las rendzinas, principalmente calcáricos, se encuentran en el resto de la zona cañera, con altitudes que van entre los 700 msnm y menores a los 200 msnm, y están asociados con litosoles, vertisoles y feozem (Figura 4.4). Son someros en las partes con laderas abruptas y medianamente profundos en los valles y lomeríos, son oscuros y con altos contenidos de materia orgánica en el horizonte supsuperficial, de textura media a fina y están limitados por una capa de roca calcárica con altos contenidos de carbonatos. Son susceptiblemente a la erosión y sus rendimientos son medianamente bajos.

#### **4.2.2 Rasgos climáticos**

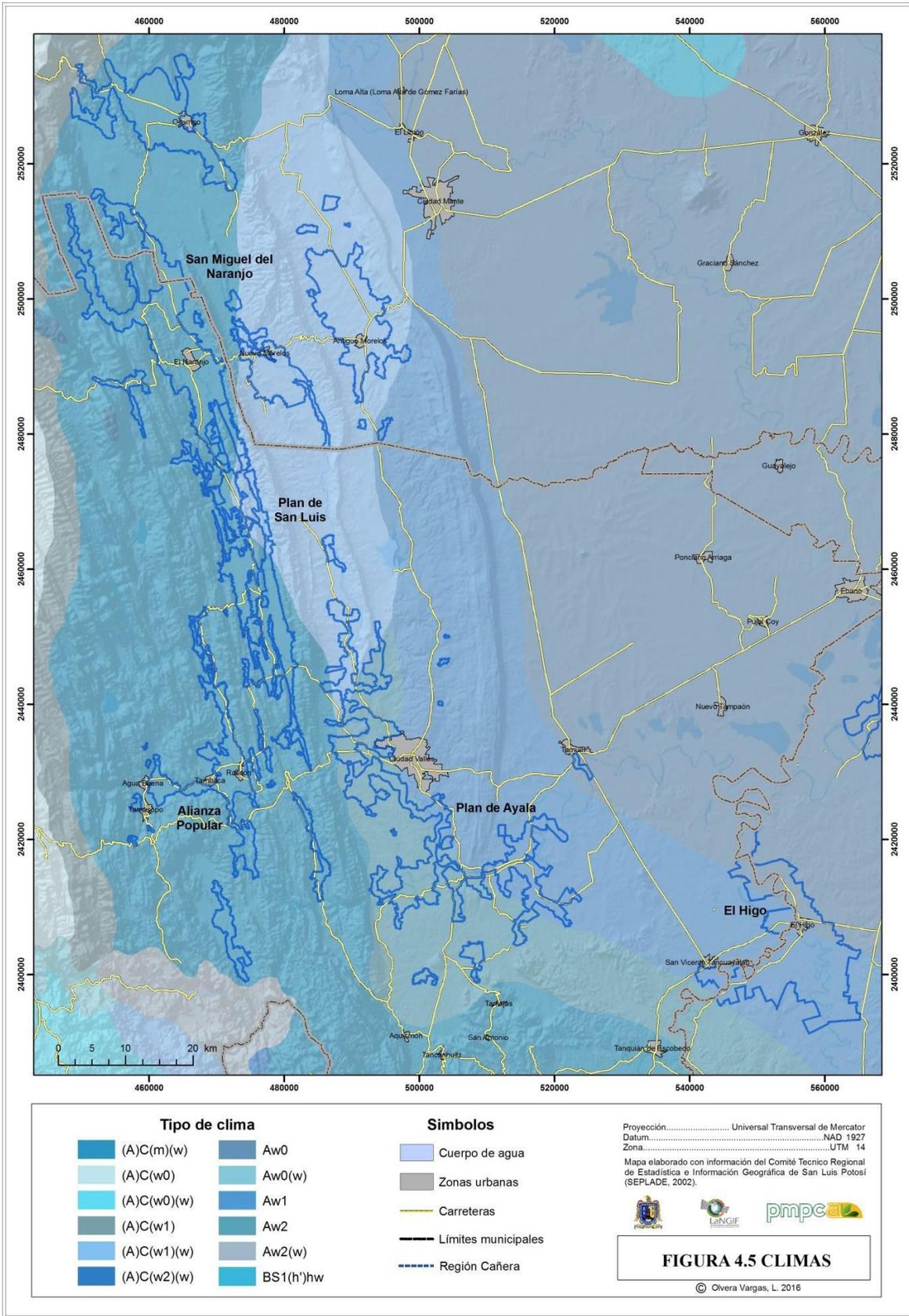
Los principales tipos de clima que se encuentran en la zona, de acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por García (1988), corresponden a cálidos húmedos y subhúmedos y semicálidos húmedos. En la parte baja (altitudes menores a 400 msnm) de la ZCHP predominan el clima tipo cálido húmedo con lluvias monzónicas en verano Am, seguidas por una franja de tipo cálido húmedo con lluvias abundantes todo el año Af(m) entre los 700 y 200 msnm.



En las partes más altas (mayores a 600 msnm), y por el efecto orográfico, se encuentra el tipo semicálido húmedo con lluvias abundantes todo el año (A)C(fm). Solo en una pequeña parte al sur de la ZCHP se encuentra el clima tipo cálido subhúmedo con lluvias en verano Aw2 (Figura 4.5). La temperatura disminuye conforme se eleva la altitud, por lo que en las zonas más bajas se reporta una temperatura media anual mayor a los 24°, con una mínima de 18° y una máxima superior a los 30° en verano. En la zona intermedia (altitud entre los 300 y 800 msnm) se tienen temperaturas medias anuales que van entre los 20° y 24°, donde su mínima es de 14° a 18° y una máxima de 26° a 30°. En altitudes superiores a los 800 msnm se registra una temperatura media anual de 19°, con mínimas mayores a los 12° y máximas que no rebasan los 25° en verano. A pesar de que en la zona no se registra niveles de sequía, estudios recientes han demostrado que parte de la ZCHP puede llegar a presentar un índice de severidad a la sequía fuerte, sobre todo en los años donde se reporta fenómeno del “Niño”.

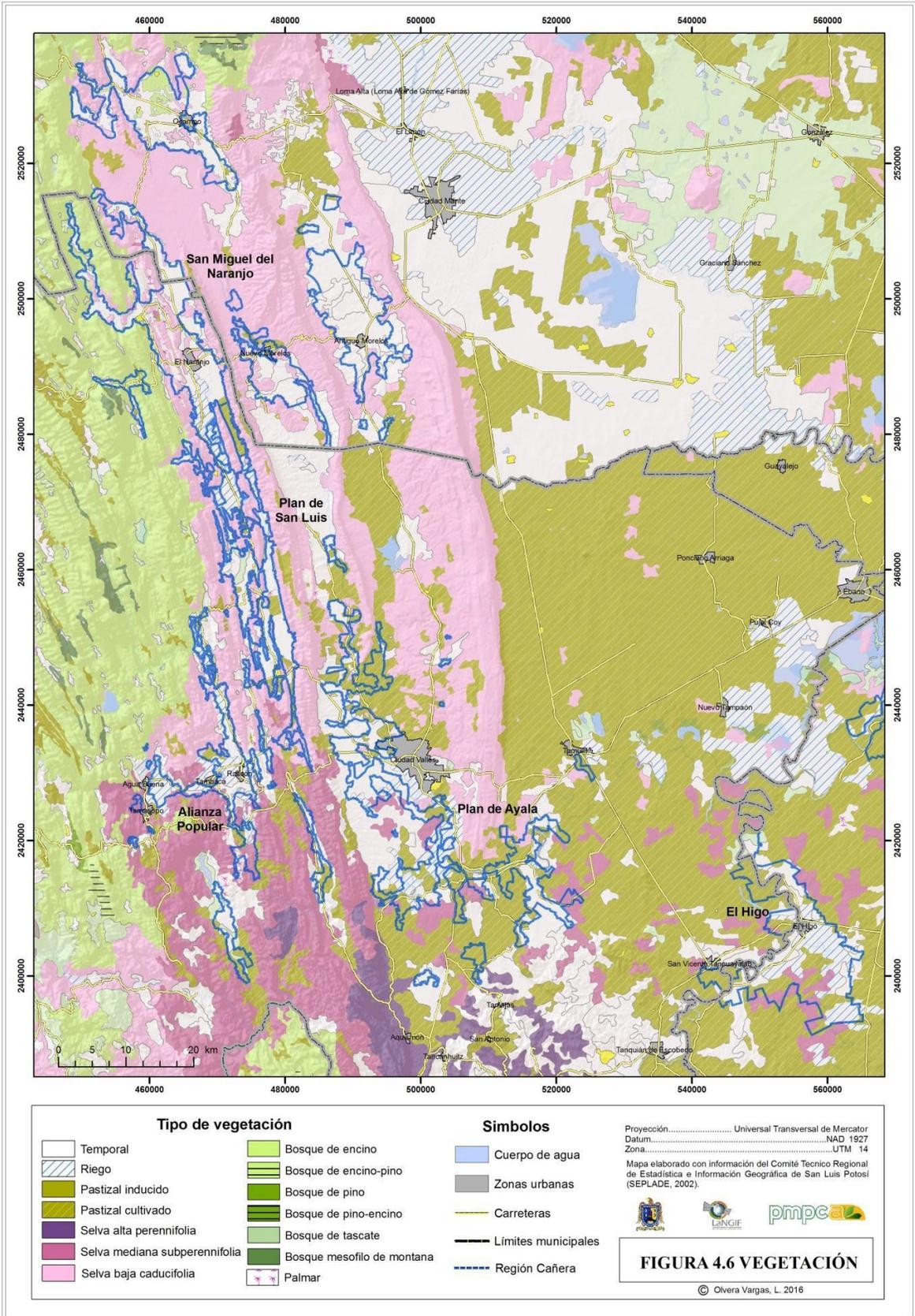
Como resultado de la humedad y la presencia de la barrera orográfica, la oscilación en las precipitaciones puede ser superiores a los 2000 mm anuales. En la parte más baja, se reportan precipitación media anual inferior a los 1800 mm, siendo los meses más lluviosos entre junio y octubre. La parte central, distribuida en un franja con dirección NW-SE y paralela a los niveles altitudinales, se registran precipitaciones medias anuales de entre 2200 y 2400 mm, y en las partes altas, específicamente al norte de la región, hay una zona con más de 2800 mm al año, presentándose la temporada de lluvia entre Junio y Octubre, siendo septiembre la más lluviosa con más de 500 mm.

En cuanto a la humedad relativa de la RCHP se registran porcentajes que van de 50 a 90%, donde en altitudes menores a 500 msnm se registra menos del 60%, entre los 500 y 1000 msnm 80% y a más de 1000 msnm humedad superior al 80%. Esto se debe al avance de las masas húmedas provenientes del Golfo de México, que en su ascenso por la Sierra Madre Oriental, provoca nublados y lluvias a lo largo de todo el año. A ello hay que añadir la humedad que trae consigo la presencia de ciclones en verano-otoño y de nortes en invierno.



#### 4.2.2 Rasgos de uso de suelo y vegetación

La vegetación de la ZCHP está asociada de forma directa con el tipo de clima y la altitud. Según Rzendowski (1978) la Huasteca Potosina es el límite boreal de las selvas tropicales, porque se encuentra vegetación de tipo arbóreo con alturas de 20 a 50 metros. En el extremo norte de la zona, predominan las selvas medianas subperennifolias, donde se pueden observar algunas especies predominantes como el palo santo (*Dendropanax arboreus*), chaca (*Bursera simaruba*), volantín (*Zuelania guidonia*), cedro (*Cedrela odorata*). En este tipo de selva se puede encontrar vegetación secundaria herbácea y arbustiva, lo que indica un grado de perturbación media. En la parte central y sur de la zona abundan las selvas altas perennifolias, con especies como *Bursera simaruba*, *Parmentiera aculeata* y *Piscidia communis*. Estas especies han ido desapareciendo y el estrato ha empezado a ser más bajo, donde se encuentran principalmente *Brosimum alicastrum* (ojite), *Heliocarpus velutinus* (jonote), *Ceiba pentrandia* (pochote) y *Ficus sp* (higerón). Muchas de estas especies se usan para la sombra de los cafetos, pero principalmente se usa *Inga edulis*. En unas pequeñas porciones de la RCHP se encuentran bosque encino y pino-encino, donde predomina la especie *Quercus*. (INEGI, 2002). La ZCHP ha sufrido intensos cambios de uso de suelo y vegetación en los últimos 30 años, ya que se tiene registrado pérdidas de hasta un 60% en la cobertura primaria, por lo que las selvas se encuentran asociadas con vegetación secundaria, principalmente arbustiva y arbórea (Galindo *et al*, 2005). En el 30% de la ZCHP se desarrollan actividades agropecuarias, que a pesar de lo accidentado del relieve, se ha incrementado considerablemente. Predominan pequeñas parcelas donde se siembra maíz, frijol, calabaza, chile y palmilla, estos tipos de cultivo están destinados al consumo propio de cada productor. También en la zona se puede observar algunas zonas con pequeñas áreas de pastizales, sobre todo en los valles intermontanos, que sirven de alimento para el poco ganado que se practica en la Huasteca sur (Figura 4.6).



### **4.3 Caracterización biológica de las principales plagas y enfermedades de la caña de azúcar**

La Huasteca Potosina, por sus características geográficas, ha permitido el desarrollo de las actividades agropecuarias intensivas como extensivas. Estas actividades provocaron que se transformaran paisajes selváticos y de sabana en planicies de agostadero y de plantaciones tropicales. Es este proceso se estimuló la pérdida de 88.77% de la vegetación primaria, en aproximadamente 60 años (Galindo, 2009). Como resultado del profundo impacto ambiental generado por las actividades agropecuarias y la deforestación, la Huasteca Potosina ha sido caracterizada como una zona vulnerable a la sequía. Otro de los problemas que trae consigo el deterioro ambiental, son la presencia de plagas, que según datos del Comité Estatal de Sanidad Vegetal de San Luis Potosí (CESV), la Huasteca es invadida por 12 especies diferentes de plagas, debido a la diversidad de cultivos que se cultivan en la zona. De estas, las que provocan mayores pérdidas económicas y ambientales son: broca de café, mosca de la fruta, Langosta, pulgón amarillo y mosca pinta.

#### **4.3.1 enador de la caña de azúcar**

Nombre científico: *Diatraea saccharalis* Fabricius, 1794.

Posición taxonómica

Phylum: Arthropoda

Clase: Insecta

Orden: Lepidoptera

Familia: Crambidae

Género: *Diatraea*

Especie: *Diatraea sacharalis*.

Nombre común: Barrenador del tallo de la caña, barrenador de la caña de azúcar, gusano de la caña de azúcar, taladrador de la caña de azúcar. Situación en México: presente en todas las áreas sembradas con cultivos hospederos (SIPOVE, 2011).

El barrenador de la caña de azúcar es un insecto que se encuentra confinado a los cañaverales de los Estados de Campeche, Chiapas, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, San Luis Potosí, Sinaloa, Tabasco, Tamaulipas y Veracruz. Sin embargo, se ha reportado en Guerrero, Nuevo León y Yucatán; en los cuales no se tiene caña de azúcar y está de forma esporádica en otros hospederos (Figura 4.7) (Bautista, 2006 y Rodríguez, 2009).

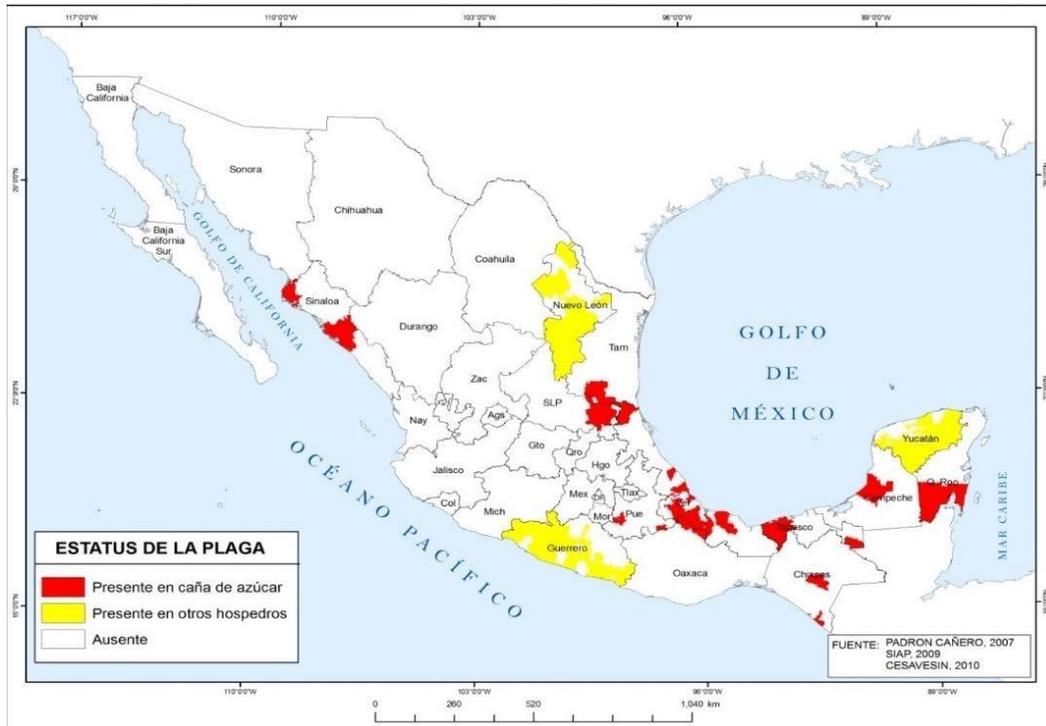


Figura 4.7. Distribución nacional del barrenador de la caña de azúcar (*Diatraea saccharalis*)

La cantidad de sacarosa que se pierde debido al ataque del barrenador puede variar dependiendo de factores tales como la variedad que se use y su etapa fenológica en la que es atacada. La correlación entre el daño y la pérdida por el barrenador de la caña de azúcar o la producción de sacarosa se han estimado de diferentes maneras: de cada tonelada de caña de azúcar se pierde 1.86 kg, 1% de sacarosa se pierde con cada aumento del 1% de entrenudos perforados y por tonelada de caña se pierde el 2.6 kg de sacarosa (Ulloa *et al.*, 1982; CPC, 2011). Respecto al jugo de caña para la fermentación alcohólica, un promedio estimado de 62 litros de etanol/ha se perdió por cada 1% de entrenudos perforados (López *et al.*, 1983; CPC, 2011).

Las larvas dañan diferentes partes de la planta (Cuadro 4.2), hacen galerías o túneles en el interior del tallo de caña de azúcar (Figura 4.7), lo que disminuye el flujo de agua y nutrientes en la planta (Aragón, 1996; Serra y Trumper, 2006). Este daño en plantas jóvenes causa una coloración amarillenta o tejido seco en el cogollo, el cual es llamado “corazón muerto” (Figura 4.7).

Cuadro 4.2. Daños de *D. saccharalis* por parte vegetal

Parte vegetal	Daño
Puntos de Crecimiento	Alimentación interna Galerías o túneles (perforaciones) Corazón muerto
Hojas	Alimentación Marchitez
Tallo	Alimentación Decoloración de la corteza Fasciación

C PC, 2011



Figura 4.7 a) Daño de la larva de *D. saccharalis* en tallo y b) Daño de corazón muerto (Lastra y Gómez, 2006; CESVMOR, 2009)

En plantas más viejas el tejido sostén se debilita debido a las galerías internas, ocasionando que los tallos se rompan al haber vientos fuertes e incluso las plantas mueren. También disminuye la cantidad y pureza del jugo que se extrae de la caña y reduce el contenido de sacarosa de éste, en proporción de 10 a 20%. Cuando el barrenador ataca la caña para semilla, aumenta la susceptibilidad de esta semilla a pudriciones destructivas (Álvarez y Pérez, 2004).

#### Daños Directos

- Muerte del punto de crecimiento del tallo (meristemo primario).
- Perforación del tallo formando galerías longitudinales y transversales.
- Destrucción de yemas (Ríes 1981; Flores 1989; Álvarez y Pérez, 2004).
- Pérdida del contenido de sacarosa y disminución de °Brix.
- Daño de "corazón muerto".
- Reducción del valor germinativo de los colmos o semillas vegetativas (Gallego, 1946 y Guagliumi, 1962; Bioagro, 2011).

Las poblaciones de adultos pueden ser monitoreados y/o estimados utilizando trampas de luz negra (Mendes *et al.*, 1980; CPC, 2011) o el uso de trampas cebadas con hembras vírgenes (Sanford, 1977; CPC, 2011) o con feromonas sexuales (Botelho *et al.*, 1978; CPC, 2011). Como grado de infestación en cogollos, se muestrea 50 metros lineales, buscando solo cogollos o corazones muertos (Cuadro 4.3) (Rodríguez, 2011).

Cuadro 4.3. Grado de infestación en base al muestreo de cogollos o corazones muertos.

<b>Total de cogollos muertos en 50 m</b>	<b>Grado de infestación</b>
5	Baja (ejercer medidas fitosanitarias)
12	Media (ejercer control)
>20	Alto o grave

Rodríguez, 2011

Los campos de caña a veces se muestrean en la cosecha para medir la intensidad de ataque por parte de *D. saccharalis* durante el período vegetativo. Un índice común es el porcentaje de entrenudos dañados por tallo o por unidad de área. Estos datos son relativamente fáciles de obtener antes de la carga de caña que ha sido quemada, cortada y amontonada. También el porcentaje de tallos dañados se utiliza a menudo como un indicador de la intensidad del ataque, aunque es más recomendable utilizar el porcentaje de entrenudos dañados como indicador (CPC, 2011). Otra variable como indicador externo de los daños ocasionados por el ataque de *D. saccharalis* puede ser la relación entre el número de entrenudos barrenados por las larvas y el número de orificios ocasionados en las plantas (Serra y Trumper, 2006). El umbral económico ha

sido en general en el rango de 2 a 8 larvas de barrenadores por cada 100 tallos (Hall y Bennett, 1994; CPC, 2011).

Los diferentes estados que comprende el ciclo de vida del insecto muestran con frecuencia algunas diferencias en su duración, como resultado del valor nutritivo de la planta hospedante, así como de las condiciones ambientales imperantes, sobre todo la temperatura (Bioagro, 2011). Las épocas de mayor incidencia son entre mayo y septiembre. Dependiendo de la región donde se localice, se pueden presentar 4 o 5 generaciones por año (Legaspi *et al.*, 1997; GAM, 1998; Rosas *et al.*, 2005). Los huevos y las larvas jóvenes sufren mortandad ante las fuertes lluvias. El tiempo seco también puede aumentar la mortalidad de huevos y larvas jóvenes. En las zonas cálidas, donde el barrenador no se somete a una diapausa invernal, todas las etapas de este pueden presentarse en la caña de azúcar al mismo tiempo todo el año (CPC, 2011).

### Ciclo biológico de *Diatraea saccharalis* Fabricius

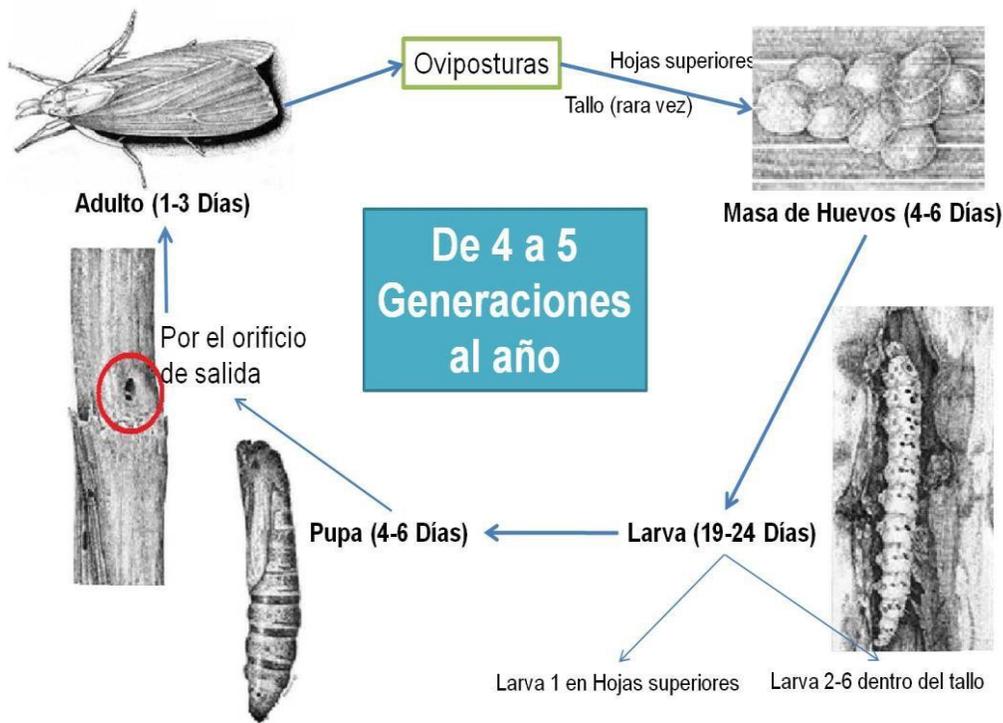


Figura 4.8 Ciclo biológico del barrenador de la caña de azúcar (*Diatraea saccharalis* Fabricius) (García, 2011).

El barrenador del tallo de la caña de azúcar ha afectado más de 200,000 hectáreas en los Estados de San Luis Potosí, Colima, Tamaulipas y Nayarit (Ries 1981; Álvarez 1999; Álvarez y Pérez, 2004). Los daños directos e indirectos reducen el rendimiento entre 1 y 18 ton/ha de caña dependiendo de la intensidad de ataque. En Jalisco para el ingenio Melchor Ocampo esto representó en promedio una reducción de 24,000 toneladas de caña tan solo en 4,000 de las 10,500 hectáreas cultivadas con un valor de 7.0 millones de pesos aproximadamente los cuales se pierden anualmente (Álvarez y Pérez, 2004).

Se ha estimado que en las zonas cañeras en general, existe de 15 a 28% de entrenudos barrenados, existiendo el riesgo de que si no se ejerce un control sobre esta plaga el nivel de daño económico que genera puede ser estratosférico, ya que no solo afecta al cultivo, sino también a la industria (Flores 1994; Álvarez y Pérez, 2004).

#### **4.3.2 Mosca pinta de la caña de azúcar**

Nombre científico: *Aeneolamia contigua* Walker

Posición taxonómica

Phylum: Arthropoda

Clase: Insecta

Orden: Hemiptera

Familia: Cerpopidae

Género: *Aeneolamia*

Especie: *Aeneolamia contigua*

Nombre común: Chinche salivoza, mosca pintada, salivazo, quemazón de la caña.  
Situación en México: presente en todas las áreas sembradas con cultivos hospederos (SIPOVE, 2011).

La distribución de la mosca pinta en México (Figura 4.9), comprende la Vertiente del Golfo: el Sur del Estado de Tamaulipas, Nuevo León, La Huasteca Potosina, Veracruz, Hidalgo, Puebla, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo; en el lado del Pacífico

comprende los Estados de Chiapas, Oaxaca, Guerrero, Colima, Nayarit, Sinaloa y recientemente, Sonora (Cázares, 1985, Miranda, 1999 y Bautista, 2006).

El salivazo o mosca pinta es la plaga más perjudicial en caña de azúcar y pastos. Esta plaga puede llegar a provocar reducciones significativas hasta del 60% en los rendimientos (Bayer, 2010). El daño que la mosca pinta causa puede dividirse en dos tipos: a) provocado por la ninfa al alimentarse de las raíces y tallos de la planta, b) provocado por el adulto al alimentarse de retoños y hojas (Umul, 2000). Las manchas de color amarillo blancuzco que aparecen en las hojas son un síntoma de la infestación de este insecto, lo que ocasiona una seria disminución en el área disponible para la fotosíntesis y en la productividad de cañaverales y pastizales (Thompson y León, 2005). Introduce toxinas en las hojas al perforarlas y succionar sus jugos. Las áreas dañadas de la hoja se secan gradualmente. Si la infestación es grave, las lesiones se fusionan y grandes porciones de la hoja mueren (Ortega, 1987).

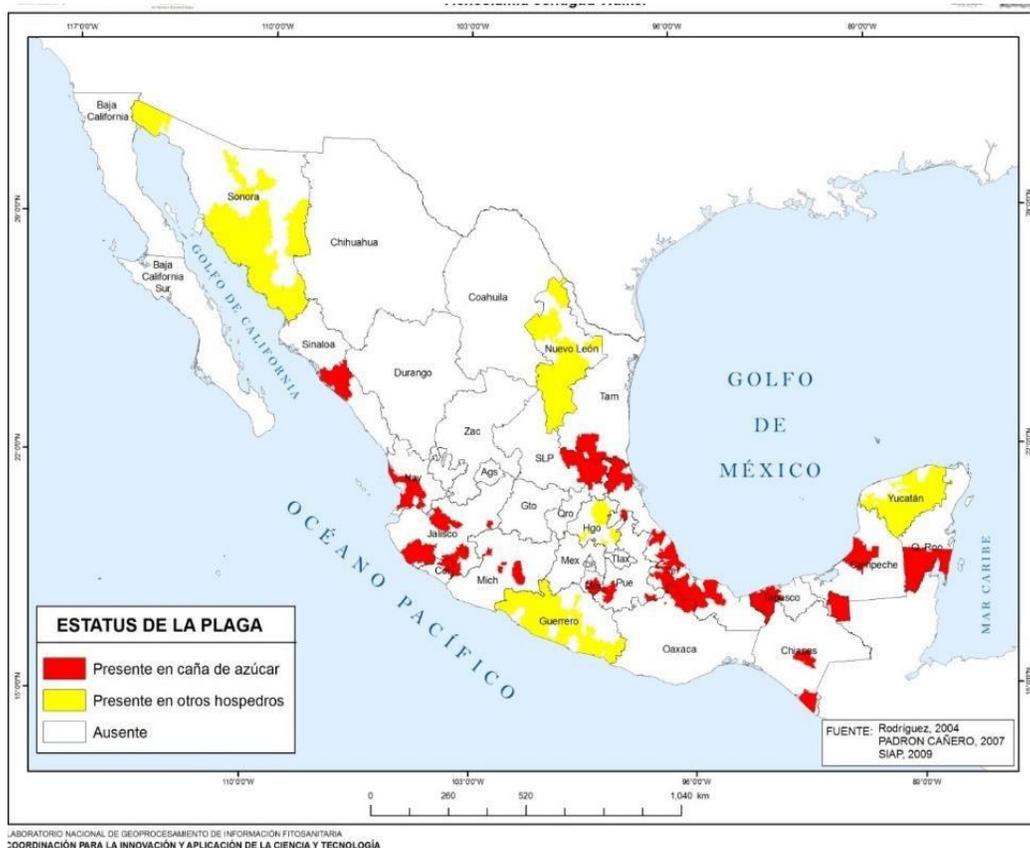


Figura 4.9. Distribución nacional de la mosca pinta o salivazo (*A. contigua*).



Figura 4.10. Disminución del área foliar para realizar la fotosíntesis por daños de mosca pinta (izq), adulto de *A. contigua* (Der) (Gómez, 2007).

Carrillo (1994) menciona que en estudios realizados en México a nivel de campo y laboratorio, describe el ciclo biológico de la mosca pinta. El apareamiento de los insectos (macho y hembra), ocurre de 48 a 72 horas después de emergido el adulto, y las hembras se aparean solamente una vez en su vida. El número de huevecillos que oviposita cada hembra, varía de 39 hasta un máximo de 150. La incubación de los huevecillos que son puestos en los meses del verano, requiere generalmente de 10 a 15 días. En las condiciones de temperatura y humedad predominantes durante los meses del verano en los cañaverales de la vertiente del Golfo de México (30° a 37°C y más de 70% de humedad relativa), el estado de la ninfa o salivazo tarda de 19 a 27 días. Los insectos adultos viven de 1 a 2 semanas, tiempo en que tiene lugar el apareamiento y se alimentan del jugo de las hojas de la planta, se estima un periodo de 6 a 7 semanas para el ciclo completo (huevecillo, ninfa y adulto) de los insectos de la segunda y tercera generaciones, bajo las condiciones de lluvia y humedad prevalentes en la cuenca del Papaloapan, durante los meses de julio a septiembre.

Cuando las infestaciones de mosca pinta son demasiado altas, se llegan a perder grandes extensiones de pastos. En la década de los 60's, se reportaron pérdidas de 60,000 a 400,000 hectáreas de pastizales de los 6 millones existentes en la región del Golfo de México, perdiendo los ganaderos cerca de 500 millones de pesos anuales; por ello su importancia como plaga de gramíneas y su insistente manejo, para evitar este riesgo en plantas de uso para el hombre (Cázares, 1985).

### 4.3.3 Roya anaranjada de la caña de azúcar

Nombre científico: *Puccinia kuehnii*, (W. Krüger) E.J. Butler 1914

Posición taxonómica

Phylum: Basidiomycota

Clase: Urediniomycetes

Orden: Uredinales

Familia: Pucciniaceae

Nombre común: roya de la caña, roya anaranjada de la caña de azúcar. Situación en México: presente en todas las áreas sembradas con cultivos hospederos (SIPOVE, 2011).

En julio de 2008, se detectaron síntomas sospechosos a la roya anaranjada (*P. kuehnii*), en un lote de caña de azúcar del Centro de Investigación y Desarrollo de la Caña de Azúcar (C.I.D.C.A), localizado en la localidad de Tuxtla chico, Tapachula, Chiapas, México. Estas muestras sospechosas a *P. kuehnii*, fueron diagnosticadas y confirmadas mediante la Técnica Molecular de PCR, por el “Systematic Mycology and Microbiology Laboratory” ubicado en Beltsville, Maryland, USA. En México fue observada afectando las variedades MEX 57-1285, MEX 61-230 y CO-301 (Angel *et al.*, 2010). Actualmente se encuentra presente en Chiapas (Villa Comitán, Tuzantán, Huehuetán , Mazatán, Huixtla), Quintana Roo (Othón P. Blanco), Veracruz (Úrsulo Galván y El Higo) (Figura 4.11) (NAPPO, 2010).



Figura 4.11. Distribución nacional de la roya anaranjada (*P. kuehnii*).

En las hojas las lesiones iniciales son pequeñas manchas cloróticas, que a Son que se agrandan principalmente alargándose y desarrollan halos de color amarillo-verdoso pálido. Sin embargo, el color de la lesión en el estado de madurez cambia del naranja al naranja – pardo o al amarillo – parduzco. Las pústulas aparecen principalmente en la superficie inferior de la hoja, tienden a estar agrupadas y son generalmente más numerosas en la mitad inferior de las hojas que en el ápice (Ryan y Egan. 1979).

La temperatura óptima para tener la germinación de las uredosporas es de 20-25° C. La mejor esporulación se da en un rango de 25 – 30° C, siendo de 26° C, la temperatura óptima y la máxima esporulación ocurre a los 11 días de haberse formado el uredo. Las infecciones por la roya anaranjada (*P. kuehnii*), es favorecida por condiciones cálidas y húmedas durante el verano, así como condiciones húmedas, pero de suaves a frescas en otoño. Las fases más vulnerables de la planta, se extienden a mitad del periodo

entre el crecimiento y la madurez. La enfermedad raramente se presenta en caña joven. La severidad de la epifitias de la roya anaranjada se incrementa de forma exponencial con el tiempo. Este es el motivo por el que aparecen de manera repentina durante condiciones ambientales favorables. La germinación de las esporas ocurre dentro del intervalo de 17-34°C de temperatura, pero la óptima es de 18°C y 97% de humedad relativa. El proceso infectivo requiere de humedad, que puede provenir de la lluvia o el rocío. La infección puede presentarse en unas cuatro horas en condiciones idóneas para su desarrollo. La dispersión de las esporas a las hojas superiores y campos adyacentes se ve favorecida por un ambiente seco y por el viento.

La dispersión de la enfermedad se da principalmente de forma natural por el acarreo por el viento a grandes distancias de hasta 2000 km (CPC, 2007). Otra forma es que vayan adheridas a la ropa de gente procedente de países con presencia de la roya anaranjada. No hay reportes de que se transmita por semilla ni por insectos (CPC, 2007). Otro medio de propagación es menor en la ropa de los que tienen contacto con el cultivo. Un par de casos de nuevos brotes menores fueron asociados con el movimiento de personas de enfermos a los cultivos no infestados. Ha habido muchos informes de los trabajadores agrícolas que viajan a través de cultivos enfermos y emergentes con camisetas naranjas, cubiertos de urediniosporas. También otro medio asociado de propagación es en el movimiento de las hojas enfermas en zonas libres de enfermedades. Partes de la planta que se sabe que puedan contener a la plaga a través del transporte y comercio: corteza, tubérculos, bulbos, rizomas, flores, inflorescencias, conos, cáliz, frutas (inc. vaina), medio de cultivo las plantas de acompañamiento, raíces, tallos (por encima del suelo), brotes, troncos, ramas y madera.

La roya anaranjada de la caña de azúcar (*P. kuehni*) había sido registrada como una enfermedad de menor importancia en los países donde ha estado presente por largo tiempo. Ocurre de forma esporádica y rara vez alcanza las proporciones epidémicas en los cultivos comerciales de caña de azúcar. Sin embargo, North (1915), reporta que las variedades hawaianas en la Isla de Fiji, fueron severamente afectadas por esta roya, mientras que la variedad Batoe, en Queensland, Australia, fue completamente eliminada. Este patógeno, en el año 2000 devastó a la variedad Q124, la cual

representaba el 45% del cultivo en Australia y causó a la Industria pérdidas por 150 millones de dólares. Se cree que esto se debió a la aparición de una raza en ese país o que llegó del exterior. La magnitud de las pérdidas causadas por la epifita de la roya anaranjada en el 2000 fue tal que la rentabilidad de las explotaciones de caña de azúcar y las fábricas de azúcar en las zonas más afectadas se redujo significativamente. En algunos casos, los agricultores no tienen la financiación de volver a plantar los cultivos de caña resistentes y en un caso, la fábrica de azúcar suministra financiación para el programa de replantación. Reducciones de beneficios afectaron a la estructura social de la comunidad agrícola de caña del centro de Queensland, ya afectados por baja rentabilidad de la industria. Había un costo social importante asociado a este brote de moho.

La susceptibilidad de las variedades de caña de azúcar a *P. kuehnii* está correlacionada con el número de uredosporas producidas por soros o por unidad de área foliar infectada, pero no, con el periodo de latencia, la longitud de los soros en 15 días, ni tampoco con el número de pústulas producidas por unidad de área foliar infectada. La producción de uredosporas es más confiable para la evaluación de la resistencia de los genotipos a la roya, que la producción de uredosoros. No obstante, en ambos agentes causales, el número de pústulas producido por hojas ha sido usado como criterio para determinar la susceptibilidad de genotipos de caña de azúcar a la roya, aún cuando en investigaciones recientes se ha demostrado que no hay correlación entre el número de pústulas y el número de uredosporas producidas en diferentes especies. El genotipo del hospedante y la edad de la planta son factores importantes para el desarrollo de ambas royas en el cultivo de la caña de azúcar. En dependencia del genotipo de los hospedantes, la gama de síntomas puede ser desde abundante y bien esporulados, hasta la presencia de puntos necróticos o una ligera clorosis. Las plantas jóvenes de 2-6 meses de edad son más sensibles a la roya que las plantas maduras (25,26), por lo que la severidad de la enfermedad disminuye a menudo con la edad. La asociación entre la severidad de la roya y los factores del suelo, tales como pH y nutrientes, ha sido informada por Anderson *et al.* (2007). Sin embargo, la interacción genotipo-ambiente es un problema muy específico, por lo que se debe tener precaución al hacer generalizaciones de los casos. Existen criterios, que la severidad de la roya es

promovida por la fertilización nitrogenada El diagnóstico de *P. kuehni*, mediante síntomas, signos y características morfométricas no dan certeza a su identificación. De esta manera, solo se podrían señalar características consistentes a las de la roya anaranjada, por lo se requiere del análisis molecular mediante la prueba de PCR, para que sea determinada a especie.

## **5. VARIABILIDAD ESPACIAL DE LAS PLAGAS DE LA CAÑA DE AZÚCAR Y SU DETECCIÓN A TRAVÉS DE SENSORES HIPERESPECTRALES**

La utilización de sensores (remotos) portátiles en la agricultura también se han especializado, particularmente los de tipo hiperespectral, ya que a través de éste se puede ver la longitud de onda electromagnética detalladamente en términos de la posición específica de las bandas de absorción, forma del espectro, variabilidad espectral y similitud o diferenciación con otros tipos de vegetación (Rama *et al.*, 2007). Estos sensores, conocidos como espectralradiómetros de campo, se usan para obtener firmas espectrales in situ, que robustecen la calidad del análisis espacial y temporal; en estos sistemas óptico-electrónicos, la radiancia recibida por los componentes ópticos se descompone en un continuo de cientos de bandas, lo cual ofrece una mejora potencial en la evaluación de los cultivos (Shippert, 2004; Reisig y Godfrey, 2007).

La importancia de estos sensores portátiles de campo radica en la obtención pura de la firma espectral del objeto medido, el cual puede correlacionarse con los datos de sensores satelitales, y si son iguales y simultáneas, se puede generar un etiquetado espectral dentro de la imagen que ayude a la sistematización automática a partir de píxeles de entrenamiento que diferencien características en cultivos de una misma área (Aspinal *et al.*, 2001). Por lo tanto, la organización e integración de estas firmas pueden hacerse partir de la construcción de librerías espectrales (también conocidas como bibliotecas) que pueden dar cuenta de la variabilidad entre especies vegetales y la discriminación entre vegetación sana (o sin daño aparente) y con deficiencias nutrimentales.

### **5.1 Calendarización de la presencia de plagas y enfermedades en la Huasteca potosina**

En el caso del barrenador *Diatraea saccharalis* la base de datos cubre el periodo de diciembre de 2009 a abril de 2013. Dichos datos fueron proporcionados por el Comité de Sanidad e Inocuidad de la Caña de Azúcar (COSICA) en su mayoría y el resto recabados con recorridos en campo. Dentro los atributos más importantes de las bases de datos se encuentran: coordenadas, superficie, variedad, número de barrenadores, tipo de barrenadores, daño, entre otros. Los daños del barrenador se presentan cuando

las larvas hacen galerías o túneles en el interior del tallo de caña de azúcar, lo que disminuye el flujo de agua y nutrientes en la planta (Aragón, 1996; Serra y Trumper, 2006). En plantas jóvenes el daño causa una coloración amarillenta o tejido seco en el cogollo, el cual es llamado “corazón muerto”. En plantas más viejas el tejido sostén se debilita debido a las galerías internas ocasionando que los tallos se rompan al haber vientos fuertes e incluso las plantas mueren (Figura 5.1). También disminuye la cantidad y pureza del jugo que se extrae de la caña y reduce el contenido de sacarosa de éste, en proporción de 10 a 20%. Cuando el barrenador ataca la caña para semilla, aumenta la susceptibilidad de esta semilla a pudriciones destructivas (Álvarez y Pérez, 2004).



Figura 5.1 Daño en tallo de caña de azúcar por *D. saccharalis* y síntomas de amarillamiento (corazón muerto) en la Huasteca Potosina

Los diferentes estados que comprende el ciclo de vida del insecto muestran con frecuencia algunas diferencias en su duración, como resultado del valor nutritivo de la planta hospedante, así como de las condiciones ambientales imperantes, sobre todo la temperatura (Bioagro, 2011). Con las bases de datos analizadas, se generó el periodo de mayor presencia de la plaga en las áreas cañeras de las Huastecas (Figura 5.2).

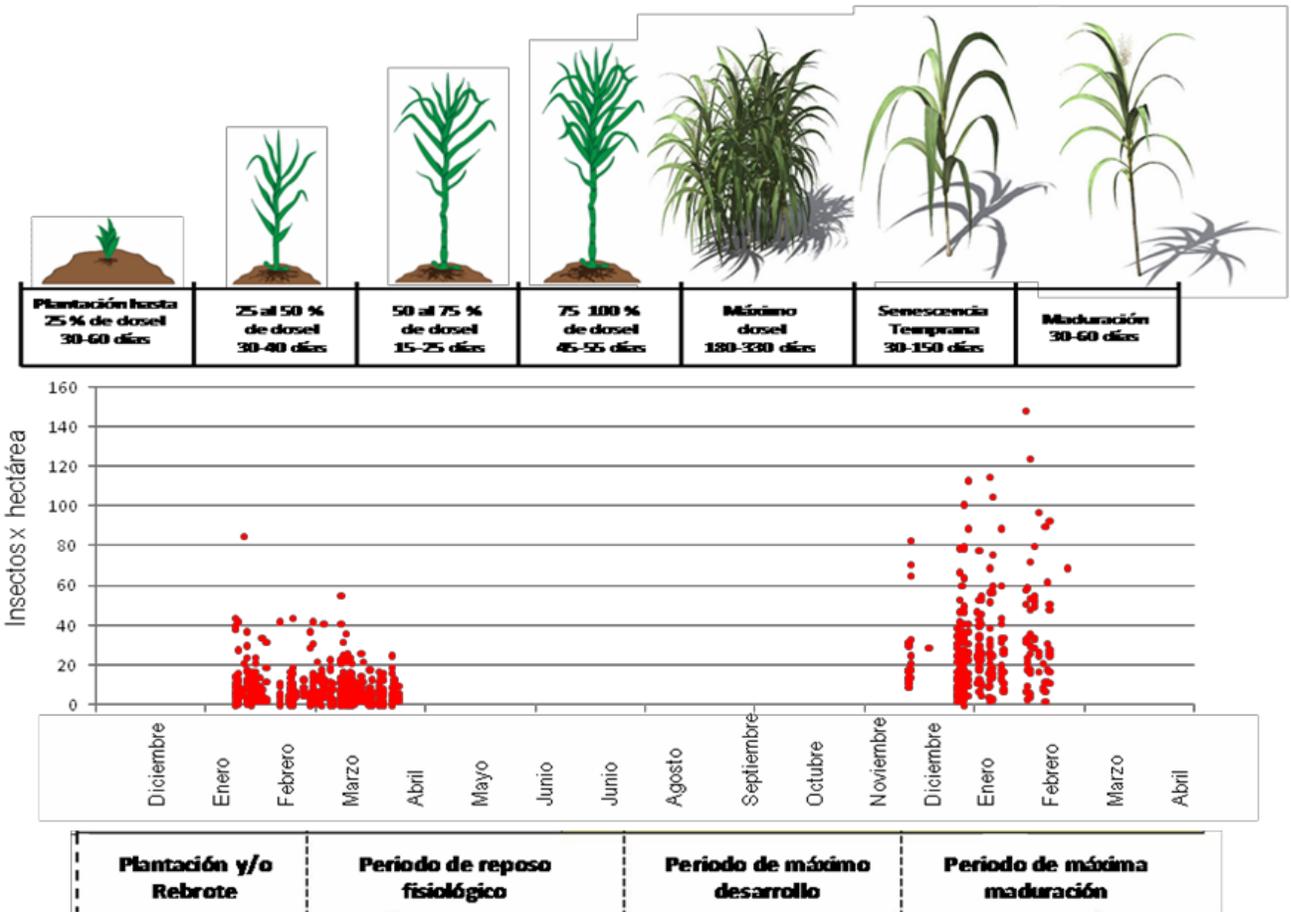


Figura 5.2. Presencia de barrenador (*Diatraea saccharalis* y *Eoreuma loftini*) respecto al ciclo fenológico de la caña de azúcar (modificado de Aguilar, 2011)

Aunque los datos de muestreo elaborados por COSICA reportan barrenadores todo el año, la mayor incidencia es en el periodo otoño/invierno. Dependiendo de la región donde se localice, se pueden presentar 4 o 5 generaciones por año (Legaspi *et al.*, 1997; GAM, 1998; Rosas *et al.*, 2005). Los huevos y las larvas jóvenes sufren mortandad ante las fuertes lluvias. El tiempo seco también puede aumentar la mortalidad de huevos y larvas jóvenes. En las zonas cálidas, donde el barrenador no se somete a una diapausa invernal, todas las etapas de este pueden presentarse en la caña de azúcar al mismo tiempo todo el año (CPC, 2013).

En el caso de la mosca pinta *Aeneolamia contigua* está condicionada a la presencia de lluvias. En junio o julio, que comienzan las primeras lluvias en la región (varían dependiendo del fenómeno ENSO) los huevecillos eclosionan, dando lugar a ninfas o salivazos que se pegan a las raíces de la planta y más tarde afloran hasta los canutos

del tronco de la caña. En condiciones meteorológicas normales, ya que dependen de la humedad y temperatura, se pueden presentar hasta cinco generaciones, pero si esas condiciones son favorables pueden llegar hasta 10 generaciones en un año (Rodríguez, 2004; SIPOVE, 2011). A finales de noviembre (fin de época de lluvias) los insectos adultos que se forman en esta época, al ovipositar dan origen a lo que se conoce como “huevecillos invernantes y/o diapausicos”, los cuales permanecen enterrados en el suelo desde noviembre hasta mayo del año siguiente (SIPOVE, 2011).

La mosca pinta es la plaga más perjudicial en caña de azúcar y pastos. Esta plaga puede llegar a provocar reducciones significativas hasta del 60% en los rendimientos (Bayer, 2010). El daño que la mosca pinta causa puede dividirse en dos tipos: el daño provocado por la ninfa al alimentarse de las raíces y tallos de la planta y el daño provocado por el adulto al alimentarse de retoños y hojas (Umul, 2000). Las manchas de color amarillo blancuzco que aparecen en las hojas son un síntoma de la infestación de este insecto, lo que ocasiona una seria disminución en el área disponible para la fotosíntesis y en la productividad de cañaverales y pastizales (Thompson y León, 2005). Introduce toxinas en las hojas al perforarlas y succionar sus jugos. Las áreas dañadas de la hoja se secan gradualmente. Si la infestación es grave, las lesiones se fusionan y grandes porciones de la hoja mueren (Ortega, 1987).

Con bases de datos elaboradas por COSICA, se reporta la mayor incidencia entre junio y noviembre de ésta plaga (Figura 5.3). Seguido de estas fechas la mosca pinta oviposita sus huevecillos a unos 2 cm de profundidad entre los tallos de la caña. Permanece dentro del suelo, todo el invierno y la primavera, durante los seis meses más secos del año (diciembre a mayo). Con las primeras lluvias (principios de junio o julio), los huevecillos eclosionan, dando lugar a pequeños insectos sin alas, estas son las ninfas o salivazos que se pegan a las raíces de la planta y más tarde afloran hasta los canutos del tronco de la caña (Rodríguez, 2004).

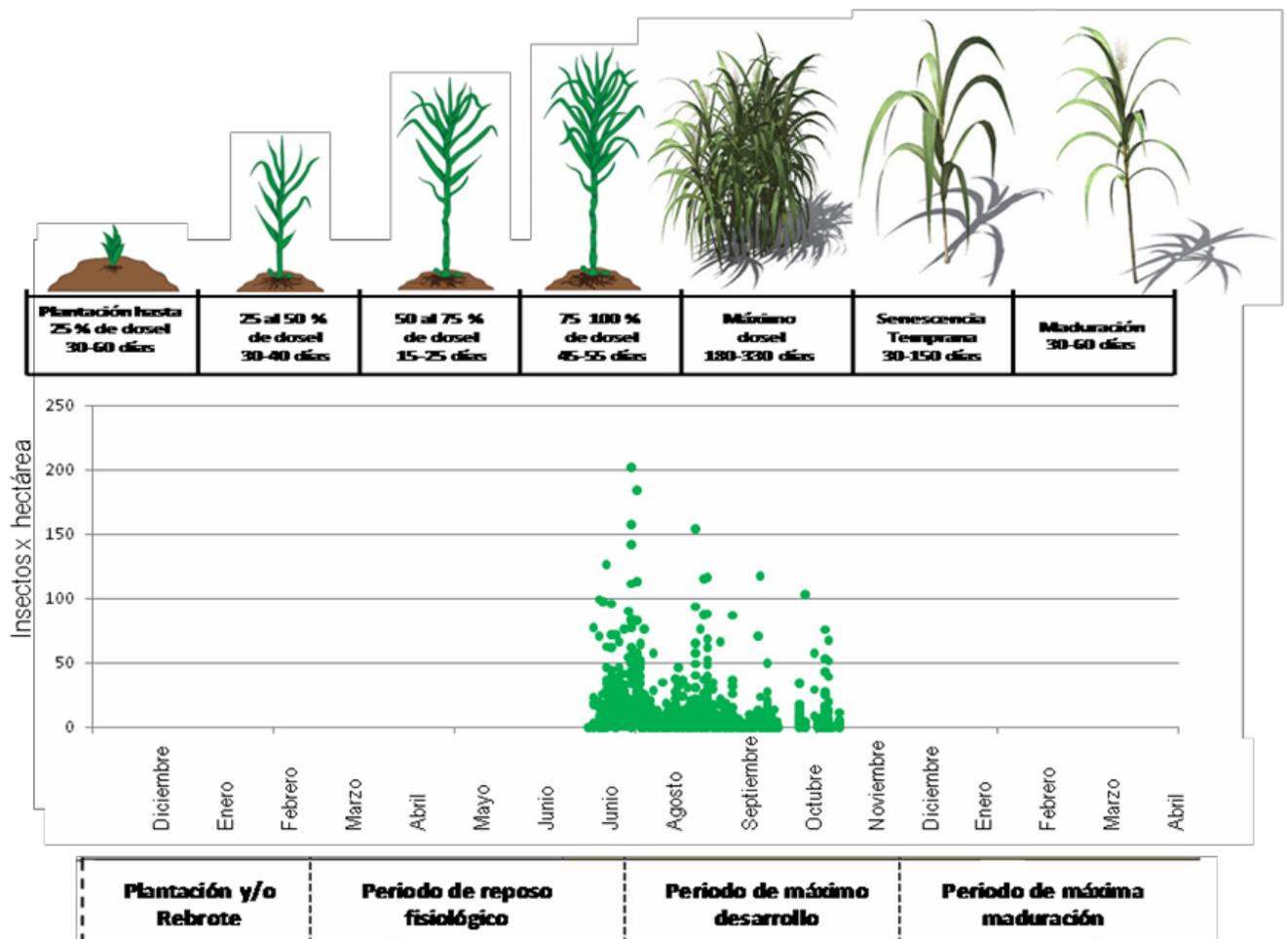


Figura 5.3 Presencia de mosca pinta (*Aeneolamia contigua* Walker) respecto al ciclo fenológico de la caña de azúcar (modificado de Aguilar, 2011)

La roya anaranjada es una plaga de importancia económica, ya que en México existen alrededor de 50 variedades que puede dañar (DGSV, 2012). La literatura señala que aparece en verano y otoño y se ve favorecida por las condiciones templadas y húmedas, además en ciclos alternos de lluvia con días secos y la presencia de rocío durante las noches y parte de las mañanas, son condiciones favorables para la infección y producción de esporas (Newton, 2007; Barrantes y Chavarrías, 2009) Bajo estas condiciones, la Huasteca Potosina presenta dichas condiciones climáticas en el periodo invernal, donde se pueden registrar más de ocho horas con punto de rocío (SMN, 2013). Hasta ahora, el Comité Estatal de Sanidad Vegetal de San Luis Potosí, ha

reportado media docena de sitios con presencia de roya anaranjada, presentándose entre el periodo máximo de crecimiento de la caña y su maduración (Figura 5.4).

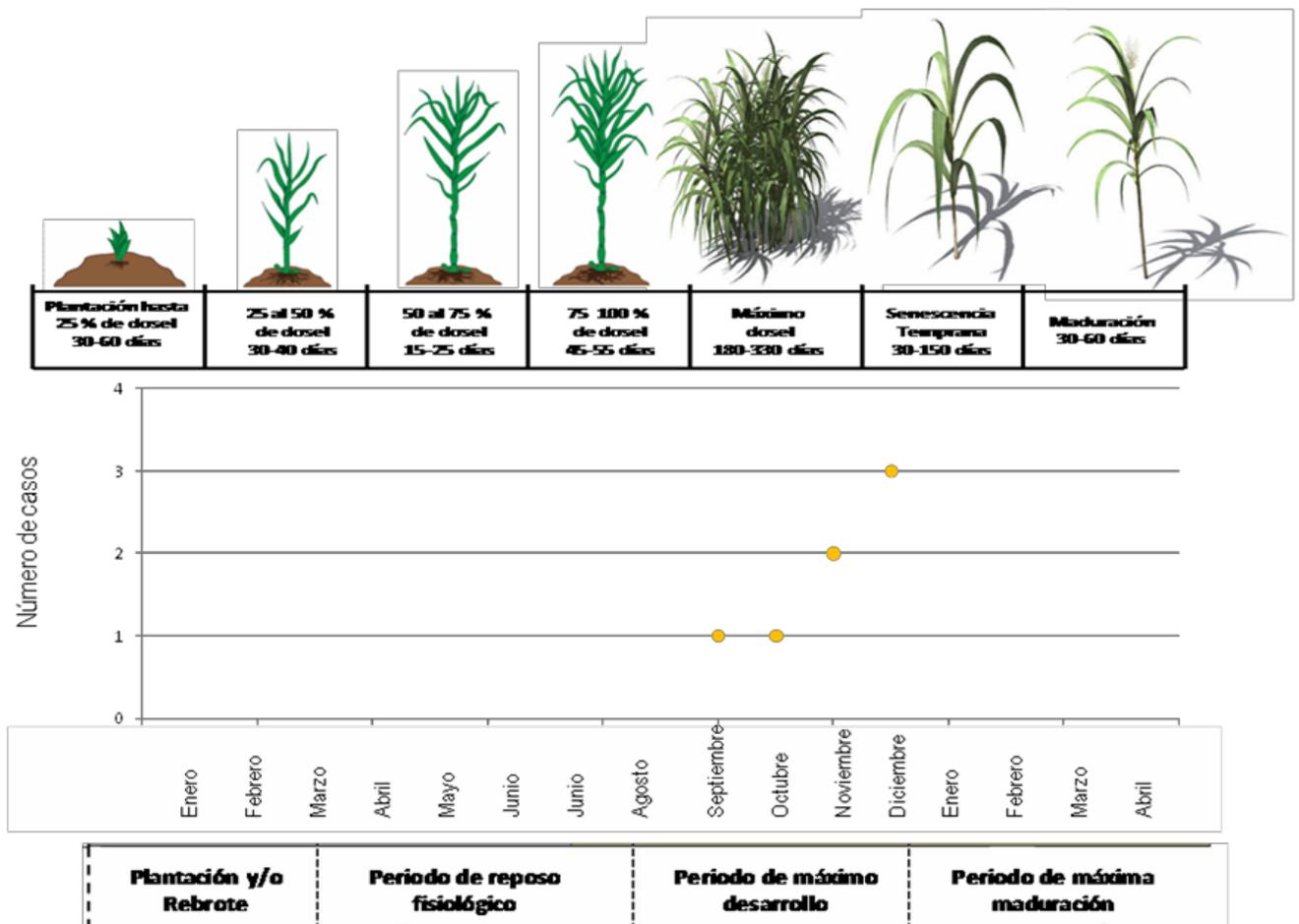


Figura 5.4 Presencia de Roya anaranjada (*Puccinia kuehnii*) respecto al ciclo fenológico de la caña de azúcar (modificado de Aguilar, 2011)

La severidad de la enfermedad está dada en gran medida por el genotipo del hospedante y la edad de la planta. Dependiendo del genotipo la gama de síntomas puede ser abundante y bien esporulados, hasta la presencia de puntos necróticos o una ligera clorosis. Por otra parte, las plantas de 2 a 6 meses son más susceptibles a la roya que las plantas maduras, por lo que la severidad de la enfermedad disminuye a menudo con la edad (Victoria *et al.*, 1984; Victoria *et al.*, 1990; Infante *et al.*, 2009).

En base a la calendarización de mayor incidencia de las plagas anteriores, el muestreo por plaga quedó así:

Cuadro 5.1 Temporalidad de presencia del barrenador, mosca pinta y roya anaranjada

PLAGA	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
BARREADOR	■											■
MOSCA PINTA						■						
ROYA ANARANJADA	■											■

Las bases de datos del muestreo de cada plaga se superpusieron a los cuadrantes de las zonas cañeras, obteniendo así las áreas posibles a muestrear, donde la presencia del barrenador está en 370 cuadrantes, 313 para mosca pinta y 22 para roya anaranjada. En la Figura 5.5 se muestran los cuadrantes con características para muestrear.

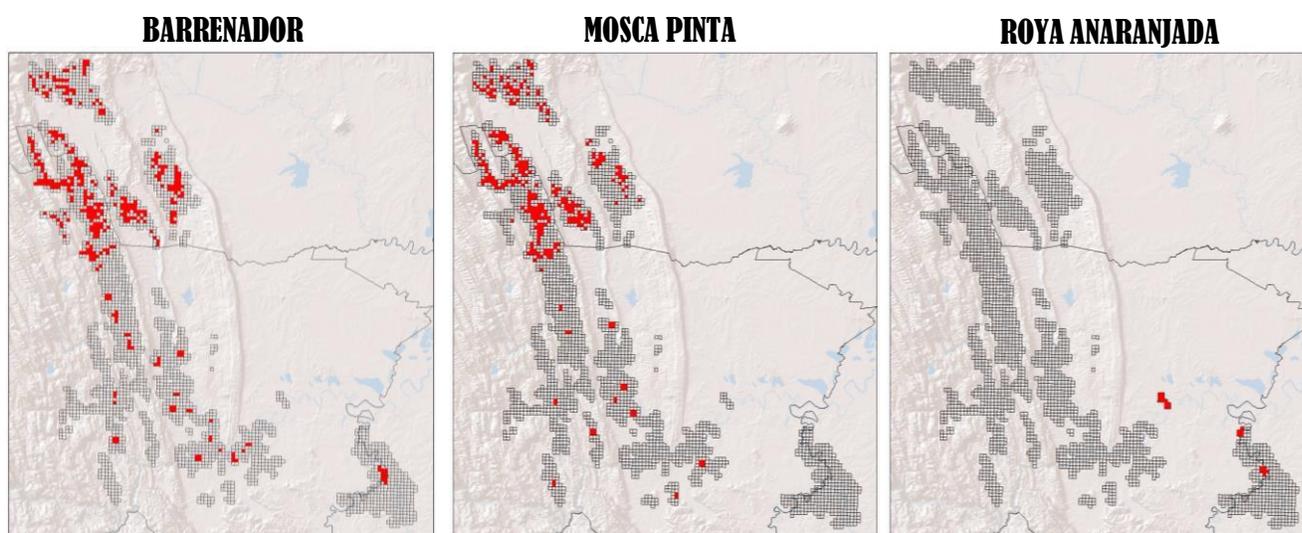


Figura 5.5 Selección de cuadrantes para cada plaga

## 5.2 Firma hiperespectral

Se realizaron mediciones en 80 parcelas (dentro de la misma parcela se tomaban datos donde no presentara daño aparente por alguna plaga o enfermedad, y lugares con daño por alguna de las plagas) donde se obtuvo por medio del radiómetro la firma hiperespectral de las siguientes variedades: MEX68-P23, MEX73-1240, RD75-11, MEX1366, MEX55-32, CP72-2086, CP23-137 y SP70-1284. Las variedades tuvieron un rango de edad aproximado entre los 2 y hasta los 15 meses. Los sitios donde se hicieron las mediciones, pertenecen a los cuatro ingenios del estado de San Luis Potosí y el Ingenio El Higo, en Veracruz (Figura 5.6). Las mediciones corresponden a dos campañas de muestreo realizadas en noviembre de 2012 y febrero de 2013.

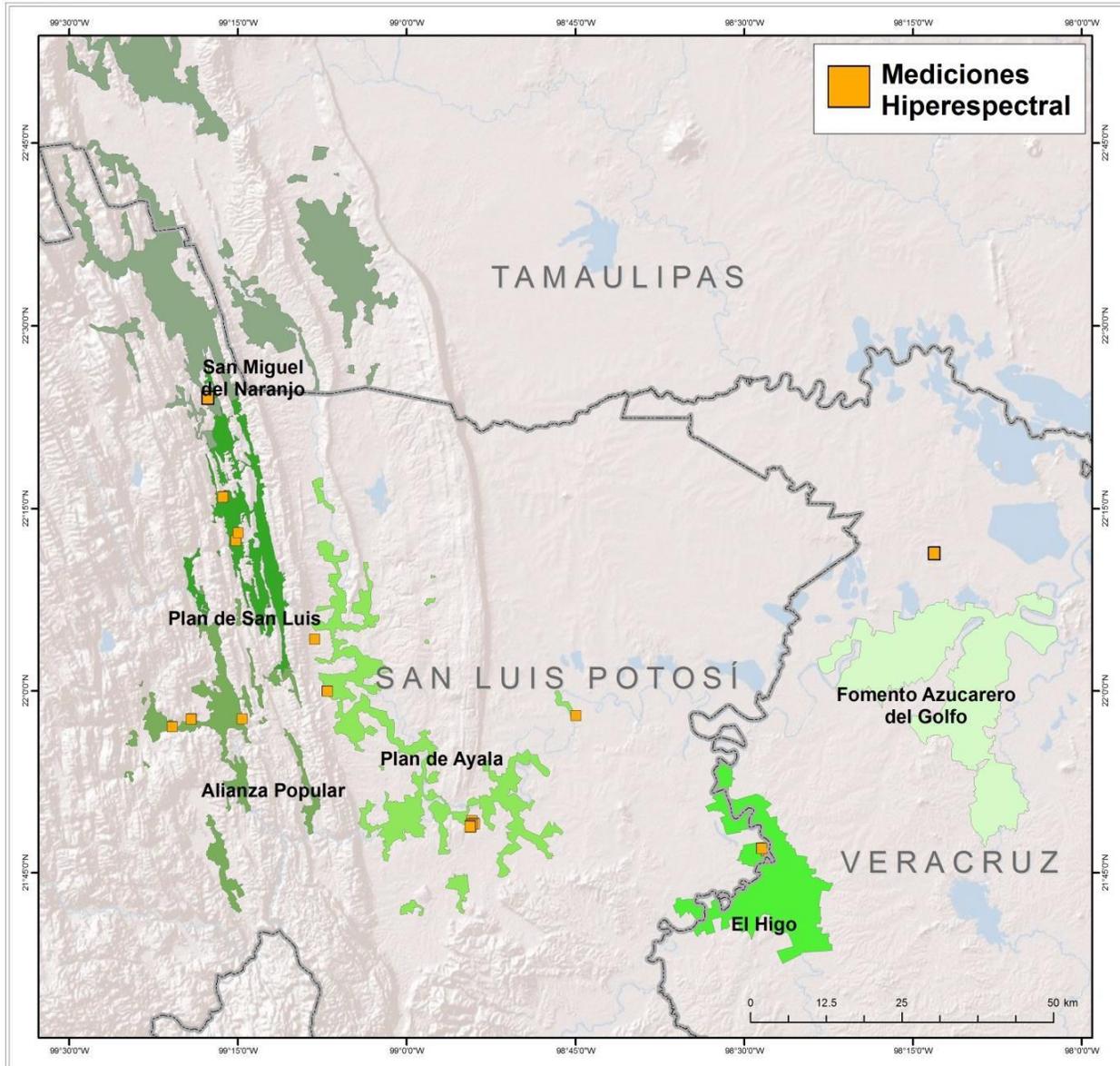


Figura 5.6 Localización de muestreo con radiómetro hiperespectral

El número de observaciones fue variado, debido a la facilidad del reconocimiento del daño por la plaga o enfermedad. En total se midió 465 hectáreas, de las que se obtuvieron 80 observaciones (Cuadro 5.2).

Cuadro 5.2 Mediciones con radiómetro hiperspectral en caña de azúcar con problemas de barrenador y roya anaranjada

Variedad	Espectro		Plagas			Número de observaciones	Superficie medida (ha)	% de sup. en Huasteca
	Multi	Hiper	Barr	Mosca	Roya Ana.			
CP72-2086		■	■		■	30	150	27.3
CP23-137		■	■			5	5	<1
ITV92-1424								<1
MEX-1366						5	30	<1
MEX55-32						5	80	8.8
MEX68-1345								8.3
MEX68-P23						5	60	6
MEX73-1240						5	80	10.1
MEX79-431								12.5
MEX95-60								<1
RD75-11			■			20	40	1.1
SP70-1284						5	20	4.4
<b>Total</b>						<b>80</b>	<b>465</b>	<b>78.2</b>

### 5.2.1 nciación espectral de variedades de la caña de azúcar

En base al muestreo se pudo obtener diferentes características de la caña de azúcar, desde la presencia de plagas, hasta el reconocimiento de variedades y su etapa fenológica. La Figura 5.7 muestra la respuesta espectral de las diferentes variedades monitoreadas. Como se observa existe una amplia diferencia por variedad de caña, esto depende básicamente de la pigmentación de la hoja, el grosor y la composición celular, además de la cantidad de agua dentro del tejido foliar. La variedad RD75-11 fue reducida en la Huasteca, sin embargo, se siguen encontrando áreas con esta variedad en ciclos de resoca y soca. Esta variedad (originaria de República Dominicana), es de tallo largo ligeramente reclinado o curvado, de color amarillo - verdoso con ceresina. La germinación es vigorosa y el macollamiento es de 10 a 12 tallos por cepa; alto contenido de sacarosa y buena producción de caña por hectárea, resistente a enfermedades como carbón, roya y mosaico. En el caso de las variedades MEX-55-32, la respuesta espectral está dado por su color morado, además de que tiene la característica que se desarrolla (o sirve) en condiciones de suelo pobre y con restricciones de agua, posibles motivos por los que presente porcentajes altos de reflectividad (INIFAP, 2000).

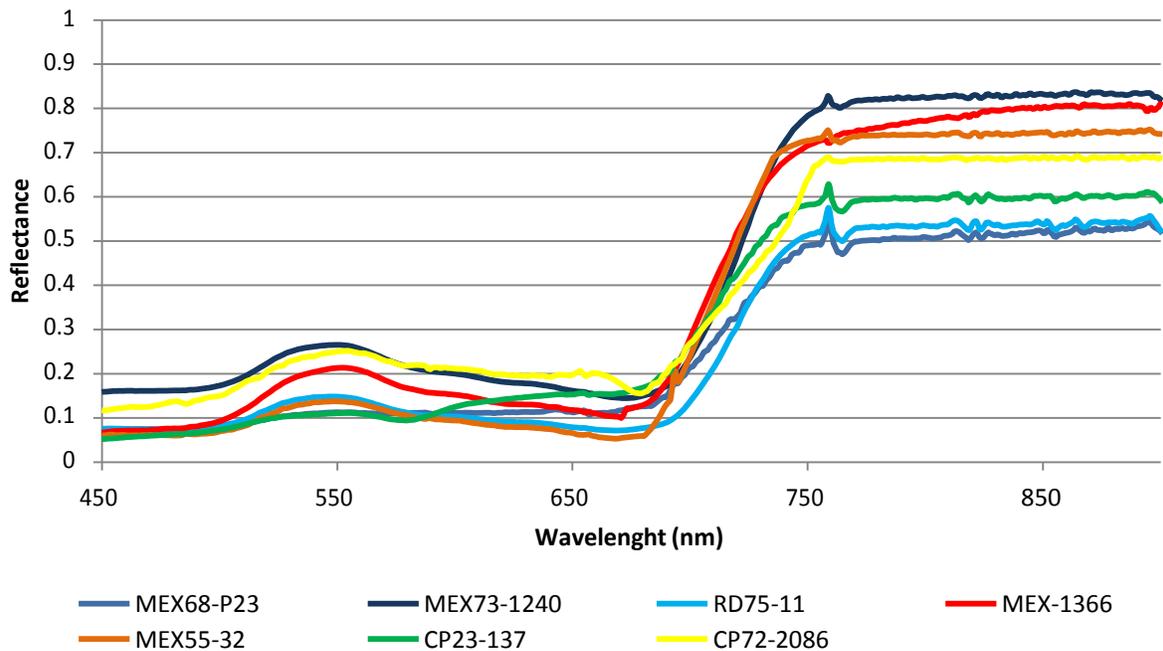


Figura 5.7. Respuesta espectral por variedad de caña de azúcar

La diferenciación espectral entre variedades es reducida en el espectro visible, particularmente entre la banda azul y roja (450 – 510 nm y 640 – 670 nm respectivamente). En la longitud de onda entre los 530 – 590 nm (banda verde) se puede observar una ligera separación entre variedades, principalmente entre la CP72-2086 y MEX73-1240, que refleja mayor cantidad de energía que las demás. La mayor separabilidad de reflectancia está dado en el infrarrojo cercano (>750 nm) donde cada una de las variedades presenta reflectancias distintas, derivadas por problemas de suelo, fertilización y compuestos químicos propios de la planta. Estas diferencias espectrales permiten realizar clasificaciones en las imágenes de satélite. En base a estos resultados se obtuvo un mapa que muestra la distribución espacial de las variedades medidas radiométricamente (Figura 5.8).

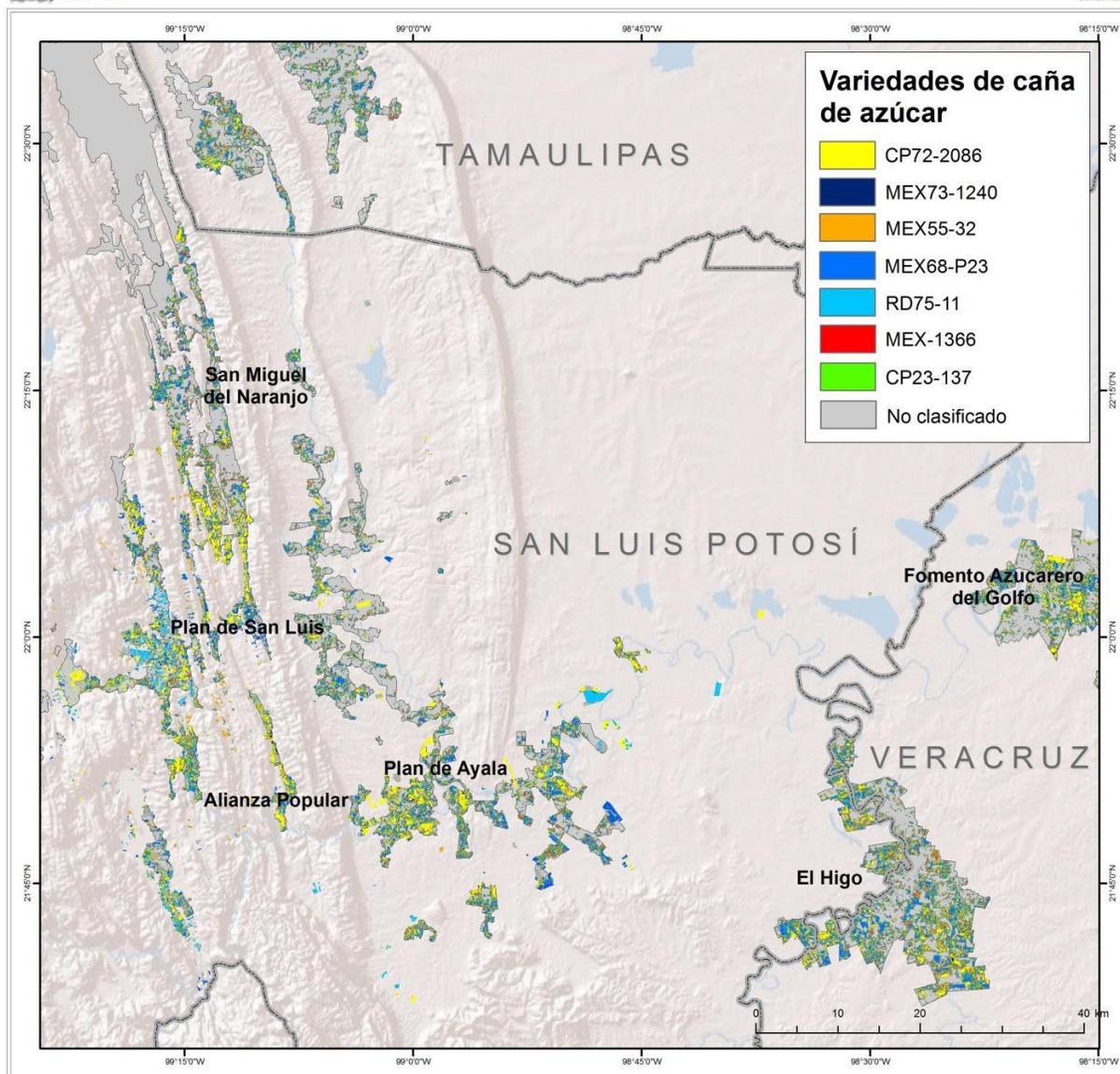


Figura 5.8. Clasificación de las variedades de caña de azúcar en la Huasteca potosina

A través de una clasificación SAM, se diferenciaron algunas variedades presentes en la Huasteca. En total se clasificó 52,131 hectáreas de caña de las 89,869 ha totales que se reportan para la zafra 2013-2014 (INFOCAÑA, 2014), lo que representó una clasificación del 58% del total de la superficie, solamente para los ingenios de San Luis Potosí. Como se muestra en la Figura 5.9 existe una similitud entre lo calculado por el método SAM para el reconocimiento de variedades y el porcentaje de cada variedad que se reporta en la Huasteca. La CP72-2086 que está presente en más de 27 mil

hectáreas de los cuatro ingenios, es cercana a la superficie calculada con 23 mil ha de la zona, de la misma manera que la MEX73-1240 que se reporta en más de 10 mil ha, la clasificación se acercó a las 8 mil calculada. Como se mencionó anteriormente, la variedad RD75-11 se reportaba con una disminución en superficie, sin embargo, lo calculado muestra que existen características espectrales similares de esta variedad en 8 mil hectáreas de la zona.

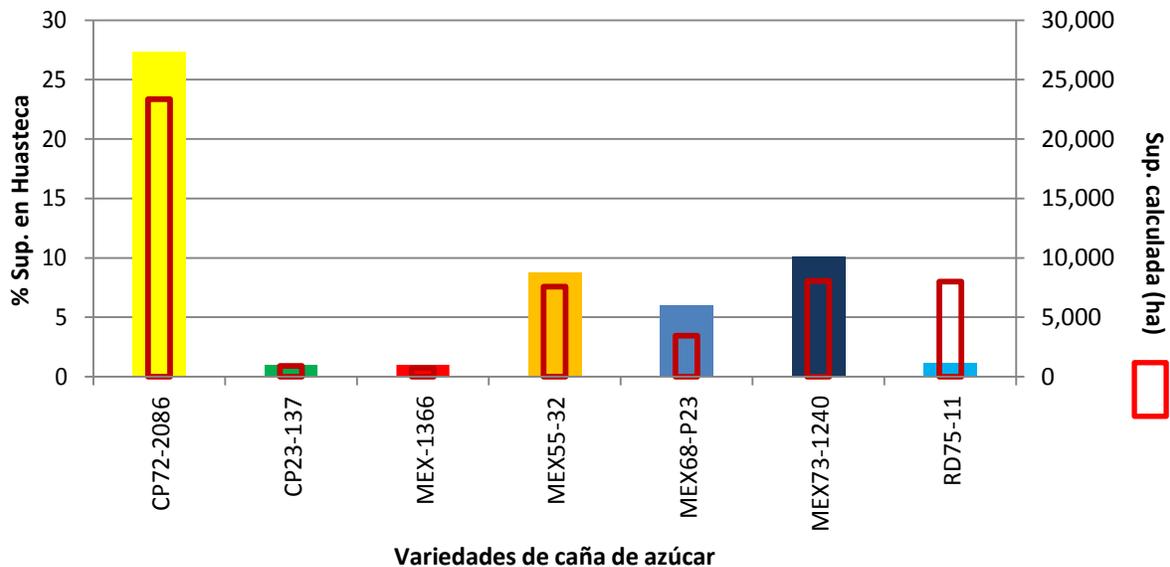


Figura 5.9 Diferencia entre la superficie calculada por SAM y el porcentaje de superficie por variedad en la Huasteca potosina

## 5.2.2 nciación espectral de las etapas fenológicas de la caña de azúcar

Al igual que las variedades, las firmas espectrales obtenidas por el radiómetro sirvieron para hacer una caracterización de las etapas fenológicas de la caña de azúcar, esto gracias a la temporalidad en que se hizo el levantamiento radiométrico. De acuerdo a Aguilar (2011) existen cuatro etapas importantes en el desarrollo de la caña de azúcar: establecimiento, crecimiento vegetativo, rápido crecimiento y maduración. En la Figura 5.10 se muestra las firmas hiperespectrales de cada etapa, donde se observa un comportamiento espectral lógico, siendo el establecimiento la etapa que menos reflectancia tiene, tanto en el espectro visible como en el infrarrojo, esto debido en gran medida a la cantidad de energía que requiere la planta para llevar a cabo la germinación. Con forme la planta creciendo, se desarrolla mayor cantidad de follaje, el

proceso fotosintético es más activo, por lo que existe un ligero aumento en la banda verde (520 – 590 nm), sin embargo la reflectancia en los infrarrojos no llega a sobrepasar el 50%, debido a que en esta etapa la incidencia de una iluminación adecuada en la base de la planta de la caña durante el periodo de ahijamiento es de vital importancia. En la etapa de rápido crecimiento, existe una generación rápida de biomasa, donde además se determina la formación y elongación de la caña y su rendimiento, lo que denota la reducción de la reflectancia en la banda verde. En la última etapa, la firma espectral es distinta a las anteriores en casi todo el espectro, esto se debe a que la planta requiere un bajo contenido de humedad para propiciar la acumulación de carbohidratos y la conversión de azúcares reductores a sacarosa.

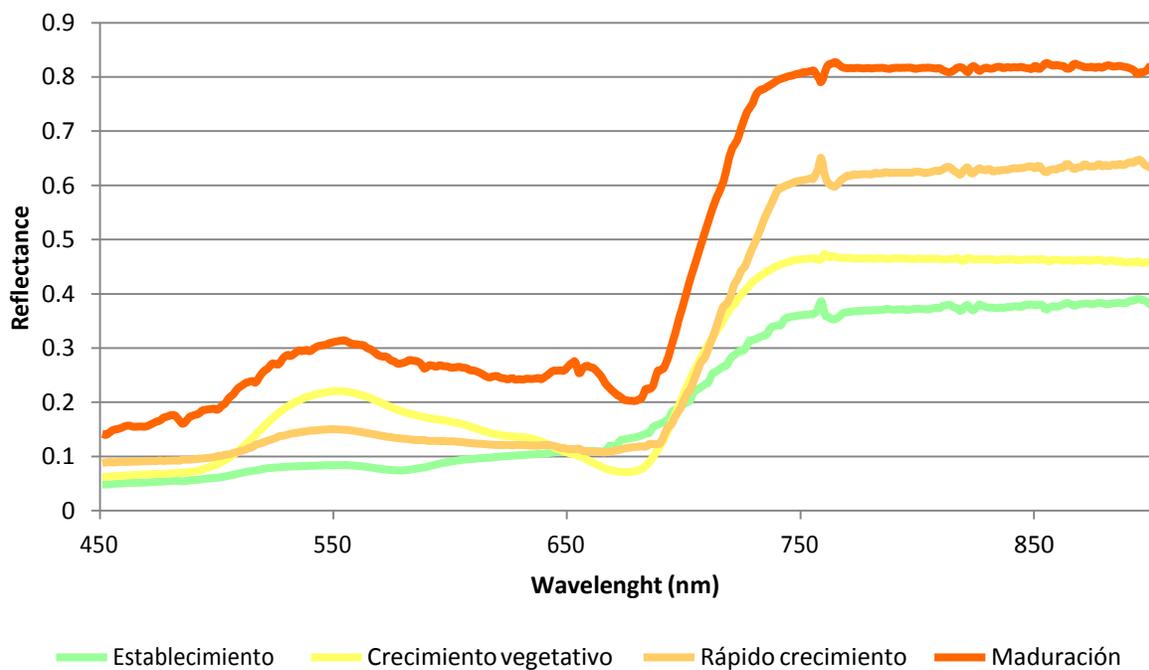


Figura 5.10 Respuesta espectral por etapa fenológica

A través de una clasificación SAM, se extrapolaron las firmas espectrales por etapa fenológica a una imagen de satélite Landsat ETM+ de abril de 2013. En total se clasificaron 57,653 hectáreas de las 89,869 ha totales que se reportan en la zafra 2013-2014 (INFOCAÑA, 2014). Lo que representó el 58% de toda el área cañera del estado. Como se observa en la Figura 5.11, las etapas que ocupan mayor superficie son los de crecimiento vegetativo y Maduración, con 23 y 31% respectivamente, del total de la superficie clasificada. Sin embargo, en áreas cañeras del ingenio Plan de San Luis y

Alianza Popular, existen áreas en donde la caña tiene menos de 50 días de iniciación de crecimiento.

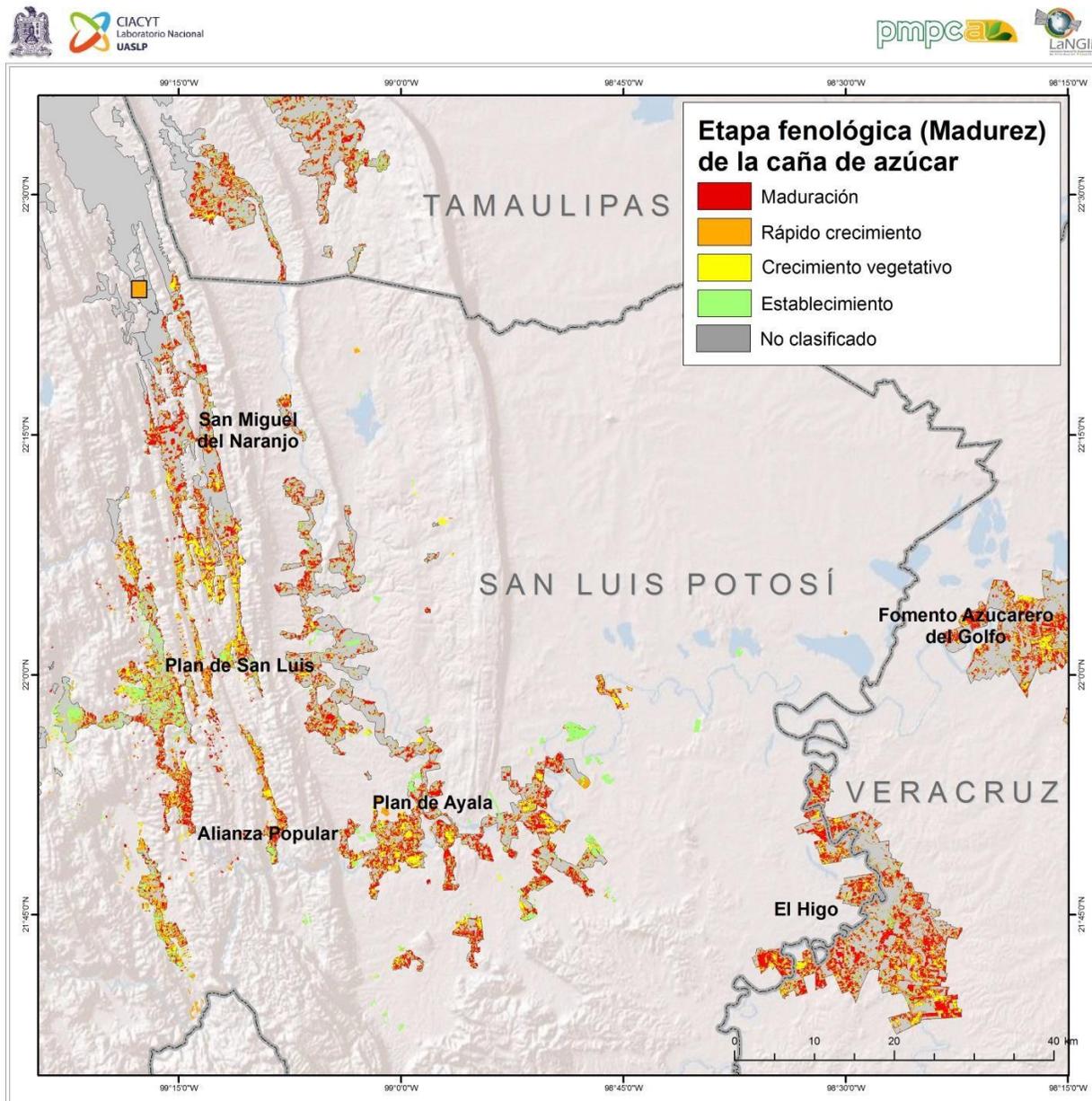


Figura 5.11 Clasificación de las etapas fenológicas de la caña de azúcar en la Huasteca potosina

### 5.3 Detección de las áreas de riesgo

La presencia de *Diatraea saccharalis* en la Huasteca es casi todo el año, aunque su mayor incidencia se reporta de noviembre a mayo (comentado por productores). Las plantas presentaban daño principalmente en la hoja, con un nivel de marchitamiento y/o

amarillamiento (corazón muerto) y en la tallo, con presencia de túneles y galerías evidentes. En el caso de *Puccinia kuehnii*, la enfermedad se presenta en la zona entre septiembre y enero, y solo se ha reportado en los límites entre San Luis Potosí y Veracruz, aunque durante las mediciones se detectaron daños en caña de los municipios de Valles y Tamuín. Además, para equiparar las firmas de estas plagas, también se hicieron mediciones en plantas sin ningún daño aparente por plaga dentro de la misma parcela.

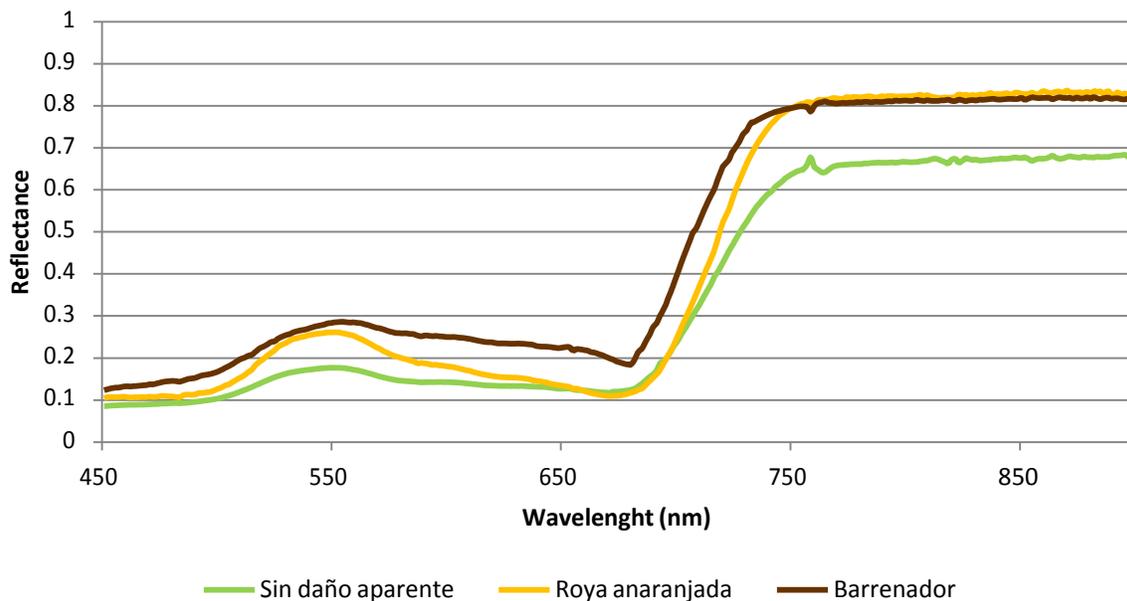


Figura 5.12 Firmas espectral de las plagas de la caña de azúcar

En la Figura 5.12 se puede observar las firmas espectrales de la vegetación sin daño aparente a alguna plaga y las firmas tanto de la roya anaranjada como del barrenador de la caña de azúcar. De forma general, la firma espectral de las hojas dañadas por el barrenador y la roya están por encima de la caña sana; lo que indica una irregularidad en el proceso bioquímico de la planta. En la banda azul (longitud de onda 400 y 500 nm) existe poca separabilidad entre firmas, sin embargo, en la banda verde (500 – 600 nm) se observa una mayor separación de reflectancia, lo que evidencia el amarillamiento en las plantas, efectos tanto de la roya como del barrenador, lo que indican que la energía absorbida por la planta no es suficiente para completar adecuadamente la fotosíntesis (Lobo, 1995). En los valores infrarrojos (> 700 nm) existe

una separación entre las plantas afectadas y la que no lo está, presentando valores de reflectancia por arriba del 10% entre sano y enfermo.

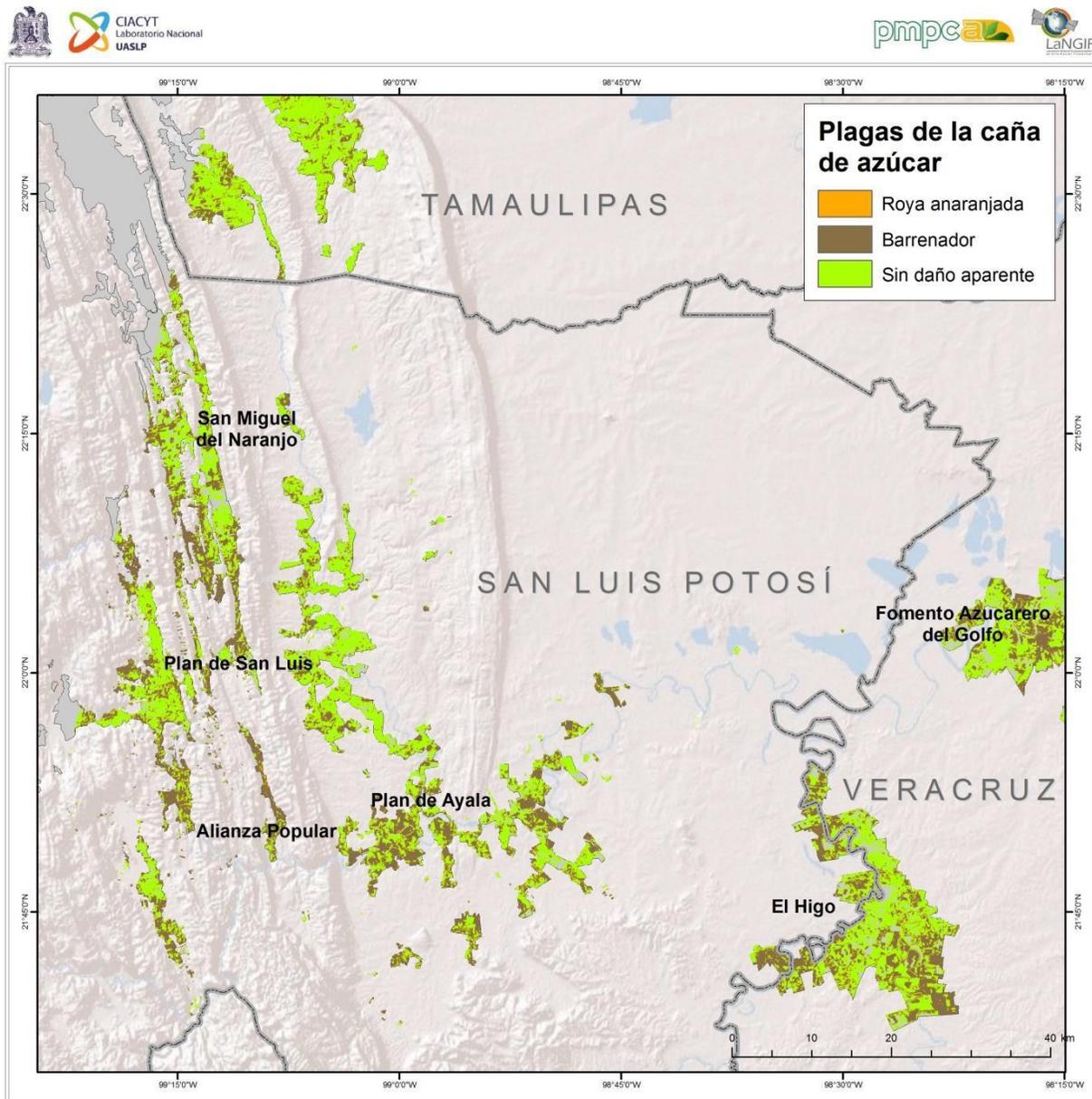


Figura 5.13. Clasificación de imagen de satélite en base a biblioteca espectral del barrenador y la roya anaranjada

Las firmas espectrales fueron importadas para generar la librería (formato .sli – spectral library). Estas se usaron para hacer la clasificación espectral en las imágenes Landsat (30 m) de las zonas de estudio, a través del método Spectral Angle Mapper. En la Figura 5.13 se observa los resultados de esa operación, donde se hicieron

clasificaciones más generalizadas, predominando la caña sin daño aparente y la afectada por el barrenador. En esta operación se clasificó el 100% de la zona de abastecimiento, donde el 57% corresponde a caña que no presenta daño aparente de plagas o enfermedades. Por otro lado, el 33% (> 29 mil ha) de la superficie clasificada estimada podría tener problemas de barrenador y menos del 10% tendría afectaciones por roya anaranjada. Esta última podría estar sobrestimada, ya que los síntomas se reportan en el ciclo otoño/invierno y la imagen clasificada es de abril. Existen parcelas de caña de azúcar que no fueron clasificados, esto por la diferencia espectral dada por la variedad, edad y manejo del cultivo.

## 6. VARIABILIDAD ESPACIAL DE LAS PLAGAS DE LA CAÑA DE AZÚCAR Y SU DETECCIÓN A TRAVÉS DE SENSORES MULTIESPECTRALES

### 6.1 Firma multiespectral

Se realizaron mediciones en 120 parcelas (dentro de la misma parcela se tomaban datos donde no presentara daño aparente por alguna plaga o enfermedad, y lugares con daño por alguna de las plagas) donde se obtuvo por medio del radiómetro la firma multiespectral de las siguientes variedades: MEX79-431, MEX95-60, RD75-11, CP72-2086 y ITV92-1424. Las variedades tuvieron un rango de edad aproximado entre los 2 y hasta los 15 meses. Los sitios donde se hicieron las mediciones, pertenecen a tres de los cuatro ingenios del estado de San Luis Potosí y el Ingenio El Higo, en Veracruz (Figura 6.1). Las mediciones corresponden a cinco campañas de muestreo realizadas en diciembre de 2013, mayo 2014, abril y agosto de 2015. Las mediciones correspondieron al reconocimiento de las variedades y los daños presentados por algunas de las plagas de interés, cubriendo un área de aproximadamente 525 hectáreas (cuadro 6.1).

Cuadro 6.1 Mediciones con radiómetro multiespectral en caña de azúcar con problemas de barrenador, mosca pinta y roya anaranjada

Variedad	Espectro		Plagas			Número de observaciones	Superficie medida (ha)	% de sup. en Huasteca
	Multi	Hiper	Barr	Mosca	Roya Ana.			
CP72-2086						50	300	27.3
CP23-137								<1
ITV92-1424						20	100	<1
MEX-1366								<1
MEX55-32								8.8
MEX68-1345								8.3
MEX68-P23								6
MEX73-1240								10.1
MEX79-431						5	20	12.5
MEX95-60						5	15	<1
RD75-11						40	90	1.1
SP70-1284								4.4
<b>Total</b>						<b>120</b>	<b>525</b>	<b>78.2</b>

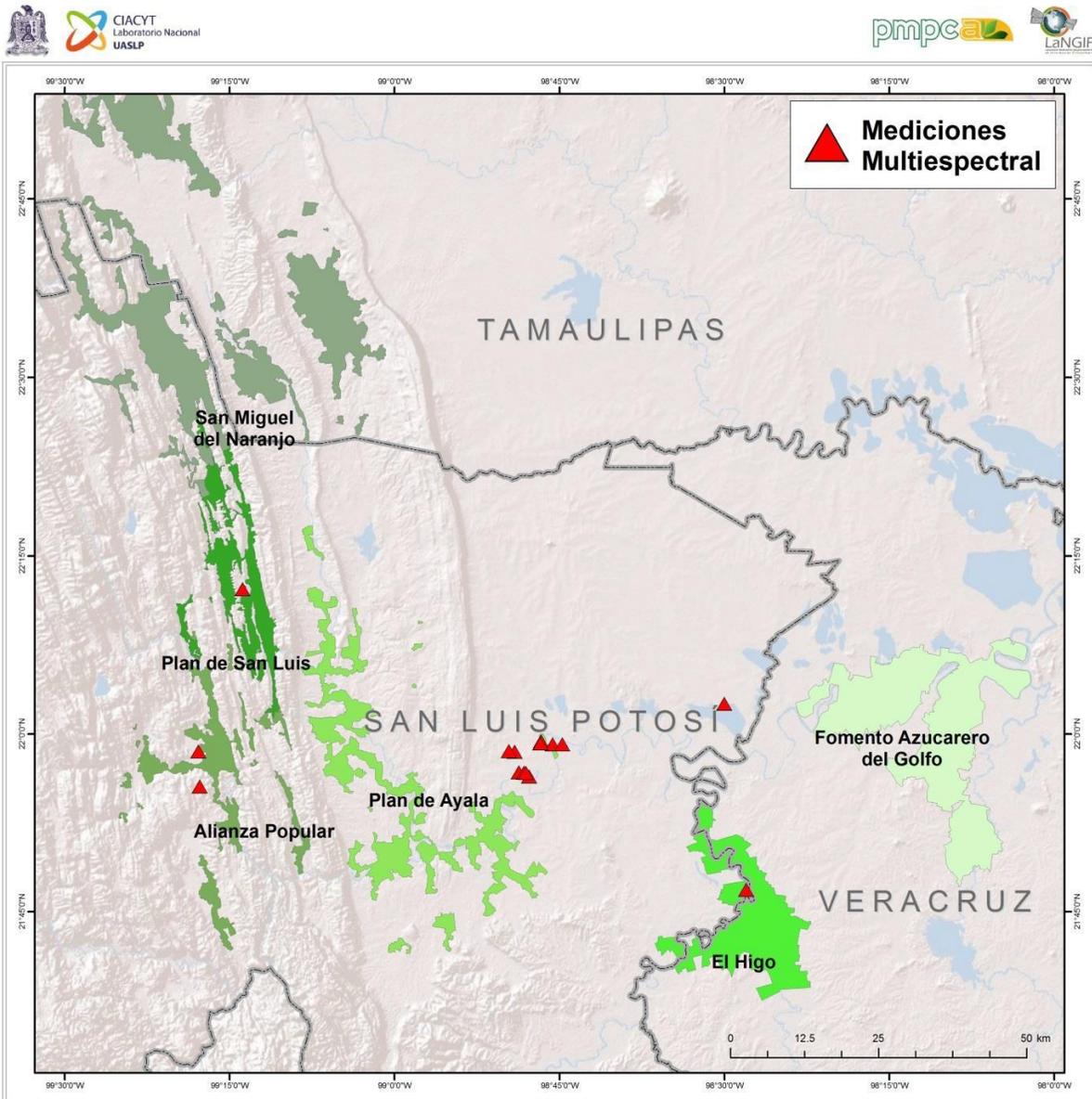


Figura 6.1 Localización de muestreo con radiómetro multispectral.

### 6.1.1 Diferenciación espectral de variedades de la caña de azúcar

Al igual que el muestro hiperespectral, los datos obtenidos con el radiómetro multispectral dio para realizar un diagnóstico espectral por tipo de variedad de caña de azúcar. En este caso, sólo se obtuvieron cuatro variedades, dos de ellas similares a las obtenidas por hiperespectro: CP72-2086 y RD-7511. De forma general, las diferencias espectrales por variedad se dan en las longitudes de onda superiores a los 800 nm y hasta los 1700 nm. Particularmente en la longitud de onda de los 880 nm es donde existe mayor diferencia entre ellas, sobre todo entre la CP72-2086 e ITV92-1424, y a su

vez con la RD-7511 y MEX79-431, estas últimas con firmas espectrales muy parecidas en casi toda la longitud de onda (Figura 6.2). Otra diferencia notable entre estas firmas y las hiperespectrales, es que la reflectancia en los infrarrojos no sobrepasa el 50% debido tal vez por la resolución espectral más general del sensor y la superficie abarcada en el FOV, donde se captura otros componentes del terreno (sombras, suelo, agua, etc.). Sin embargo en la parte visible del espectro, las diferencias son muy reducidas.

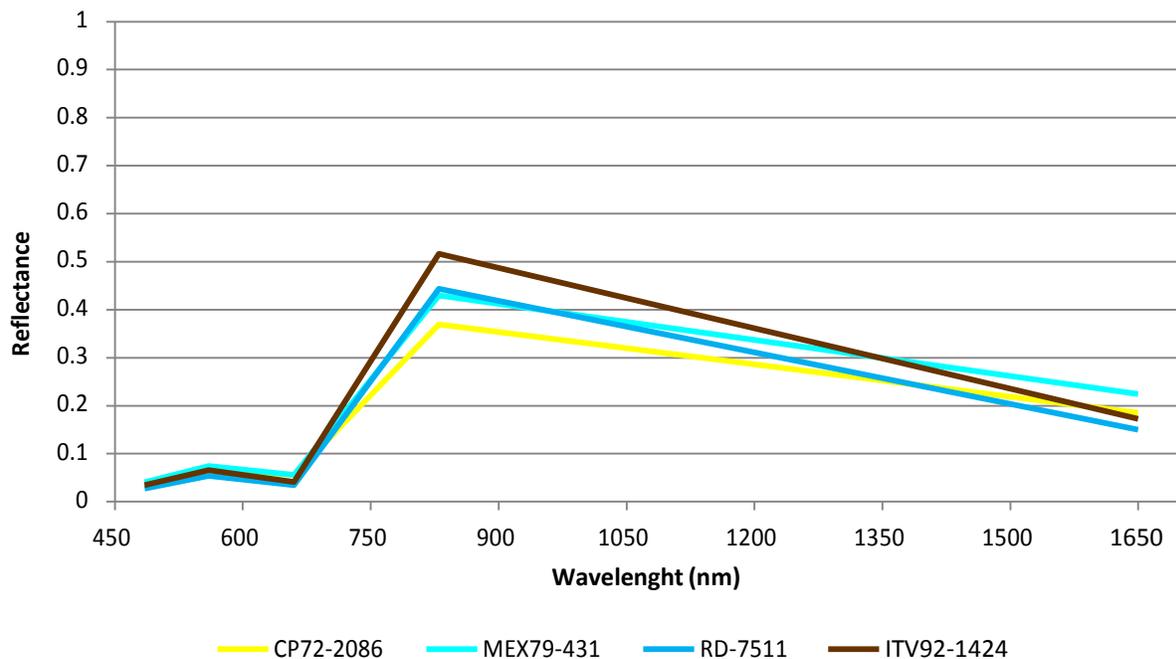


Figura 6.2. Respuesta multiespectral por variedad de caña de azúcar

Con las firmas espectrales, se realizó una clasificación SAM sobre una imagen de satélite Landsat 8 Oli de junio de 2014, donde se clasificaron las cuatro variedades muestreadas con el sensor multiespectral. En este caso, además de usar las bandas visibles e infrarroja cercana, se incluyó dentro de la clasificación la banda 6 SWIR 1 que abarca una longitud de onda entre los 1570 y 1650 nm. Como se muestra en la Figura 6.3 la clasificación se hizo en el 39.7% (35,698 ha) del total de la superficie cañera del estado. Lo calculado para la variedad CP72-2086 es similar al resultado obtenido por las firmas hiperespectrales, con un estimado de 25,423 ha (8.17% más que la clasificación hiperespectral). Para la variedad RD75-11, la estimación fue menor que

con lo logrado con la firma hiperespectral, con 6,452 ha (19.5% menos). Estas diferencias se deben al número de observaciones que se hicieron con ambos radiómetros, ya que con el multiespectral se realizaron más observaciones, además de la incorporación de una banda infrarroja en la clasificación.

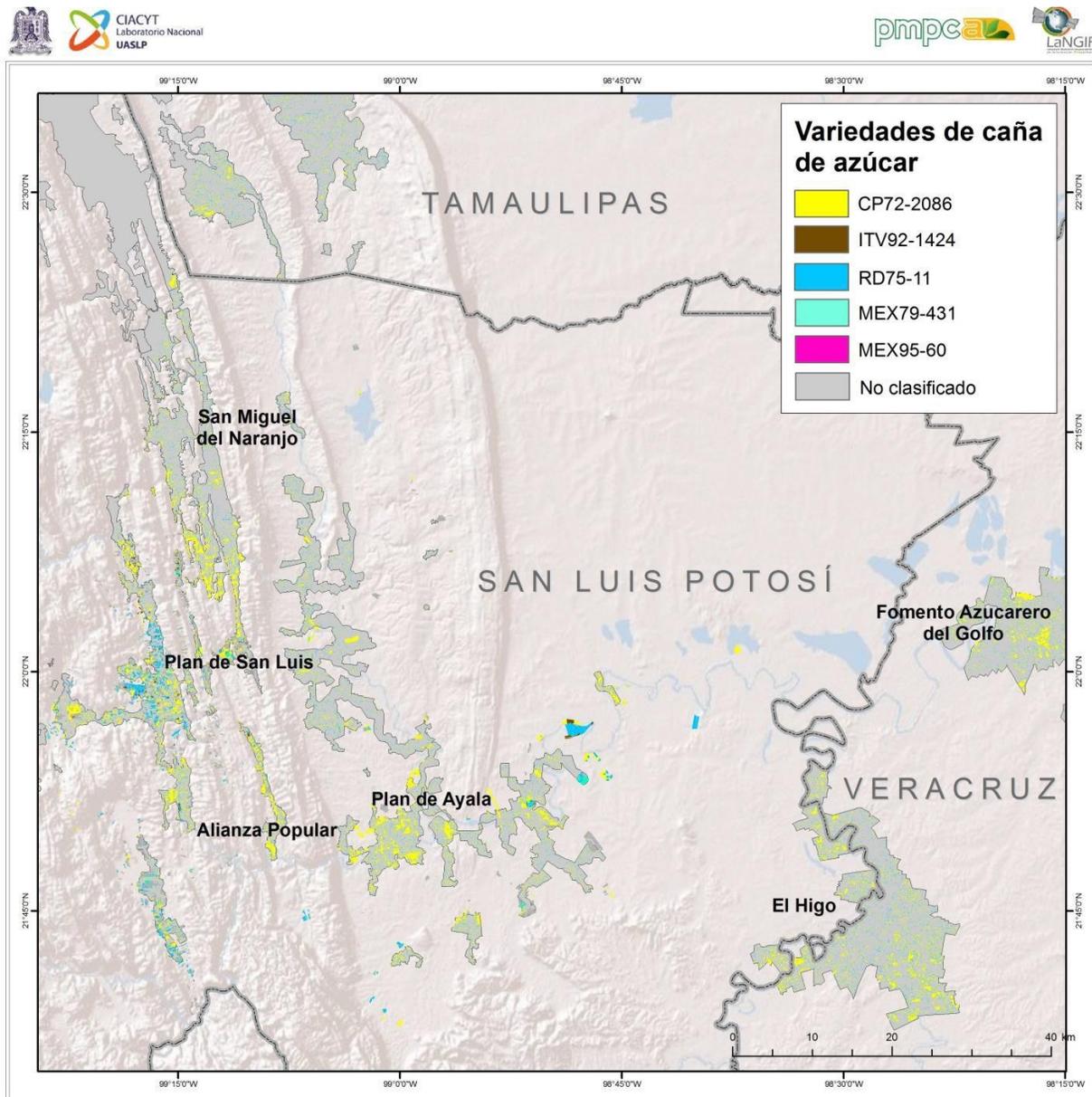


Figura 6.3 Clasificación de las variedades de caña de azúcar en la Huasteca potosina a través del sensor multiespectral

Basado en un análisis de confianza, se utilizaron 107 puntos de referencia donde se conocía la variedad presente (apoyados con los comentarios de productores) y se

relacionó con lo estimado en la clasificación SAM, donde se tiene un estimado del 69.1% de efectividad en la estimación (Cuadro 6.2). A pesar de no ser tan alta, sirve de referencia para la clasificación y reconocimiento de variedades, ya que los ingenios de la Huasteca carecen de dicho inventario y si existe se encuentra desactualizado.

Cuadro 6.2 Análisis de efectividad

Variedad	CP72-2086	ITV92-1424	MEX79-431	RD75-11	TEST	EFFECTIVE
CP72-2086	37	8		1	50	74
ITV92-1424	3	8			12	66.7
MEX79-431			12	7	20	60
RD75-11			5	19	25	76
					<b>Total</b>	<b>107</b>
						<b>69.10%</b>

Existen reportes como el de Fortes *et al.* (2005) que utilizó imágenes de Landsat ETM+, desarrolló múltiples relaciones entre bandas e índices de vegetación que fueron discriminados de acuerdo a las características específicas de las variedades. Los resultados identificaron que la banda 4 del sensor (infrarrojo cercano) y el GNDVI fueron los más adecuados para la discriminación de variedades con un valor de 93.7 por ciento de certeza. Otro estudio realizado en Colombia por Murillo *et al.* (2009) mostró resultados positivos utilizando productos Landsat ETM+ y técnicas estadísticas de discriminación espectral. Discriminando variedades de edades similares, el autor obtuvo resultados de una precisión de identificación del 75 por ciento. Similares estudios realizados en Australia (Apan *et al.*, 2004), Estados Unidos (Johnson *et al.*, 2005) y Brasil (Galvão *et al.*, 2005), han demostrado también alto grado de precisión en la identificación de variedades al utilizar información de sensores espectrales con técnicas de identificación de bandas sensibles a cambios en contenido de clorofila, agua y la relación lignina-celulosa de las hojas de la caña de azúcar. Galvão *et al.* (2006) utilizó información del sensor hiperespectral EO-1 Hyperion para simular bandas espectrales de 6 sensores en la identificación de 5 variedades de caña de azúcar en Brasil. Los resultados demostraron que la resolución espectral influye en la discriminación de variedades, obteniendo resultados de 58, 62, 66, 72, 72, 74 y 87 por ciento de precisión en la identificación de variedades para AVHRR, CCD, SPOT 5, Landsat ETM+, ASTER, MODIS e EO-1 Hyperion, respectivamente. Sin embargo, contrario a los estudios presentados anteriormente, Gers (2003), no encontró

diferencias significativas entre variedades de caña de azúcar surafricanas al evaluar diferentes técnicas de discriminación por medio del uso de Landsat ETM+.

En la identificación de variedades, la resolución espectral juega un papel muy importante de acuerdo a la composición varietal del sistema de producción cañero. Sistemas cañeros con una baja composición varietal y variedades con marcadas diferencias fenotípicas, pueden verse beneficiados del uso de productos multiespectrales para la detección de las variedades, ya sea utilizando las bandas del sensor, calculando índices de vegetación o captura de firmas espectrales en campo. Por el contrario, en sistemas cañeros de alta composición varietal, con variedades de similares fenotipos, requerirán productos hiperespectrales, para la identificación de bandas sensibles a pequeñas diferencias en pigmentación y contenido de agua, entre otros (Suárez, 2011).

### **6.1.2 Crecimiento de la superficie cañera**

La conversión de terrenos hacia usos agropecuarios es una de las causas más importantes de deforestación en América Latina y el mundo. En México, la superficie agrícola sembrada se ha mantenido relativamente constante en los últimos años, contabilizando en 2011 cerca de 21.7 millones de hectáreas (INEGI, 2011). Es importante mencionar que aun cuando la superficie agrícola sembrada no ha crecido considerablemente en los últimos años, la conversión de vegetación natural a terrenos agrícolas continúa en el país.

La caña de azúcar, a pesar de ser un cultivo con problemas de diversificación y rendimientos, la superficie se ha incrementado. Entre 1970 y 2003, hubo una tasa de crecimiento media anual de 2.19% a nivel nacional, que para el caso de San Luis Potosí se tuvo un incremento de 2.26%, el mayor de todos los estados (Figura 6.4). Entre 2013 y 2014 la superficie cañera creció más de 3,000 ha (Domínguez, 2005; INIFAP, 2009; Aguilar, 2011).

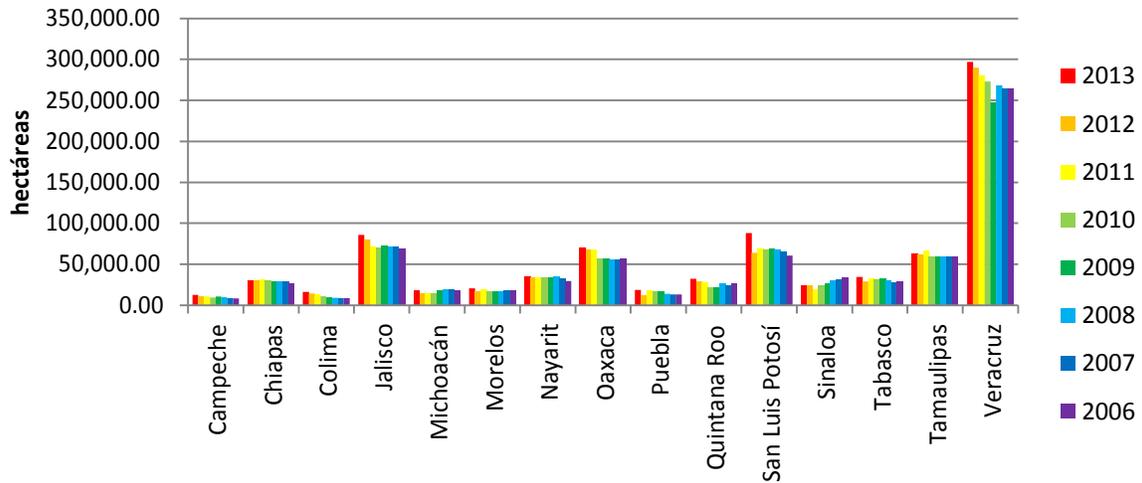


Figura 6.4 Crecimiento de la superficie cañera en México.

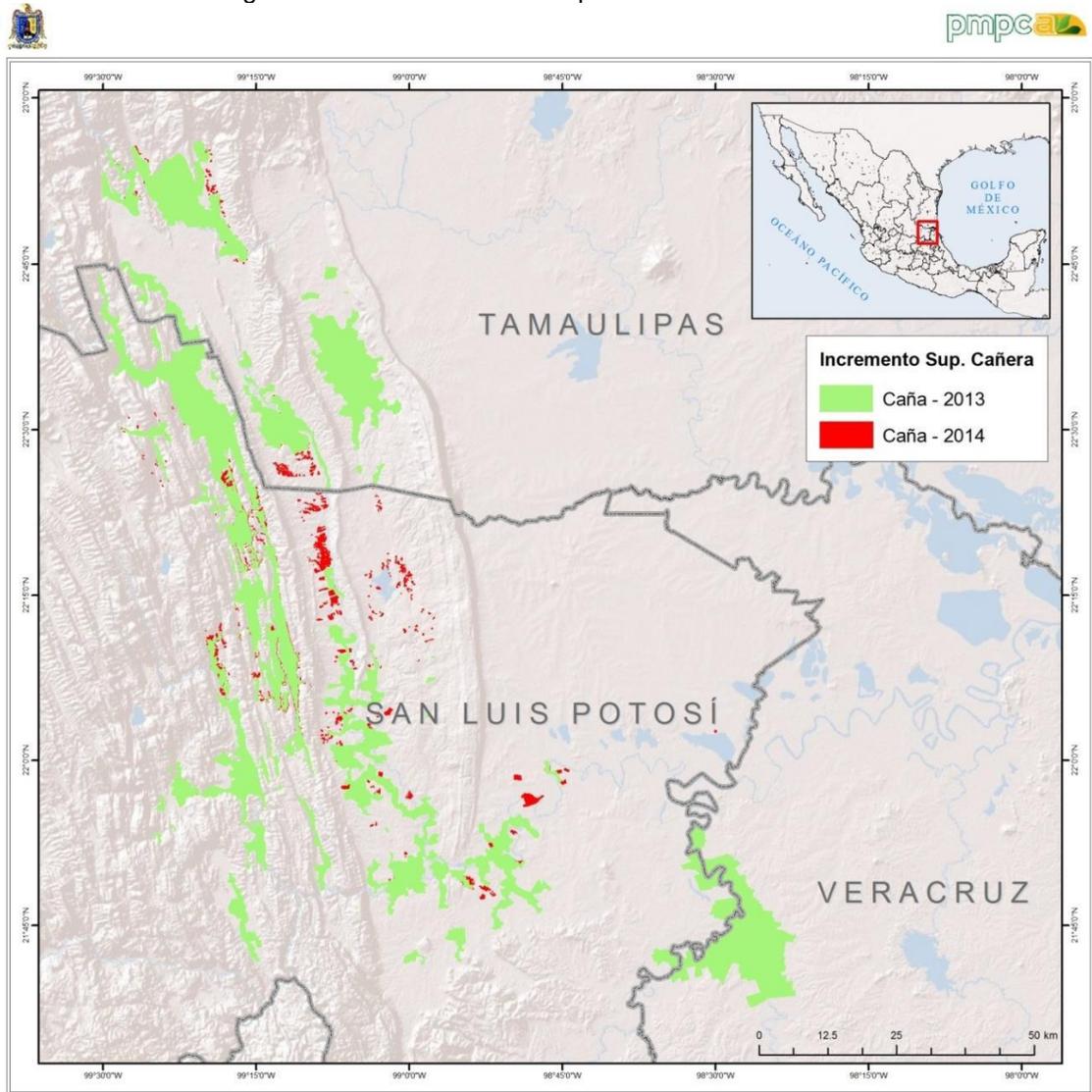


Figura 6.5 Crecimiento de la superficie cañera en la Huasteca potosina

Como se observa en la Figura 6.5 el crecimiento de la superficie cañera se da en áreas circundantes a las ya existentes, sobre todo el crecimiento se ha dado en los valles intermontanos, y en los últimos años, el cultivo de la caña se ha incrementado en las áreas de la planicie, principalmente al sur de los municipios de Ciudad Valles y Tamuín, donde las áreas de pastizales se han convertido a cañaverales. Según el cálculo de crecimiento de la frontera agrícola, el ingenio Plan de San Luis tiene el mayor crecimiento en un año, con el 35% de las 3,000 hectáreas calculadas, seguido de Plan de Ayala, con un 30%. Estos datos y su clasificación son cálculos hechos por las clasificaciones y por verificación visual, sin embargo, debe existir una revisión para conocer el cálculo exacto de desaparición de áreas primarias de vegetación por cambios a áreas cañeras.

## **6.2 Detección de áreas de riesgo**

En el caso de los datos multiespectrales, se tiene un rango de longitud de onda más extenso que los datos hiperespectrales, sin embargo el número de bandas es mucho más reducido que estas últimas. Como se muestra en la Figura 6.6 existe diferencia en los valores de reflectancia entre la caña sin daño aparente y la que tiene daño por plaga, sea barrenador de la caña o roya anaranjada, particularmente en las áreas infrarrojas. En el espectro visible, la mínima diferencia está en la banda verde (560 nm) donde el proceso fotosintético es menos activo en la caña dañada por lo que refleja más energía; en las bandas azul y roja (485 y 660 nm respectivamente) no existe diferencia entre plantas dañadas y sin daño aparente. En el espectro de los 830 nm es donde existe mayor diferencia entre caña con y sin daño, presentando una separabilidad de casi el 12%, las diferencias entre el daño por barrenador y roya anaranjada son muy similares en los efectos de emisión de energía que tienen en la planta. En las longitudes de onda de 1300 y 1600 nm la respuesta espectral se diferencia entre plagas, presentando la roya anaranjada un respuesta espectral similar a la de sin daño aparente. Estos datos coinciden con los presentados por Apan *et al.*, (2003) donde la mayor separación entre plantas enfermas y sin daño aparente por plagas es en el infrarrojo cercano (830 nm) y aunque en este estudio se usaron firmas hiperespectrales, la separabilidad está definida en esas longitudes de onda.

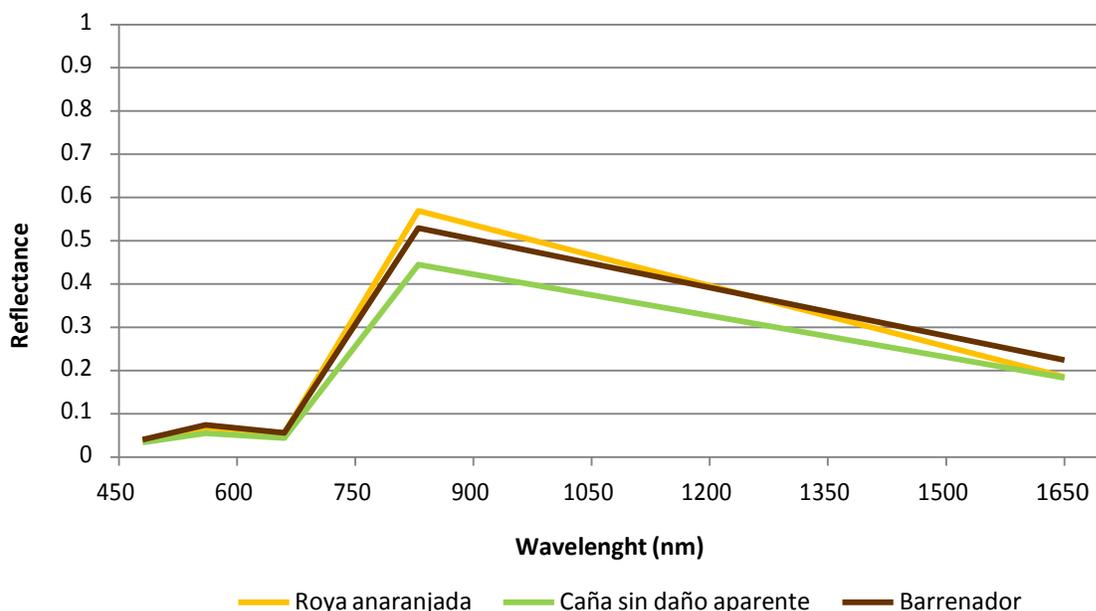


Figura 6.6 Firma espectral de plagas de caña de azúcar

Cuadro 6.3 Análisis de efectividad para áreas afectadas por plagas y su variedad de caña de azúcar

Variedad	CP72-2086	ITV92-1424	MEX79-431	MEX95-60	RD75-11	TEST	EFFECTIVE
CP72-2086	49	2			3	55	89,1
ITV92-1424	2	9				12	75,0
MEX79-431			3			3	100,0
MEX95-60				3		3	100,0
RD75-11			5		29	34	85,3

En base a las firmas multispectrales obtenidas, se realizó una clasificación SAM donde se obtuvo la Figura 6.7. Las clasificaciones hechas con datos hiperespectrales y multispectrales son muy parecidas, donde particularmente las áreas son definidas de forma similar. La clasificación incluyó el 100% de la zona de abastecimiento, donde un 55% correspondió a caña de azúcar sin daño aparente por plagas o enfermedades, muestras que el 45% restante, presenta problemas de barrenador o roya anaranjada. En el caso este último, el área posiblemente dañada por este hongo, es en menos del 10% de la zona de abastecimiento de San Luis Potosí, espacialmente ubicado en el oriente del estado, donde se encontró problemas de esta plaga. El 35% restante pertenece a daños provocados por el barrenador de la caña de azúcar. En el caso de esta plaga, su distribución es en toda la zona de abastecimiento, presentándose de manera homogénea en todo el estado.

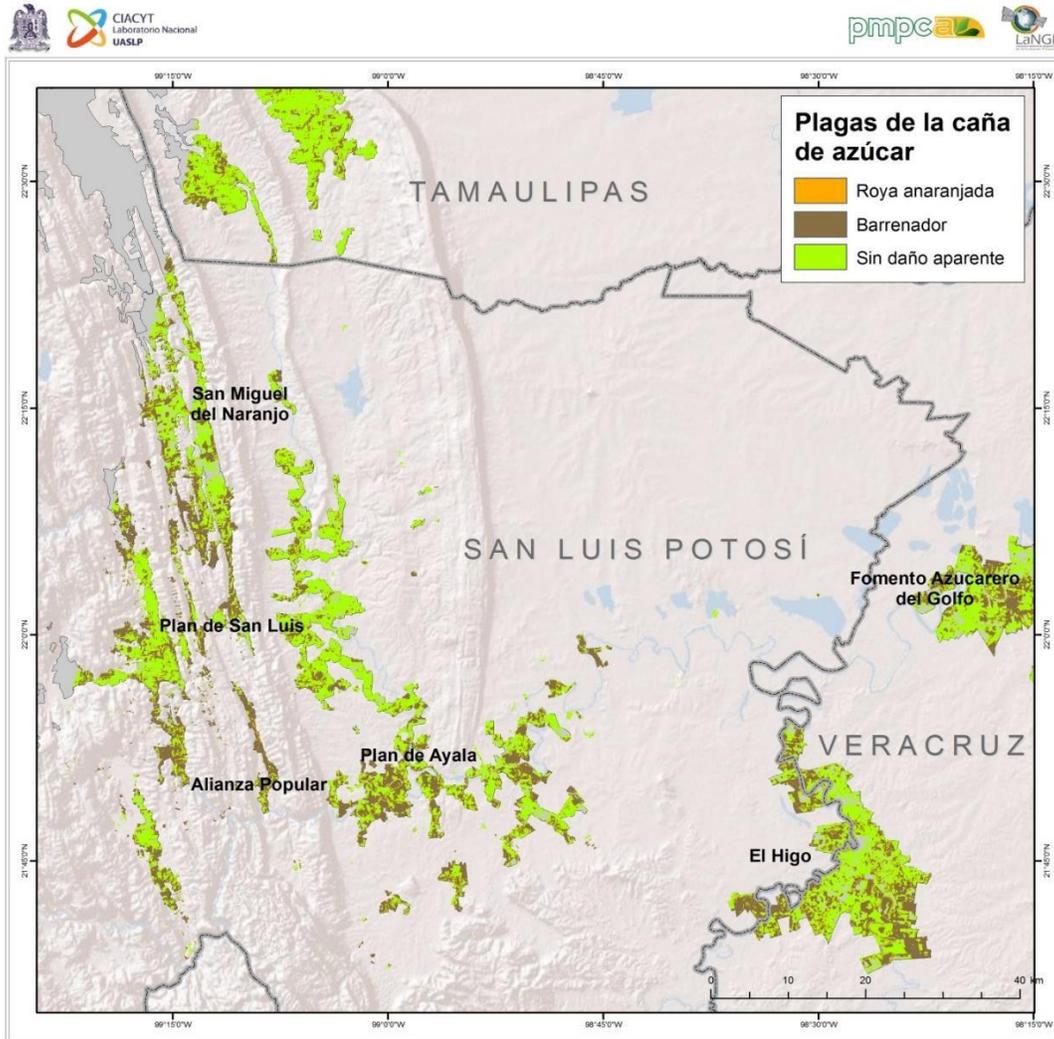


Figura 6.7 Clasificación de imagen de satélite en base a biblioteca multiespectral del barrenador y la roya anaranjada

Para comprobar la eficiencia de la clasificación se realizó un análisis de efectividad usando 107 puntos de verificación que no fueron usados en el modelo. En base a eso se obtuvo una efectividad general del 89.9%, predominando la mejor clasificación en variedades como la MEX79-431 y MEX95-60. Sin embargo, las variedades más predominantes como la CP72-2086 y la RD75-11, también tuvieron una alta precisión en la clasificación tanto para el reconocimiento de áreas con daño a roya anaranjada y barrenador de la caña de azúcar. De la misma forma que presenta Rama *et al.*, (2007) en la clasificación SAM con otros cultivos y entre variedades, donde obtuvo una precisión del 86.7%, por lo que la clasificación realizada está dentro de los rangos óptimos (Cuadro 6.3).

## 7. CONCLUSIONES

Los sensores remotos, junto con la información recopilada en el campo, permitió generar modelos de predicción capaces de estimar la correlación del fenómeno en el campo con las condiciones de reflectancia de la caña de azúcar. En este sentido es importante seleccionar las variables que individualmente presenten alta correlación para que en su conjunto se minimice el error de estimación.

El factor económico es muy importante al seleccionar la información de sensores remotos. Las imágenes de alta resolución, por lo general se orientan a trabajos en áreas reducidas y no al análisis regional, lo cual implica costos adicionales en almacenamiento por el volumen de datos, actualización de imágenes y tiempo de procesamiento. Las imágenes obtenidas por los sensores Landsat-ETM/OLI 8 o MODIS pueden emplearse para trabajos a escala regional, dado que presentan características más generales respecto a su resolución espacial.

El estudio sobre la variación espaciotemporal de la reflectancia, la radiación solar en las bandas del visible, infrarrojo y los índices de vegetación constituyen enfoques importantes para dar una mirada desde lo geográfico a los problemas relacionados con la evaluación de riesgos de plagas y enfermedades, su incidencia, propagación y severidad, así como apoyo a las actividades de muestreo y seguimiento.

A partir del análisis geográfico, mediante técnicas de análisis exploratorio de datos y estadística espacial de la información, se generan planes de acción regional que permitan un manejo más económico y ambientalmente sostenible, y favorezcan la toma de decisiones de los técnicos apoyados en modelos. El uso de estas tecnologías ofrece ventajas tanto en la investigación como en la implementación de técnicas de agricultura de precisión, como bien puede ser en seguimiento a las poblaciones de plagas e incidencia de enfermedades.

El uso de imágenes de satélite y de espectroradiómetros de campo puede ayudar a la detección de áreas afectadas por las plagas, principalmente a las que dañan directa o indirectamente a las hojas de la planta de la caña de azúcar. En ese sentido, con el análisis espacial se respalda la aplicabilidad de las geotecnologías en el sector agrícola y se demuestra el alcance que se pueden realizar en breves periodos de tiempo

cubriendo una gran extensión de cultivo. Para enfermedades de la caña de azúcar como el barrenador, el mejoramiento de las técnicas de espectroradiometría de campo y el escalamiento a imágenes de satélite, dan origen al punto de partida para convertir el modelo fitosanitario tradicional en un modelo de precisión.

## 8. REFERENCIAS

- A. Ursani, K. Kpalma, C. C. D. Lelong, y J. Ronsin, 2012. Fusion of textural and spectral information for tree crop and other agricultural cover mapping with very-high resolution satellite images. *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, 5 (1), pp. 225–235.
- Abdel-Rahman E. M; 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*, 1366-5901, 29(13): 3753 – 3767
- Abdel-Rahman, E. M., Ahmed F. B. and van den Berg, M., 2010. Estimation of sugarcane leaf nitrogen concentration using in situ spectroscopy. *International Journal of applied Earth Observation and Geoinformation*, 12S, S52–S57.
- Abdel-RahmanEm, Ahmed Fb, Van Den Berg and Way MJ. 2008. Preliminary study on Sugarcane Thrips (*Fulmekiolaserrata*) damage detection using imaging spectroscopy. *Proc S Afr Sur Technol Ass*, 81: 287 – 289.
- Agapiou, A., Hadjimitsis, D., Nisantzi, A., Alexakis, D., Themiscocleous, K., Papadavid, G. y Papautsa, C. 2012. Variability of field Spectroradiometric measurement usaning nearly lambertian surface. *Advances in geosciences. EARSeL*, 2012.
- Aguilar R.N. 2012. The Mexican sugarcane industry, overview, constraints, current status and long-term trends. *Springer Sugar Tech* 14 (3): 207-222
- Aguilar, N. 2011. Competitividad de la agroindustria azucarera de la Huasteca, México. Tesis de doctorado. Ciencias Ambientales. Programa Multidisciplinario del Posgrado en Ciencias Ambientales – UASLP. En <http://comunidadpmpca.uaslp.mx/documento.aspx?idT=3>
- Aguilar, N., Galindo, G., Contreras, C. y Fortanelli, J. 2010. Zonificación productiva cañera en Huasteca Potosina, México. *Agronomía Tropical*, 60(2): 139-154.
- Aguilar Rivera, N. 2015. Percepción remota como herramienta de competitividad de la agricultura. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 6(2), 399-405.
- Aguirre, R. 2001. Caracterización óptica de la laguna costera de Coyuca de Benítez. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Intituto de Geografía, UNAM*. Num. 46, pp 78-97.
- Almeida, T. I. R., De Souza, C. R., Rossetto, R. 2006. ASTER and Landsat ETM+ images applied to sugarcane yield forecast. *International Journal of Remote Sensing*, 27(19), 4057–4069.
- Álvarez, M. C. y Pérez, J. F. D., 2004. Resultados del monitoreo para diagnóstico y control de poblaciones de barrenadores del tallo en caña de azúcar de los municipios: el grullo–autlán– el limón en Jalisco. Primer año. Documento 1. INIFAP-CESAVEJAL-Asociación de agricultores del Valle el Grullo-Autlan. Jalisco, México. pp. 23
- Apan, A., Held, A., Phinn, S. y Markley J. 2004. 'Spectral discrimination and classification of sugarcane varieties using EO-1 Hyperion hypespectral imagery'. En *Proceedings of the 25<sup>th</sup> Asian Conference on Remote Sensing*, 22-26 Noviembre 2004, Chaing Mai, Thailand. Disponible: [http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2004/hyper/acrs2004\\_a1001.asp](http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2004/hyper/acrs2004_a1001.asp)

- Armida-Alcudia L., D. Espinosa, J. Palma. 2005. Carbono en biomasa microbiana y carbono soluble como indicadores de calidad de vertisoles cultivados con caña azucarera. *Terra Latinoamericana* 23(4):545-551
- Ascanio M. O. y Hernández, A. 2006. Suelos cañeros en Veracruz y Oaxaca, Cambios globales y ambiente. México: Editora Univ. Veracruzana. 285 p.
- Ascanio, M. O. y Hernández, A. 2004. Cambios climáticos y degradación de los suelos en los agrosistemas cañeros representativos de México. Énfasis en los estados de Veracruz y Oaxaca. Taller sobre cambio climático y los bonos GEI, para los mecanismos de desarrollo limpio. Área Biológica-Agropecuaria, CEVIM, Xalapa, Veracruz, México.
- Bakhtiari, A. A., & Hematian, A. 2013. Precision Farming Technology, Opportunities and Difficulty. *International Journal for Science and Emerging Technologies with Latest Trends*. 5(1): 1-14
- Balmaseda C., M. Romero. 2012. Desarrollo de sistema de información geográfica para gestión fitosanitaria en unidades productivas de caña de azúcar (*Saccharum spp.*). *Rev. Protección Veg.* 27(3): 206-209
- Bezuidenhout, C. N. and Singels, A., 2007. Operational forecasting of South African sugarcane production: part 1 system description. *Agricultural Systems*, 92, 23–38.
- Bioagro, 2011. *Diatraea saccharalis*. Bioagro-Soluciones Biológicas. En: [http://www.bioagro.com.co/joomla/index.php?option=com\\_content&task=view&id=24&Itemid=27&limit=1&limitstart=4](http://www.bioagro.com.co/joomla/index.php?option=com_content&task=view&id=24&Itemid=27&limit=1&limitstart=4) (10/01/2011).
- Bongiovanni, R. and Lowenberg, D. 2004. Precision Agriculture and Sustainability. *Precision Agriculture*, vol. 5, p. 359-387
- Broge NH, Leblanc E. 2000. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sens Environ* 76:156–172.
- Cabello, J. y Paruelo, J. 2008. La teledetección en estudios ecológicos. *Ecosistemas* 17(3): 1-3.
- Cabello, J., Alcaraz-Segura, D., Altesor, A., Delibes, M., Baeza, S., Liras, E. 2008. Funcionamiento ecosistémico y evaluación de prioridades geográficas en conservación. *Ecosistemas* 17(3):53-63.
- Cabrera, J. y Zuaznabar, R. 2010. Impactos sobre el ambiente del monocultivo de la caña de azúcar con el uso de la quema para la cosecha y la fertilización nitrogenada. I. Balance del carbono. *Cultivos tropicales*, vol 31, no. 31, p 5-13.
- Cardona, O., D. 1993. Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo. Elementos para el ordenamiento y la planeación del desarrollo, en: *Los desastres no son naturales*, A. Maskrey (compilador). LA RED, Tercer Mundo Editores, Bogotá. 140 p.
- Castillo, A.; Milanés, N.; Rodríguez, D. A.; Aguilar, N.; Ordóñez, P. y Lozano, F. 2007. Impacto de la quema de caña de azúcar sobre el N en suelos de la región Veracruz Central, México. *Revista Cuba & Caña*, p. 7-12.
- Chen JM, Leblanc SG, Miller JR, Freemantle J, Loche SE, Walthall CL, Innanen KA, White HP. 1999. Compact airborne spectrographic imager (CASI) used for mapping biophysical parameters of boreal forests. *J Geophys Res* 104:27945–27958
- CNIAA, 2010. Manual Azucarero Mexicano 2010. Editado por Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcoholera. Edición 53, 470 p.

- Colegio de Postgraduados. 2003. Informe Final del Proyecto: Necesidades de Investigación y Transferencia de Tecnología de la Cadena Agroindustrial Caña de Azúcar para el Estado de Veracruz. Fundación Produce Veracruz A. C. Colegio de Postgraduados, Campus Córdoba. Amatlán de los Reyes, Ver. 129 p.
- Crop Protection Compendium CPC. 2013. The world's most comprehensive site for Crop Protection Information. En: <http://www.cabi.org/cpc/>
- Curran P.J. 2001. Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry: Testing the Kokaly and Clark methodologies Remote Sensing of Environment 76(3):349-359
- Dadhwal V.K., R.P. Singh, S.Dutta & J.S. Parihar 2002. Remote sensing based crop inventory: A review of Indian experience Tropical Ecology 43(1):107-122
- Darvishzadeh R., *et al.*, 2008. Estimation of vegetation LAI from hyperspectral reflectance data: Effects of soil type and plant architecture, International journal of applied Earth observation and geoinformation, 10, 358-373.
- Dawson, T. P., Perryman, A. H., & Osborne, T. M. (2014). Modelling impacts of climate change on global food security. *Climatic Change*, 1-12.
- De Lira, V.; Barbosa da Silva, B.; Dantas Neto, J.; Sobral de Farias, M. S.; Cândido Bezerra, M. V.; Soares Franco, E. y Centeno, C. R. M. 2009. Análise espectral de índice de vegetação em área irrigada com cana-de-açúcar. *Engenharia Ambiental* 6(1):113-120.
- De Sousa V., Rea S. 1993. Correlación entre los componentes de rendimiento y calidad en cinco cultivares híbridos de caña de azúcar. *Caña de Azúcar*, 11(01): 45-52.
- Deressa, T., Hassan, R., & Poonyth, D. (2005). Measuring the impact of climate change on South African agriculture: the case of sugarcane growing regions. *Agrekon*, 44(4), 524-542.
- Ecurra, Ezequiel (1990) *De las Chinampas a la Megalópolis. El medio ambiente en la cuenca de México*. La ciencia para todos, Fondo de Cultura Económica, México. pp. 119
- Espindola G.M., Camara G., Reis I.A., Bins L.S. y Monteiro A.M., 2006. Parameter selection for region-growing image segmentation algorithms using spatial autocorrelation. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 3035–3040.
- Espinoza, G. 2007. Fundamentos de evaluación de impacto ambiental. Banco Interamericano de Desarrollo – Centro de Estudios para el Desarrollo, Santiago, Chile.
- FAO. 2002. Agricultura mundial: hacia los años 2015/2030. Informe resumido. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FAO. 2004. Bases de Datos Estadísticas. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. [cita: 10-dic-04] [http://www.fao.org/index\\_es.htm](http://www.fao.org/index_es.htm)
- FAO. 2009. Sugarcane, water relations and water management of sugarcane En: [http://www.fao.org/nr/water/cropinfo\\_sugarcane.html](http://www.fao.org/nr/water/cropinfo_sugarcane.html)
- FAO. 2010. *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010*. Informe Nacional México, 5-28. Roma, Italia.
- FAOSTAT (2014). <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor> [22 noviembre de 2014]

- Fortes, C. y Demattée, J.A.M. 2006. 'Discrimination of sugarcane varieties using Landsat 7 ETM+ spectral data'. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 27, no. 7, pp. 395-1412.
- Galindo M. G., C. Aguilar R.N. Zapata I. E., Mata C. F. L. Olvera. 2011. Vigilancia epidemiológica al ataque del barrenador de la caña de azúcar en la región Huasteca Potosina apoyados en métodos multicriterio y NOAA AVHRR. *Entomología Mexicana* 2011, ISBN 978-607-7533-99-3 pp. 370-374.
- Galindo M. G., C. Contreras S. L. Olvera. 2009. Metodología para determinar zonas de peligro al ataque de la langosta centroamericana (*Schistocerca piceifrons piceifrons* Walker) apoyados en sensores de alta resolución y SIG. Estudio de caso la Huasteca México. Conceptos de geomatica y estudios de caso en México. Compilado por Raul Aguirre Gomez UNAM-Ig serie libros de investigación No. 5, México D.F.
- Galindo, M. 2006. 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.
- Galvão, L.S., Formaggio, A.R. y Tisot, D.A. 2005. 'Discrimination of sugarcane varieties in Southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data'. *Remote Sensing of Environment*, vol. 94, pp. 523-534.
- Galvão, L.S., Formaggio, A.R. y Tisot, D.A. 2006. 'The influence of spectral resolution on discriminating Brazilian sugarcane varieties'. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24, pp. 769-777.
- Gers, C.J. 2003. 'Remotely sensed sugarcane phenological characteristics at Umfolozi South Africa'. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003, IGARSS '03, Proceedings, IEEE International*, vol. 2, pp. 1010-1012.
- Gilbert R.A. J.M. Shine. 2006. The effect of genotype, environment and time of harvest on sugarcane yields in Florida, USA *Field Crops Research* 95:156–170
- González-Iturbe, J. 2004. Introducción a la Percepción Remota. En Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales. Bautista (ed.). UNAM-INE.
- Gómez L. A. 2007. Situación actual del salivazo de la caña de azúcar. Comité sanitario de la caña. Ceñicana. Colombia.
- Gómez, Sergio. 2003. *Atlas de Historia de América*. Limusa, México. pp. 198
- Grant, J. P. 2013. Los costos de los alimentos y la inflación mundial. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, (5).
- Grijalba Castillo, O., Bueno, J., Montoya, J. 2013. Fenología del pimentón *Capsicum Annuum* con relación al biotipo Be Bemisia Tabaci (Hemiptera: Aleyrodidae).
- Hunsigi G. 2001. Sugarcane in Agriculture and industry. Eastern Press Pvt Ltd., Bangalore India 491 p
- INE. 2000a. Estrategia Nacional de Acción Climática. INE-SEMARNAT. [www.ine.gob.mx](http://www.ine.gob.mx)
- INE. 2000b. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. INE, México.
- Infante, D., Martínez, B., González, E., Gonzále, N. 2009. *Puccinia Kuehnii* (Kruger) Butler y *Puccinia melanocephala* H. Sydow y P. Sydow. En cultivo de la caña de azúcar. *Rev. Protección Veg.* Vol. 24, n1, pp. 22-28.

- INFOCAÑA, 2014. Padrón de Productores de Caña. <http://www.infocana.gob.mx/padron.html> [22 noviembre de 2014]
- Inman-Bamber N.G. T. L. Culverwell and M.G. McGlinchey. 1993. Predicting yield responses to irrigation of sugarcane from a growth model and field records. Proceedings of The South African Sugar Technologists' Association June 199. Pp 66-72.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2007. Censo agropecuario. Monterrey, México.
- Isaacs Echeverry, C.H. ; Zamorano Á. D. ; Villegas G., A. ; P. Contreras, C. ; Moreno Gil, C.A. 2009. Impacto del uso de prácticas agronómicas con enfoque de Agricultura Específica por Sitio (AEPS) en la rentabilidad de la caña de azúcar. Cali: CENICAÑA : 18 p. Documento de Trabajo 703.
- Jerlov, N. G. 1976. Marine optics, Elsevier Oceanography Series 14, Elsevier Publishing Company, Amsterdam.
- Johnson, R.M., Viator, R.P., Veremis, J.C., Richard Jr., E.P. y Zimba, P.V. 2005. 'Discrimination of sugarcane varieties with hyperspectral reflectance measurements and plant pigment analysis'. *Journal of the American Society of Sugar Cane Technologists*, vol. 25.
- Kerr, J., Ostrovsky, M. 2003. From space to species: ecological applications for remote sensing. *Trends in Ecology and Evolution* 18:299-305.
- Kingston, G.; Donzelli, J. L.; Meyer, J. H.; Richard, E. P.; Seeruttun, S.; Torres, J. y Van Antwerpen, R. 2005. Impact of the green-cane harvest production system on the agronomy of sugarcane. *Proc. Int. Soc. SugarCane Technol.*, vol. 15, p. 521–533.
- Kropff M. 1997. Intensive sugar cane production. Proceedings of sugar symposium. CAB International Wallingford UK. <http://trove.nla.gov.au/work/22912099?q=+&versionId=46516370> [2 Octubre de 2014]
- Kumar R. and L. Silva 1973. Reflectance Model of a Plant Leaf. <http://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1016&context=larstech>
- Lowenberg-DeBoer, J. and Swinton, S. 1997. Economics of site-specific management in agronomic crops. In: The State of Site-Specific Management for Agriculture USA. edited by F. Pierce and E. Sadler, (ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wisconsin, USA), pp. 369–396.
- Lutman PJW, Perry NH. 1999. Methods of weed patch detection in cereal crops. In: Weeds, vols 1–3. Brighton Conference, British Crop Protection Council, UK, pp 627–634
- MacLellan, C. 2010. Guidelines for importing and re-sampling spectra reflectance data for ENVI spectral libraries. 300-006, Field spectroscopy facility.
- Mahlein, A., Rumpf, T., Welke, Plümer, L., Steiner, U. and Oerke, E. 2013. Development of spectral indices for detecting and identifying plant diseases. Remote sensing of environmental 128 (2013) 21-30.
- Marote, M. 2010. Agricultura de precisión. Ciencia y Tecnología 10, ISEU.
- McBratney, A., Whelan, B. y Ancev, T. 2006. Future Directions of Precision Agriculture. Precision Agriculture, 6, 7-23.
- Melgar, M. 2010. Tendencias de la investigación en caña de azúcar a nivel mundial. Checar revista? CENGICAÑA.

- Miceli G.F., 2002. Regulación enzimática de la acumulación de sacarosa en cañas de azúcar (*Saccharum*spp.). *Agrociencia* (36):4, 411-419.
- Molina, P. 1999. Infección de vitroplántulas de caña de azúcar por *Pucciniamelanocephala*. Trabajo de diploma. Universidad de La Habana. Facultad de biología.
- Moore P.H. 2009. Sugarcane Biology, Yield, and Potential for Improvement. Workshop BIOEN on Sugarcane Improvement 18 e 19 de março, São Paulo. En: <http://www.fapesp.br/materia/5064/bioen/workshop-bioen-on-sugarcane-improvement-18-e-19-3-2009-.htm> [22 noviembre de 2014]
- Moore, P. y Maretzki, A. 1996. Sugarcane. Photoassimilate Distribution in Plant and Crops. Marcel Dekker Inc. p 643-669. New York-Basel-Hong Kong.
- Murillo, P.J. y Carbonell, J.A. 2009. 'Análisis preliminar para la identificación de variedades de caña de azúcar en áreas diferentes al valle del río Cauca, usando imágenes Alndsat 7 ETM+'. *VIII Congreso de la Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar, Tecnicaña, 2009*, vol. 1, pp. 32-38.
- Murillo, P.J., Osorio, C.A., Carbonell, J.A. y Palma A.E. 2010. 'Monitoring sugarcane crops in the Cauca river valley (Colombia), using MODIS satellite images'. *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technology*, 27:1-5.
- Nagendra, H., Gadgil, M. 1999. Biodiversity assessment at multiple scales: Linking remotely sensed data with field information. *Proceedings of the National Academy of the United States of America* 96:9154–9158.
- Nichol, C. y Grace, J. 2008. Determination of leaf pigment content in *Calluna vulgaris* shoots from spectral reflectance. *International journal of remote sensing*. Vol. 31, No. 20, 2010, 5409 – 5422.
- O'Leary, G. J. 2000. A review of tree sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. *Field Crops Research*, 68: 97–111.
- Olvera-Vargas, L., Aldama-Aguilera, C., Galindo-Mendoza, G. 2010. Mapas de riesgo epidemiológicos. Memorias del XIV Simposio internacional SELPER Noviembre 2010, Guanajuato, ISBN: 978-607-441-100-3. <http://www.selper-mexico.org.mx/XT%20PDF/EPIDEMIOLOGIA/EPIDEM-09.pdf>
- Ortega C. A. 1987. Insectos nocivos de maíz: una guía para su identificación en campo. CIMYYT. pp. 41.
- Pablos, P.; León, M. de; Cortegaza, P. L.; Osorio, N. y Villegas, R. 2007. Afectación de la materia orgánica del suelo bajo diferentes condiciones de manejo. Evento por el 60 Aniversario de la EPICA de Jovellanos. Varadero-Matanzas, junio 5 al 9, 2007.
- Pena-Barragan, J.M., Ngugi, M.K., Plant, R.E. y Six, J., 2011. Object-based crop identification using multiple vegetation indices, textural features and crop phenology. *Remote Sens. Environ*, 115, 1301-1306.
- Persson, J. and Eriksson, T. 2000. Nitrogen efficiency in practical agriculture – fundamental processes and how to control them. Conference at the Royal Swedish Academy of Agriculture and Forestry. 139:8
- Pettorelli, N., Vik, J.O., Mysterud, A., Gaillard, J.M., Tucker, C.J., Stenseth, N.C. 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology and Evolution* 20:503-510.
- Philipp I, Rath T. 2002. Improving plant discrimination in image processing by use of different colour space transformations. *Comput Electron Agric* 35(1):1–15.

- Pierri, Naína (2001) "El proceso histórico y teórico que conduce a la propuesta del DS". en Pierri y Foladori, Guillermo (2001) ¿Sustentabilidad? Desacuerdos sobre el desarrollo sustentable. Uruguay: Trabajo y Capital, 219p. (pp. 27-79)
- PNUMA (2002) "Integración de Medio Ambiente y el Desarrollo" Capítulo 1 de Perspectivas del Medio Ambiente Mundial (Geo3). España: Mundiprensa. pp 1-27
- Price JC (1992) Variability of high resolution crop reflectance spectra. Int J Remote Sens 14:2593–2610
- Price JC (1994) How unique are spectral signatures. Remote Sens Environ 49:181–186
- Rama, R., Garg, P., and Ghosh, S. 2007. Development of an agricultural crops spectral library and classification of crops at cultivar level using hyperspectral data. Precision Agric. 8:173-185. DOI 10.1007/s11119-007-9037-x
- Robert PC. 1999. Precision agriculture: research needs and status in the USA. In: Stafford JV (ed) Proceedings of the 2nd European conference on Precision Agriculture, Sheffield Academic Press, Sheffield, UK, pp 19–33
- Robertson M.J., Muchow R.C. and Prestwidge D.B. 1996. the sugarcane database system: enhancing the ability of field experimentation to overcome constraints to sugarcane production Sugarcane: Research Towards Efficient and Sustainable Production. Wilson JR, Hogarth DM, Campbell JA and Garside AL (Eds).CSIRO Division of Tropical Crops and Pastures, Brisbane pp. 19-21
- Rodríguez, I; Pineda, E.; Fernández, I.; Marresa, M.; Gil, Y.; Rodríguez, L.; Aguilera, L.; Mas, R.; Acosta, F.; García, I.; Sánchez, E.; Díaz, T.; Reyes, M.; González, Y.; Estévez, Y.; Álvarez, R.; Dueñas, M.; Barreto, B.; Becerra, E. y Hernández, N. 2007. El cultivo de la caña de azúcar y su influencia sobre algunas propiedades químicas y el rendimiento agrícola de un suelo Pardo sialítico bajo diferentes regímenes de fertilización. Evento por el 60 Aniversario de la EPICA de Jovellanos. Varadero-Matanzas, junio 5 al 9, 2007.
- Rodríguez, L. D. A., 2004. Fitoprotección de la Caña de Azúcar: Plagas. Universidad Veracruzana. Veracruz.
- Rodríguez, R. y Saavedra, G. 2011. La participación social en el ordenamiento territorial. Participación o representación, un dilema legal metodológico. En Ordenamiento territorial y participación social: problemas y posibilidades. Aguilar, M., Delgado, E., Vázquez, V. y Reyes, O. (editores). Instituto Nacional de Ecología. Primera edición, 2011.
- Romero R. E. (2009). Manual del Cañero. <http://www.eeaoc.org.ar/publicaciones/categoria/18/50/Manual-del-Canero.html> [10 noviembre de 2014]
- Rosas, N. M. G., De Luna, E. J. S., Arévalo K. N., Galán, L. J. W. y Morales, L. H. R., 2005. Cría de *Diatraea saccharalis* (F.) En dieta no específica. Nota Científica. Southwestern Entomologist. Volumen 30, Número 3. pp. 2.
- Salgado, G. S; Buero, L.; Riestra, D. y Laguries-Espinoza, L. C. 2001. Caña de azúcar, hacia un manejo sustentable. Centro de Posgraduados Campus Tabasco, ISPROYAB., Villahermosa: Fundación Produce. 394 p.
- Sánchez U.R. 2003. Impacto de la crisis azucarera en las unidades de producción cañera. Tesis de Maestría en estrategias para el desarrollo agrícola regional. COLPOS campus Puebla 161 p.

- Sánchez, O., Peters, E., Marquez, R., Vega, G., Valdés, M., Azuara, D. (2005) Temas sobre restauración ecológica. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, México.
- Serra, G. y Trumper, E., 2006. Estimating the incidence of corn stem damage produced by *Diatraeasaccharalis*(Lepidoptera: Crambidae) larva through assessment of external infestation signs. *Agriscientia*. Volumen 23. pp. 7
- 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.
- Singels A. 2005. The effect of crop start date, crop class and cultivar on sugarcane canopy development and radiation interception. *Field Crops Research* 92 (2005) 249–260
- Singels, A., Jones, M., Marin, F., Ruane, A., & Thorburn, P. (2013). Predicting climate change impacts on sugarcane production at sites in Australia, Brazil and South Africa using the Canegro model. *Sugar Tech*, 1-9.
- Smit, M A 2004. Differences in canopy development of two sugarcane cultivars under conditions of water stress: preliminary results. *Proc S Afr Sug Technol Ass* 78:149-152.
- Smith, M., Goodchild, M., Longley, P. 2009. *Geospatial Analysis. A comprehensive guide 3er edition*. Splint Initiative, UK. [Online] disponible en [<http://www.spatialanalysisonline.com/output/>]. [Consultado el 11 de Noviembre de 2014].
- Soares A. S.,2008. Incident light orientation lets C4 monocotyledonous leaves make light work differently. *Nature Precedings* : hdl:10101/npre.2008.1672.1
- Solomon S 1996. Sugar production in India by 2000 AD. 1. Constraints and strategies for increasing production and production efficiency. *Sugarcane: Research Towards Efficient and Sustainable Production*. Wilson JR, Hogarth DM, Campbell JA and Garside AL (Eds). CSIRO Division of Tropical Crops and Pastures, Brisbane. 1996. pp. 9-11.
- Stafford, J. V. 1999. GPS in Agriculture – A Growing Market!. *Journal of Navigation*, 52, pp 60-69.
- Suman, S., More, V. R., & Sinha, R. 2013. Mobile application development for precision farming in indian context. *World Journal of Science and Technology*, 2(10).
- SVC (Spectral Vista Corporation). 1980. GER 1500 User Manual. Revision 3.7. New York.
- Thompson Vinton., León G. R. 2005. La identificación y distribución de los salivazos de la caña de azúcar y los pastos (Homoptera: Cersopidae) en Costa Rica. *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología*. Costa Rica. No. 75 .pp 43-51.
- Thorp. K. R. 2010. Assimilating leaf area index estimates from remote sensing into the simulations of a cropping systems model. *Journal American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 53(1): 251-262.
- Thorp, K., Wang, G., West, A., Moran, M., Bronson, K., White, J., Mon, J. 2012. Estimating crop biophysical properties from remote sensing data by inverting linked radiative transfer and ecophysiological models. *Remote sensing of environment* 124, 224-233.

- Turner, W., Spector, S., Gardiner, N., Fladeland, M., Sterling, E., Steininger, M. 2003. Remote sensing for biodiversity science and conservation. *Trends in Ecology and Evolution* 18:306-314.
- Umul, M, X. 2000. Evaluación de tres dosis y seis épocas de aplicación de ethrel, utilizado como inhibidor en la floración de caña de azúcar (*Saccharum* sp). En el estrato alto del ingenio El Baúl, S.A., Escuintla, Guatemala. Tesis Ing. Agr. Guatemala, USAC. 71 p.
- Valero Ubierna, C. 2001. Agricultura de Precisión: Conceptos y situación actual. *Vida rural*, (136), 58-62.
- Vazquez-Yañez, C., & Orozco, A. (1989). La destrucción de la naturaleza. *Colección La ciencia desde México*, 83.
- Victoria, J., Moreno, C., Casslett, C. 1990. Genotype environmental interaction and its effects on sugarcane rust incidence. *Sugarcane*. 4:13 – 17.
- Victoria, J., Ochoa, B., Góme, Y. 1984. La roya de la caña de azúcar en el valle del Cauca: diseminación y efecto en la producción. En actas del Congreso de la Sociedad de Colombia de Técnicas de la caña de azúcar. Colombia. 28-30 nov 1984.
- Viñas Román, J. Cambios en la educación agrícola en curso y perspectiva. *CEIBA*, Volumen 37 (1): 23-36.
- Waclawovsky A. J., P. M. Sato, C. G. Lembke, P. H. Moore, G. M. Souza. 2010. Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content *Plant Biotechnology Journal* 8:263–276
- Webster, R. y M. Oliver. 2001. *Geostatistics for Environmental Scientists*. John Wiley and Sons, LTD. UK. 271 p.
- Yang, S. J. 1997. The water use efficiency of sugar cane crop – a review. *ISSCT Irrigation Workshop*. Townsville, Australia, Sept. 15 – 19, 22 p.
- Zhao Chunjiang, Jihua Wang 2010. Spectral indices sensitively discriminating wheat genotypes of different canopy architectures. *Precision Agric* 11:557–567
- Zhuang, W., Wang, C., & Wang, X. 2013. Research and Implementation of Measurement Data Wavelet De-noising and 3D Visualization of Farmland. In *Computer and Computing Technologies in Agriculture VI* (pp. 27-35). Springer Berlin Heidelberg.