



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**  
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

**CAMPUS MONTECILLO**  
**POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA**

**ESTUDIO MULTIESCALAR DEL RECURSO HIDRICO COMO  
FACTOR DE CAMBIO EN DISTRITOS DEL NORESTE DE  
TAMAULIPAS**

**EDGAR VLADIMIR GUTIÉRREZ CASTORENA**

**T E S I S**  
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

**DOCTOR EN CIENCIAS**

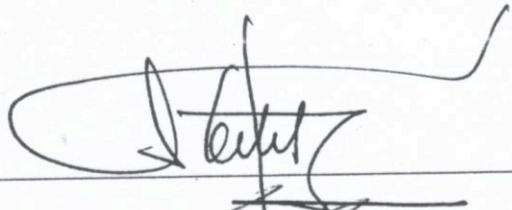
MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

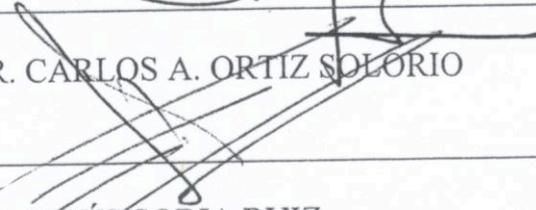
2009

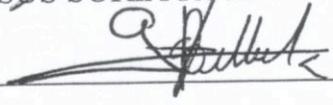
La presente tesis, Estudio multiescalar del recurso hídrico como factor de cambio en distritos del noreste de Tamaulipas, realizada por el alumno: Edgar Vladimir Gutiérrez Castorena, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

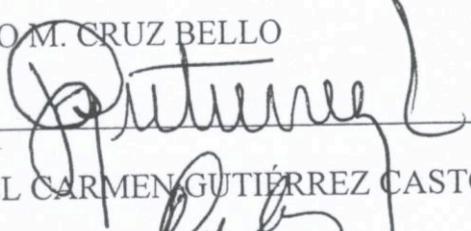
DOCTOR EN CIENCIAS  
EDAFOLOGÍA

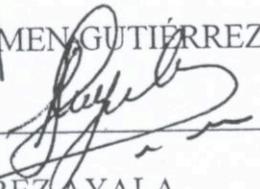
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:   
DR. CARLOS A. ORTIZ SOLÓRIZ

ASESOR:   
DR. JESÚS SORIA RUIZ

ASESOR:   
DR. GUSTAVO M. CRUZ BELLO

ASESOR:   
DRA. MA. DEL CARMEN GUTIÉRREZ CASTORENA

ASESOR:   
DR. CARLOS RAMÍREZ AYALA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, septiembre de 2009

# ESTUDIO MULTIESCALAR DEL RECURSO HIDRICO COMO FACTOR DE CAMBIO EN DISTRITOS DEL NORESTE DE TAMAULIPAS

EDGAR VLADIMIR GUTIÉRREZ CASTORENA, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2009

A partir de 1994, la Tercera Unidad de Asistencia Técnica del Distrito de Riego No. 026, región noreste del estado de Tamaulipas, fue modificado por un déficit de humedad colocando a la región en una situación de alta vulnerabilidad social, económica, política, cultural y agroecológica. Debido a la complejidad del problema se llevó a cabo una investigación multiescalar desde, el nivel mega-macro hasta el microscópico empleando diferentes metodologías: interpretación de imágenes de satélite, uso de sistemas de información geográfica, creación de bases de datos (90,500 piezas), encuestas directas con productores, análisis físicos, químicos, mineralógicos y micromorfológicos de suelos. Los objetivos que se plantearon fueron: 1) Evaluar el uso de la percepción remota con la elaboración de la cartografía temática proveniente de imágenes de satélite de baja y alta resolución, obteniéndose estadísticas agrícolas de los cultivos de sorgo y maíz; 2) Estudiar las acciones llevadas a cabo por los agricultores para mitigar el impacto de déficit de agua; y 3) Determinar los cambios en las propiedades edáficas y establecer la clasificación taxonómica de suelos con y sin alteración del régimen de humedad. Se encontró que la estimación de la superficie agrícola por muestreo en campo fue más precisa y consistente (90%) que la calculada por percepción remota (entre 20 y 80%). La gran comunicación entre productores evitó la disminución de la superficie agrícola al cambiar el patrón de cultivo y distribuir homogéneamente el recurso hídrico. Las propiedades edáficas en las áreas de temporal y de riego, no se alteraron pero si en los suelos cercanos a los canales de riego. La clasificación taxonómica de los suelos se modificó de Aridisoles a Inceptisoles por el cambio del régimen de humedad.

Palabras claves: Patrón de cultivo; Maíz; Sorgo; SIG; Cambio de uso de suelo; Clasificación de Suelos; Suelos semi-áridos; Déficit de agua; Percepción remota.

# MULTI-SCALAR ANALYSIS OF WATER AS A PROXIMATE SOURCE OF CHANGE IN AGRICULTURAL DISTRICTS OF NORTHEAST, TAMAULIPAS

EDGAR VLADIMIR GUTIÉRREZ CASTORENA, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2009

Since 1994, the agricultural scenario in the Third Unit of Technical Assistance, belonging to the 26<sup>th</sup> Rural District, northeast of Tamaulipas, was modified by a moisture deficit, which situated the region in a state of high vulnerability in terms of economic, politics, cultural, social, and agro-ecological point of view. Because of the complexity of the problem, a multi-scalar research was carried out, including from “mega-macro” scales to microscopic scales. Different procedures were applied using satellite images, geographic information systems, multiple databases, direct interviews to farmers, and soil laboratory analysis, including physical, chemical, mineralogical, and micro-morphological tests. The objectives of this research were to 1) evaluate the application of remote sensing to mapping corn and sorghum crops and estimating crop yields of these two species using low and high resolution images; 2) study the actions performed by farmers in order to mitigate the impact of water deficit; and 3) determine the changes in soil properties to establish the taxonomical classifications of irrigated and non-irrigated soils. It was found that sampling the data was more precise (90%) than remote sensing (20 – 80 %), to estimate crop cover and yield. Additionally, the efficient communication between farmers avoided the reduction of agricultural surface, by shifting crops and distributing equally water resources. Soil properties were not significantly different among irrigated and non irrigated areas; however, there were changes in soil properties between soils near to the channel mean from those far to the channel. Therefore, the taxonomic classification of soils near the channel changed from aridisols to inceptisols, because of the change in moisture regime.

Keywords: Maize; Sorghum; GIS; Land use change; Environment adaptation; Crop patterns; Irrigation Districts; Remote sensing.

## AGRADECIMIENTO

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el financiamiento económico otorgado para la realización de mis estudios doctorales.

Al Colegio de Postgraduados campus Montecillos, especialmente al programa de Edafología, por brindarme la oportunidad para realizar mis estudios.

A la Tercera Unida de Asistencia Técnica del Distrito de Riego 026, por confiar los documentos e información de las estadísticas agrícolas reportadas anualmente, siendo la fuente principal de información en la presente investigación.

Al Dr. Carlos Alberto Ortiz Solorio, como persona que otorgó su amplia experiencia de análisis crítico, al dirigir y aconsejar académicamente cada etapa de la investigación, Asimismo, por brindarme de herramientas y conocimientos necesarios para aplicarlos en nuevas fronteras del conocimiento.

A la Dra. Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena, que concedió acertados comentarios y asesoría oportuna en momentos que otorgaron a la investigación nuevas directrices. Además, expreso una amplia gratitud hacia su persona y familia, ya que sin su apoyo nunca hubiese sido posible realizar mis estudios.

A los Dr. Jesús Soria R. y Dr. Gustavo M. Cruz, por su asesoría personalizada durante la etapa de estudio macroscópicos (percepción Remota). Igualmente, al Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas y Pecuarias, por proporcionar imágenes satelitales de la constelación Spot.

A la biblioteca principal de la Universidad de Arizona, en Tucson, AZ, por las facilidades de acceso a las bases de datos digitales, en particular de las revistas electrónicas. Sin el acceso anteriormente citado vía del Dr. Lenom Cajuste-Bontemps jr., habría sido imposible lograr una revisión exhaustiva de los temas de investigación desarrollados en la presente disertación.

Al M. C. Patricio Sánchez Guzmán, por su amistad y disponibilidad en todos los momentos y por las facilidades otorgadas durante mi estancia en la Institución.

A Carmen Bojorges B., A Felipa Hernández Hernández, Luis Zamora Hernández, Candelario Ayala Vergara y Pedro Torres Flore personal de apoyo de la Sección de Génesis Morfología y Clasificación de Tierras por su disponibilidad.

## DEDICATORIA

El describir y expresar sentimientos de gratitud a personas que durante mucho tiempo te han enseñado valores morales, de convivencia y de ética profesional, e inducido a una constante superación personal e intelectual, desde la educación básica hasta estudios doctorales llega a ser algo indescriptible. Principalmente porque fueron tantos los momentos en la fracción del tiempo y espacio que describirlos me llevaría muchas cuartillas, lo cual no es posible en esta dedicatoria. Sin embargo, todos esos momentos en su conjunto han forjado en mi persona la forma de conducir y percibir la vida, la cual agradezco infinitamente.

Gracias padres (Daniel y Belén) por lo mucho que me brindaron con el paso del tiempo, y que en estos momentos de culminación expreso mi gratitud y reconocimiento hacia ustedes. A mis queridos y apreciables hermanos y hermanas (Javier, Irma, Xochitl, Belén, Elva, Daniel, Felipe, Elida, Laura, Carmen, Claudio, Pablo y Gallaguer) mi eterna gratitud, a cada uno de usted, que a pesar de ser tan distintos uno de otro siempre nos hemos conducido con armonía y cariño.

A mi esposa Rocío M. de la Garza, al estar ubicada a un flanco de mi como un bastón en el que puedo y puedo apoyarme plenamente con seguridad, y juntos hemos forjado un camino y un futuro. Todo mi amor. Ha ustedes hijas: Rocío Citlali y Elisa Anayatzin que son la luz y fuerza de mi existencia y que sin ustedes la vida no tendría sentido.

## CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
CAPITULO I. ESTIMACIÓN DE ESTADÍSTICAS AGRÍCOLAS: por muestreo de parcelas y percepción remota	3
CAPITULO II. TECHNICAL, ECONOMICAL AND SOCIAL ACTIONS OF FARMERS TO MITIGATE WATER DEFICIT IN TAMAULIPAS, MEXICO.	37
CAPITULO III. MODIFICACION DE LAS PROPIEDADES EDAFICAS POR EL CAMBIO DEL REGIMEN DE HUMEDAD EN EL SUELO	57
CONCLUSIONES GENERALES	91

## INTRODUCCIÓN GENERAL

En la zona semiárida del noreste de Tamaulipas, México, se encuentra ubicado tanto Distritos agrícolas de temporal (DAT) como de riego (DAR) destinados a la producción de maíz y sorgo. El área agrícola comprende gran parte de la frontera norte del estado, iniciando al Este en el municipio de Días Ordaz y finalizando al Oeste en el municipio de Matamoros, hacia el Norte con el Río Bravo y hacia el Sur en los municipios de San Fernando.

La producción de cultivos agrícolas ha variado con el tiempo, adaptándose constantemente a factores de tipo climático (heladas), fitosanitarias, y el de mayor importancia a la disponibilidad del recurso hídrico destinado a la agricultura. Este último ha cambiado las relaciones entre productores (tipo social), económicas (entre pueblos fronterizos de México y Estados Unidos), culturales (integración entre municipios), y en técnicas agrícolas (transferencia de tecnología entre técnicos y productores).

La limitación del recurso hídrico a la agricultura motivó cambios en el patrón de cultivos, así como algunas propiedades físicas, químicas y micromorfológicas del suelo, siendo necesario realizar un estudio multiescalar con metodologías específicas en cada escala. La escala megascópica (superficie de miles de kilómetros) utiliza imágenes de satélite de baja y alta resolución y sistemas de información geográfico. La escala macroscópica (km-m) incluye fotografías de paisajes, perfiles de suelos, análisis de laboratorio (físicos, químicos), o además, de estudios económicos, sociales, culturales y políticos. Finalmente, la escala microscópica (mm- $\mu$ m) implica estudios micromorfológicos y mineralógicos a través de secciones delgadas de suelos y difracción de rayos X.

Este trabajo de investigación comprende tres capítulos que involucran a las diferentes escalas, los cuales se resumen a continuación:

Capítulo I. *A nivel de escalas mega y macroscópicas*, se comparó la estimación de estadísticas agrícolas anuales con percepción remota y muestreo directo en campo, aplicadas para grandes extensiones. Para ello, fue necesario disponer de imágenes de satélite de baja y alta resolución (Modis y Spot) proporcionada por ERMEXS-SAGARPA-INIFAP y CONABIO; la base de datos por la Tercera Unidad de Asistencia Técnica del DAR-026 bajo un Sistema de Información Geográfico suministrado por las oficinas centrales del Distrito. Los resultados de tres ciclos agrícolas consecutivos (2004-2005-2006) indican que con el muestreo directo en

campo en 75 puntos o parcelas, fue mayor la precisión (90%), mientras que por percepción remota se presentó una variación en los ciclos entre 20 y 80% para la misma superficie agrícola. Esto significa que el trabajo en campo es mas preciso, objetivo, fiable y continuo que con percepción remota. Se recomienda que la estimación de las estadísticas agrícolas no se base únicamente en imágenes de satélite dada su importancia en la planeación de las políticas de desarrollo social que al estar sesgadas pueden limitar el desarrollo de nuestro país.

Capítulo II. *Escala macroscópica (paisaje y de campo)*, los cambios por déficit de humedad en el DAR motivó que agricultores realizaran acciones de tipo técnico, económico y social con la finalidad de mitigar el desabasto de agua y evitar el abandono de las tierras. Desde el punto de vista técnico, los productores cambiaron drásticamente el padrón de cultivo, (maíz a sorgo) para mantener su actividad; en el ámbito económico, el cultivo sorgo aunque con menor precio de mercado evitó el abandono y migración, al continuar cultivando toda la superficie agrícola; y por ultimo, el aspecto social, ya que al establecer una comunicación efectiva entre productor-productor y productor-técnico, se pudieron efectuar los cambios de cultivo entre ciclos agrícolas, y una distribución equitativa del agua disponible.

Capítulo III. *Escalas macro y microscópicas*, se estudiaron los cambios provocados al suelo por efecto de la agricultura (labranza tradicional), aplicación de agua de riego, con y sin drenaje agrícola subterráneo, y con y sin incorporación de residuos de cosecha. Para ello, se realizaron perfiles de suelos, análisis físicos, químicos, mineralógicos y micromorfológicos y se clasificaron taxonómicamente. La labranza tradicional tiene un efecto directo en la capa de arable de los diversos suelos al pulverizar agregados y residuos de cosecha evitando la agregación de las partículas, no obstante, la estabilidad en agregados mayores de 2.0 mm de diámetro fueron localizados en suelos cercanos a canales debido a la cementación de partículas por carbonatos de calcio y no tanto por la incorporación de materia orgánica. Los suelos son Aridisoles (suelos de temporal) o Inceptisoles (suelos irrigados y ubicados cerca del canal de riego).

## CAPITULO I

ESTIMACIÓN DE ESTADÍSTICAS AGRÍCOLAS: por muestreo de parcelas y percepción remota

# ESTIMACIÓN DE ESTADÍSTICAS AGRÍCOLAS: por muestreo de parcelas y percepción remota

Edgar Vladimir Gutiérrez-Castorena,<sup>1</sup> C.A. Ortiz-Solorio<sup>1</sup>, J. Soria-Ruiz<sup>2</sup>, G.M.Cruz-Bello<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Génesis Morfología y Clasificación de Suelos, Colegio de Postgraduados, Montecillos, Texcoco 56230, México.

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícola y Pecuarias (INIFAP).

## Resumen

La estimación de estadísticas agrícolas con técnicas de percepción remota se inicia en México en 1998, utilizando imágenes del satélite Landsat TM; Sin embargo, fue hasta 2004, cuando el gobierno federal comenzó el proyecto “Programa Nacional de Estimación de Superficie, Producción y Rendimiento” (PRONESPRES) empleando imágenes Spot bajo la dirección de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural y Alimentación (SAGARPA). Los objetivos de la investigación fueron: 1) evaluar el uso de la percepción remota mediante la elaboración de mapas temáticos provenientes de imágenes de satélite, para obtener estadísticas agrícolas de cultivos de interés (maíz y sorgo) dentro de la Tercera Unidad de Asistencia Técnica (TUAT) del Distrito de Riego 026; y 2) implementar y evaluar el muestreo directo parcelario en campo sobre el padrón agrícola dentro del DR-026, como alternativa para generación de estadísticas agrícolas anuales en cultivos de interés, tal y como se recomienda en EUA y Europa. El trabajo se realizó en una superficie de 16,925 ha de riego, distribuidas en 635 parcelas, durante los ciclos 2004, 2005 y 2006. Los métodos empleados consistieron en: 1) técnicas de clasificación supervisada de imágenes de satélite (Modis y Spot), y 2) muestreo directo en campo sobre el padrón de usuarios, siendo cotejados contra el registro de cultivos del distrito agrícola, para los mismos ciclos. Los resultados indican que la estimación de estadísticas para los cultivos (maíz y sorgo) con técnicas de percepción remota no garantiza la objetividad, fiabilidad ni continuidad de los datos debido al intervalo de variación de la precisión de los mapas temáticos elaborados con imágenes de Spot y Modis (20.2 y 80.1%, y 53.2 y 68.1%, respectivamente) durante los ciclos agrícolas 2004, 2005 y 2006. En cambio, el muestreo directo de 75 parcelas sobre el padrón obtuvo una precisión que varió entre 91 y 96% durante los tres ciclos agrícolas, lo cual refleja certidumbre sobre la estimación con este último método.

Palabras clave: Imágenes de satélite, Cartografía temática, huellas espectrales de maíz y sorgo.

## Summary

Agricultural Statistics forecasting using remote sensing techniques initiated in Mexico in 1998, using Landsat TM images; further, in 2004, the Federal Government under the direction of the Ministry of Agriculture (SAGARPA) started a project called PRONESPRES to achieve the same goal, however, using this time SPOT images. The objectives of this research were to 1) assess the use of remote sensing techniques through generation of maps with satellite images to obtain agricultural census of crops (maize and sorghum) within the Third Unit of Technical Assistance from the Irrigation District 026 (DI-026), and 2) perform and assess a method based on direct parcel sampling through the agricultural registry of the same district, as an alternative to generate annual agricultural censuses for determined crops, in a similar fashion as it is performed in USA and Europe. The research was carried out in an extension of 16,925 ha, distributed in 635 plots, during 2004, 2005, and 2006 crop cycles. The applied methods in this study included 1) supervised classification techniques of satellite images, and 2) direct sampling of plots through the district registry of the farmers, which was cross-checked with the registry of crops from the same district, and for the same three crop cycles. Results showed that forecasting of agricultural statistics for maize and sorghum using remote sensing techniques did not guarantee accuracy, consistency, and reliability of the data obtained, because of the high variation of the accuracy of maps obtained with SPOT and MODIS satellite images (from 20 to 80 %, and from 53 to 68 %, respectively) during the three crop cycles mentioned before. Conversely, the direct sampling of plots using the registry of farmers and crops showed a variation range of accuracy between 91 and 96 % for the same period, reflecting such a fact the certainty of this method over that using remote sensing, for the region.

Keywords: Imagines of satellite, Thematic map, signature spectral of maize and sorghum.

## 1. Introducción

### 1.1. Antecedentes

A través del tiempo, diversas civilizaciones han empleado el registro o estadísticas de sus cosechas. Sin embargo, fue hasta la cultura romana cuando se usó el término “estadística”, con el objetivo de recopilar información de censos de población, nacimientos, defunciones, cosechas e impuestos, entre otros. Posteriormente, la cultura germánica usó el término “*Statistik*” introducido por Gottfried Achenwall en 1749, para el análisis de la información por el Estado; no obstante, fue hasta el siglo XIX cuando el inglés John Sinclair le dio el significado que actualmente se usa; es decir, el de recolectar y clasificar información (Calvo-Coin, 2000).

### 1.2. Importancia de la estadística agrícola

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO, 1982) indica que las estadísticas de superficies y rendimientos de cultivos, son una de las actividades más importantes para la organización, así como el entendimiento de los factores que determinan la producción agrícola. A pesar de ello, en la mayoría de los países subdesarrollados la compilación es nula o se carece de información continua y detallada.

La importancia en las estimaciones de producción agrícola radica en la formulación y evaluación de planes de desarrollo, basados en la disponibilidad de estadísticas completas y de buena calidad. Su conocimiento oportuno y objetivo permite coadyuvar en la seguridad alimentaria y/o disponibilidad de materias primas (SAGARPA-SIAP, 2003), así como diseñar e instrumentar las políticas de comercialización (importación, exportación y apoyos a la comercialización). Además se puede cuantificar, ubicar y determinar la estacionalidad de los volúmenes de producción, los cuales al no generarse se convierten en un factor limitante para el progreso de un país (Torres, 2003).

Bascou (2004) menciona que las estadísticas agrícolas han mantenido un lugar prominente en Europa, lo que refleja la relevancia del sector agrícola en la economía y su papel como principal usuario de recurso suelo. La importancia de la información en la planeación a mediano plazo se encuentra estrechamente vinculada con los procesos de ampliación del sector agrícola, la cual está encaminado a promover la competitividad y la sostenibilidad en los mercados bajo una integración armonizada de la zona rural respondiendo a las preocupaciones de la sociedad (Andersen y Tonboe, 1999). Para cualquier programa de desarrollo nacional es necesario

disponer de series cronológicas de producción agrícola que incluyan la superficie cultivada y el rendimiento por unidad de superficie.

Si un país lleva la planificación del desarrollo sin estadísticas agrícolas las consecuencias son devastadora para el sector económico. Si éste no atiende las necesidades básicas de alimentación estará menoscabando la salud y por consiguiente la capacidad de trabajo de la población; además, generará graves presiones inflacionarias debido a la escasez de alimento y a la alza de precios, lo que a su vez obligará a importar alimentos, restando las importaciones de bienes de capital (Monreal, 2008). Lo anterior, obliga a establecer mecanismos y procedimientos de mayor veracidad en las estadísticas agrícolas y en las políticas agrarias de países en vías de desarrollo, para evitar la importación de granos, el desabasto alimenticio nacional y la disminución en presiones inflacionarias e inestabilidad social (SIAP, 2009).

### *1.3. Estadísticas agrícolas en los EUA*

La importancia de la estadística agrícola en los EUA se remonta a lo ocurrido en junio de 1905, cuando se reportó menor superficie cultivada de algodón de la que en realidad existía. Esto generó el reproche de los mismos miembros del Departamento de Agricultura y se propuso una nueva forma de emitir los reportes, la cual fue plasmada en el anuario de estadísticas agrícolas del mismo año (Allen, 2007). Estos reportes, han evolucionado en diferentes etapas: la primera de 1910 a 1930, conocida como el periodo de expansión y descentralización; la de 1933, impactada por la gran depresión; y la última en 1961, con la creación del Servicio de Reportes Estadísticos, SRS (por sus siglas en inglés) y el Servicio de Investigación Económica (ERS). Esta última se convirtió en el NASS (National Agricultural Statistics Service) con autonomía propia encargada de recopilar y difundir las estadísticas agrícolas.

La era moderna de la estadística, para estimar la superficie cultivada, se inició en 1957, a través del uso de fotografías aéreas y de entrevistas en forma aleatoria a productores, metodología denominada “segmentos” (Allen, 2007). Esta fue remplazada en 1978 por imágenes de satélite Landsat aparentemente por disminución de costos y por ser más precisa (Hanuschal et al., 1979; Hanuschal, 1992). Uno de los primeros trabajos en zonas agrícolas, fue el realizado por Bauer et al. (1979) para estimar la superficie agrícola (maíz, soya y otros) en tres estados de EUA con imágenes Landsat (MSS) bajo la combinación de bandas espectrales y reportaron una confiabilidad de 80%. Sin embargo, otros autores encontraron que en algunas zonas la cobertura

de nubes era un serio problema para estimar la superficie cultivada (Hanuschal et al., 1979; Huddleston y Rusell, 1979). Ante esta situación, Huddleston y Rusell (1979) propusieron retomar al uso de fotografías aéreas y mapas topográficos para realizar las estadísticas agrícolas de Jamaica.

El Servicio de Reportes Estadísticos ha utilizado y comparado ambas metodologías (encuestas y por imágenes de satélite) para establecer la más idónea (SRS, 1976), incluso en actividades de espionaje, donde la información de un país es limitada; por ejemplo, cuando se quería conocer la producción de trigo, soya y otros cultivos en países como la Ex Unión, la República Popular de China, Brasil y Argentina que pudieran influir en el mercado de importación o exportación de granos. Este proyecto no solamente utilizó imágenes de satélite, sino también tuvieron que emplear otras fuentes de información para darle más confiabilidad a las estimaciones (SRS, 1983).

Caudill (1984) indica que la metodología empleada por el NASS, en la estimación de la superficie agrícola, nunca tuvo como objetivo principal sustituir en forma completa las estimaciones basada por encuestas sobre el terreno (programa denominado por sus siglas en ingles JES; June Enumerative Survey). De hecho, fue evidente desde el comienzo de 1972, que el enfoque más lógico sería desarrollar una metodología que combinara las ventajas de las dos fuentes de datos para producir estimaciones más precisas. Por su parte, Hale (1999) reportó que el programa de estimación y predicción del NASS no solamente utilizó la información obtenida por imágenes de satélite y datos meteorológicos, sino también empleó datos de encuestas realizadas a los agricultores sobre sus cultivos (reportes que se realizan durante toda la temporada); esta información es de mayor importancia para la Junta Estatal de Estadística (JES).

Dentro de las investigaciones que se han realizado para estimar estadísticas agrícolas con imágenes de satélite, se tiene el Hansuchak (1992) quien recomendó el uso de Sistemas de Información Geográficos con aplicación del sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) y radar, junto a datos de desarrollo en cultivos, cambio climático y uso del Índice de Vegetación Diferencial Normalizada (NDVI). Asimismo, propusieron implementar nuevos productos cartográficos a nivel de condado que mostrara las estimaciones, cobertura y desarrollo de cultivos, isóneas de heladas mensuales y encuestas de productores sobre los rendimientos agrícolas (Muller et al. 1995). Por su parte, Hale (1999) uso el nuevo sensor llamado Modis para proporcionar mediciones más precisas sobre las condiciones de la planta aunque no especificó el

tipo de cultivo. Sin embargo, mencionó que no existe ningún tipo de resolución espectral en la teledetección que fuera prometedora en la estimación y predicción del rendimiento cuando se compara con métodos por encuesta.

En el caso del método por encuestas fue publicado el “Resumen Operativo” en 1998 y como Programa de Predicción de Rendimientos en 2006 (NASS, 2006), denominado “El Poder de los Métodos Estadísticos”, para determinar las coberturas de trigo, maíz, soya algodón y papa. El diseño de muestreo estadístico por encuestas emplea dos marcos de referencia: primero, cubre el área que asegura una cobertura completa de la población agrícola en EUA; y el segundo, hace referencia tanto al padrón de usuarios como al padrón de granjas, e incluye el contorno para cada ciclo agrícola así como su producción histórica. Algunas ventajas son la integridad y la estabilidad de información, mientras que su debilidad es la recopilación de información en pequeñas regiones. Por tal motivo, la muestra sobre el padrón de usuario es más eficiente (productos básicos específicos) si los datos de cobertura son recolectados directamente en las granjas agrícolas, y se registran los cambios hechos por el productor en cada Estado, lo que permite flexibilidad y tipificación de las situaciones locales (NASS, 2006).

#### *1.4. Estadística agrícola en la Comunidad Europea*

Para la Comunidad Europea (CE-27), el órgano rector encargado de estimar las estadísticas agrícolas es la Dirección General de Agricultura (DG-AGRI). Esta dirección fue creada con el objeto de regular y actualizar la información de la superficie agrícola cultivada mediante una Política Agrícola Común (PAC) a partir de la estimación de la producción agrícola en todo el territorio miembros de la comunidad. EUROSTAT, es la oficina encargada de almacenar y ordenar la información estadística generada por los miembros de la comunidad, manteniendo actualizada todas sus bases de datos (Boissezon y Sharman, 1993). Esta oficina (EUROSTAT) realizó en (2001) una ampliación en su base de datos con estadísticas de productos agrícolas que se compilaron entre 1955 y 1973. La información fue armonizada para crear series cronológicas de cosechas y los resultados se publicaron en 1985 en el primer Manual de Estadística Agrícola.

Tanto DG-AGRI como EUROSTAT iniciaron conjuntamente en 1988 un proyecto de monitoreo agrícola con teledetección (MARS, Monitoreo de la Agricultura con Sensores Remotos), organizado por el Instituto de Aplicación Espacial del Centro Conjunto de Investigación (JRC; Joint Research Centre). El proyecto MARS fue dividido en dos fases: la

primera de 1988 a 1993, se enfocó a la coordinación e implementación de modelos de datos colectados en más de 100 institutos de 17 países, y fueron evaluados por diferentes instituciones a escala regional y en toda Europa. La segunda fase correspondió al periodo de 1993 - 1998, con el objetivo de evaluar los resultados obtenidos durante la primera fase (Andersen y Tonboe, 1999; Gallego, 1999).

Respecto a las actividades del Proyecto MARS, Andersen y Tonboe (1999) las resumieron de la siguiente manera:

a) Mediciones anti-fraude, en donde se incluye la gestión de control con programas de teledetección, así como control de calidad, pruebas y evaluación de métodos de identificación de parcelas y obtención de estadísticas de producción.

b) Obtención del rendimiento de cultivos con modelos agro-meteorológicos de baja resolución y métodos de teledetección, así como estimación de áreas empleando información de imágenes de alta resolución combinada con reconocimientos terrestres.

c) Técnicas detalladas de encuestas aplicadas a zonas de muestreo para definir políticas agrícolas rápidas y específicas.

d) Implementación de nuevas metodologías y sensores, con el desarrollo tecnológico continuo y técnicas de monitoreo de precisión para la recolección de datos a diferentes escalas.

De esta manera MARS-Stat continuamente ha desarrollado y ejecutado un sistema operativo de previsión con el fin de proporcionar oportunamente las estimaciones de producción a nivel europeo. Este sistema es capaz de observar el crecimiento vegetativo de diversos cultivos como: cereales, semillas oleaginosas, proteaginosas, remolacha, papa, pastos y arroz. Además, incluye efectos a corto plazo de fenómenos meteorológicos en la producción anual como resultado de la observación por los sensores NOAA-AVHR, SPOT-VGT, MODIS, MSG; observaciones meteorológicas (EUMETNET, *The Network of European Meteorological Service*; ECMWF, *European Centre for Medium-Range Weather Forecast*); modelos agro-meteorológicos (*Crop Growth Monitoring System*, CGMS) y análisis estadístico como herramientas del sistema (GEO, 2009).

Aunque el proyecto tuvo éxito especialmente en países desarrollados con experiencia y herramientas agrícolas, el Proyecto MARS fue evaluado en 1999 negativamente respecto a las actividades de estimación y predicción de cultivos reportados (Andersen y Tonboe, 1999). Aun así, Gallego (1999) mencionó que las imágenes de alta resolución empleadas en el proyecto

MARS podrían ser nuevamente clasificadas con ayuda de información obtenida por encuestas sobre el terreno para diferentes cultivos y tipos de coberturas y encontró una confiabilidad de productor y usuario entre 41% y 89%. Estos resultados mantuvieron la creencia de que algún día el uso de firmas espectrales emitidas por los diferentes cultivos sería suficiente para identificarlos con tasas de error insignificantes.

Así, EUROSTAT, DG-AGRI y JRC iniciaron un proyecto denominado “*Land Use/Cover Area-Frame Statical Survey*” (LUCAS) a raíz de la decisión tomada en el parlamento Europeo de aplicar los levantamientos en áreas agrícolas con técnicas de teledetección y uso de estadísticas agrícolas entre 1999 y 2003 (EUROSTAT, 2003). El estudio piloto del proyecto LUCAS se llevó a cabo en 13 de los 15 miembros de la Unión Europea durante el primer año y los dos miembros restantes se integraron hasta 2002. Las encuestas se efectuaron en dos fases: la primera, se realizó en los meses de primavera para recopilar información sobre el uso y cobertura del terreno así como del medio ambiente; y la segunda, en los meses de otoño para reunir información adicional sobre el rendimiento y técnicas agrícolas (EUROSTAT, 2003).

De esta forma, el proyecto LUCAS permitió validar la metodología por encuestas en 100,000 puntos de muestreo agrupados en 10,000 unidades aplicada de forma sistemática bajo los conceptos de agricultura, medio ambiente y paisaje rural, dando como resultado la fiabilidad de la información en toda la Unión Europea. Sin embargo, la información proporcionada en el proyecto LUCAS esta muy lejos de ser plenamente explotada, debido a las distintas frecuencias de las encuestas, por lo que se consideró llevarlas a cabo de manera regular y periódica para incrementar su potencialidad de localizar los cambios temporales (Delincé, 2001).

Jacques y Gallego (2006) indicaron que la metodología a emplear por el proyecto LUCAS a partir del 26<sup>vo</sup> seminario del Comité Consultivo Europeo de Información Estadística en el ámbito económico y social (CEIES, por sus siglas en ingles) se resume en los siguientes puntos

1) Selección de puntos maestros. Para los puntos maestros se tiene una cuadrícula de 2 km que cubre todo el territorio de la CE con 990,816 puntos geo-referenciados.

2) Foto-interpretación y estratificación. Cada punto en la maestra base es foto-interpretado y clasificado de acuerdo con 7 estratos. La foto-interpretación se basa en material reciente de orto-fotos, o en caso de que no esté disponible, en imágenes de satélite.

3) Selección de puntos en campo. La estratificación en puntos maestros genera una sub-muestra de puntos (alrededor de 250,000 puntos para el 2006) para ser clasificadas por visitas en campo y de acuerdo a la nomenclatura establecida.

4) Trabajo de campo. Durante marzo y junio, los inspectores deberán coleccionar la información sobre el terreno para generar las primeras estimaciones en países del sureste de Europa a mediados de junio y en el resto de la Unión Europea a mediados de julio.

De esa manera EUROSTAT-DG-AGRIS proporcionó en la primera fase (LUCAS, 2001 - 2003) la siguiente información (Jacques y Gallego, 2006):

- a) Una metodología común para la clasificación, obtención de datos, estimaciones de uso y cobertura del suelo;
- b) Información armonizada para todo el territorio de la Unión Europea;
- c) Información del rendimiento y superficie de cultivos potencialmente rápida;
- d) Una plataforma dedicada a estudios sobre la erosión del suelo y paisaje. o,
- e) Datos estadísticos para la aplicación de algunos indicadores que midan la preocupación ambiental en la política agrícola común.

Por consiguiente, la *metodología de segmentación* por encuestas fue la adoptada por todos los miembros de la Comunidad Europea, la cual establece la obligación de suministrar a la Oficina de Estadística EUROSTAT información anual sobre las superficies cultivadas de cereales, obtenidas por métodos estadísticos que garanticen su calidad, objetividad y fiabilidad (ESYRCE, 2008).

A manera de ejemplo, el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España bajo el proyecto ESYRCE 2007 (Encuestas sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos), determinó las superficies ocupadas de cultivos y otras cubiertas del suelo por encuestas. La metodología contempló: 1) investigación en campo de una muestra del segmento territorial, uniformemente distribuida, y con una mayor densidad en zonas de agricultura intensivo; 2) estimación por métodos estadísticos del rendimiento medio de los principales cultivos; y 3) obtención de información sobre variedades y otras características de frutales (ESYRCE, 2008). En particular, ESYRCE (2007), realizó un muestreo de 3% de la superficie total y un sub-muestreo estratificado de 6% en zonas con agricultura extensiva llegando a 15% en una agricultura intensiva. De manera que, la estimación y predicción de rendimientos se realizó en la mayor

parte de los sub-muestreos (6% y 15%); mientras que, en el muestreo general (3%) sólo se estimó a una tercera parte de lo muestreado.

### *1.5. Estadísticas agrícolas en México*

Tortolero (1998) reportó que fue hasta 1882 cuando los gobernantes crearon el catastro de propiedad urbana, rústica, minera y fue cuando se realizó por primera vez un censo. Sin embargo, no fue hasta la crisis de 1907, cuando el interés de los gobernantes se enfocó hacia la agricultura, pensando que la información de las estadísticas posibilitaría la planeación y estabilización de cosechas. Aunque, la consideraban sólo como una sencilla tarea de habilidad administrativa y no como una gran obra de organización (Estadísticas Agrícolas, 1910). Sin embargo, una vez más este intento aparecería demasiado tarde, ya que meses después se iniciaría la rebelión que derrocaría al régimen porfirista y postergaría la “sencilla tarea” de este trabajo.

La primera estadística agrícola se realizó hasta el censo agropecuario de 1930 con el objeto de conocer el estado en que se encontraba la agricultura nacional, para que el gobierno ya con datos precisos, pudiera orientar sus actividades e impulsar el ramo. A partir de entonces, cada 10 años se efectuaría un censo. Fue hasta 1970 cuando se planteó obtener información que permitiera conocer mejor los factores sociales y económicos que constituían la estructura agrícola del país (Ceja, 1983). A pesar de la buena intención, trascurrieron 20 años sin información agropecuaria nacional, con déficit y graves consecuencias para el país ya que el proceso de 1980 falló al no cubrir los requisitos técnicos y hasta 1991 y 2001 los censos agropecuarios se renovaron (Huicochea, 2002).

Con el interés de crear una estadística nacional acorde con los requerimientos del país, en 1997 se realizaron los primeros trabajos con teledetección como herramienta en la predicción y estimación de rendimientos de maíz, en una superficie de 15,840 has en el estado de Guanajuato. Con una confiabilidad de 61.1%, fue valorada la posibilidad de anticipar la predicción, sitios de ocurrencia y rendimiento desde la floración (Soria et al., 2000). Simultáneamente, Flores-López y Scott (2000) estimaron la superficie agrícola con imágenes de satélite (Landsat TM) en el ciclo agrícola 1998/1999, el cual fue cotejado con datos reportados en los Distritos de Desarrollo Rural en Guanajuato para los cultivos de: trigo/cebada, lentejas, fríjol, maíz y alfalfa, entre otros. Sin embargo, los resultados obtenidos mostraron la sobreestimación de la superficie agrícola en 62% y una sobreestimación total para el estado de Guanajuato de 78%.

Para la estimación y predicción de los rendimientos agrícolas se han estado utilizando diferentes metodologías de teledetección, Báez-González et al. (2002) utilizaron imágenes de satélite (AVHRR), datos de campo, productividad primaria neta (NPP), índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) y la radiación foto-sintéticamente activa (PAR), obteniendo una confiabilidad del modelo de 89% en tierras con irrigación y una confiabilidad de 76% en tierras de temporal. Por su parte, Lobell et al. (2003) aplicaron la fracción de radiación absorbida fotosintéticamente activa (fAPAR), y reportaron que la superficie cotejada con datos de campo registró diferencias entre 3 y 5% para el cultivo de trigo, contrariamente a la obtenida en cultivo de maíz que varió de 42 a 66%. Finalmente, Soria et al. (2004) utilizaron imágenes de satélite (NOAA-AVHRR) bajo el método de análisis multi-temporal e índices de vegetación normalizados (NDVI) y encontraron una sobreestimación del rendimiento de 9.6%.

Por otra parte, el gobierno de México, a través de la Secretaría de Marina (SEMAR), realizó un convenio con Spot Image que dio origen a la Estación de Recepción México de la Constelación SPOT (ERMEXS), el cual, junto con la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) concretaron el proyecto “*Programa Nacional de Estimación de Superficie, Producción y Rendimiento*” (PRONESPRES, 2004). Coordinados por la Subsecretaría de Agricultura se realizó un esfuerzo interinstitucional entre ASERCA (Apoyos y Servicios a la Comercialización Agropecuaria), INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias) y SIAP (Servicio de Información y Estadística Agroalimentario y Pesquero), y constituyeron un Grupo Colegiado con la finalidad de estimar la superficie y los rendimientos en los principales cultivos para generar estadísticas agrícolas anuales. El Grupo Colegiado fue apoyado por personal especializado de la Escuela Superior de Agricultura de Purgan, Francia, y emplearon la metodología utilizada por la Comunidad Europea, adecuándola a las condiciones propias de la República Mexicana (Pieyrot y De la Sierra, 2007).

El proyecto inició en 6 estados, durante 2004, se incrementó a 14 en el ciclo de primavera y a 8 en el ciclo de invierno en 2005. Posteriormente, pasó a 17 en el ciclo de primavera y se mantuvo en 8 en el ciclo de invierno en 2006. Sin embargo, a pesar de la conjunción institucionalidad en el proyecto PRONESPRES sólo funcionó ampliamente durante tres años agrícolas (PRONESPRES, 2008).

Por otro lado, el censo agropecuario y forestal en 2007 fue llevado a cabo por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) con dos propósitos fundamentales:

1. Captar información estructural del sector agropecuario y forestal, e información básica de las características económicas y tecnológicas de las unidades de producción, sin importar el tipo de propiedad; y

2. Generar el directorio nacional de productores agropecuarios y forestales asociados al inventario de terrenos, a fin de disponer del marco de referencia que permitiera apoyar el desarrollo de encuestas e investigaciones sobre el sector.

Por tal motivo, la ejecución del censo agropecuario y forestal, 2007 se dividió en dos etapas de operación:

1. La enumeración de terrenos, el cual consiste en la identificación de productores agropecuarios y forestales, así como la ubicación geográfica de sus terrenos sobre material cartográfico, para constituir el marco de referencia; y

2. El levantamiento de información, cuyo propósito es aplicar cuestionarios a los productores agropecuarios mediante entrevistas directas, a través de recorridos completos en localidades con menos de 9,000 habitantes (en las que se ubican alrededor de 90% de los productores agropecuarios), así como de visitas domiciliarias dirigidas en el resto de las localidades.

El esfuerzo de instituciones de gobierno como de centros de investigación se han basado en establecer metodologías que ayuden a estimar y predecir la superficie agrícola y su rendimiento en cultivos de interés nacional. Sin embargo, el uso del padrón de usuarios, la ubicación de parcelas agrícolas así como los levantamientos de datos (cobertura y uso de suelo) no ha sido aplicado a nivel distrital, estatal o nacional como una herramienta en la estimación de estadística agrícola nacional.

Por lo anterior en este trabajo de investigación se plantearon las siguientes hipótesis:

- a. Las técnicas de clasificación supervisada en imágenes de satélite de baja y alta resolución proporcionan estadísticas agrícolas anuales consecutivamente confiables para los cultivos establecidos en el Distrito de Riego 026; y

- b. El muestreo directo sobre el padrón de usuario es la técnica que estima las estadísticas agrícolas anuales con mayor precisión y continuidad comparada contra la clasificación supervisada de imágenes de satélite para el área de estudio del mismo ciclo.

Los objetivos de la presente investigación fueron:

- a. Evaluar el uso de la percepción remota con la elaboración de la cartografía temática proveniente de imágenes de satélite, para obtener estadísticas agrícolas para los cultivos de interés dentro de la Tercera Unidad de Asistencia Técnica del Distrito de Riego No. 026.
- b. Implementar y evaluar el muestreo directo parcelario en campo sobre el padrón de parcelas agrícolas dentro de la Tercera Unidad de Asistencia Técnica del Distrito de Riego 026 como alternativa en la obtención de las estadísticas agrícolas en cultivos de interés.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1. Descripción del área de estudio

El área de estudio se localiza en el Distrito de Riego 026 (DR-026) del Bajo Río San Juan, dentro de la Tercera Unidad de Asistencia Técnica (TUAT), entre las coordenadas geográficas 26° 01' 26" y 25° 44' 39" Latitud Norte y 98° 13' 26" y 98° 02' 57" Longitud Oeste; con una altitud promedio de 34 m.

La TUAT se localiza en la región fisiográfica de la Gran Planicie Costera del Noreste de la República Mexicana, en los municipios de Reynosa y Río Bravo (Fig. 1). El clima según Köppen es semiárido con temperatura media anual de 18 °C (BSh) (INEGI, 1995); la evaporación es en promedio de 2011 mm anuales, en tanto que la evapotranspiración de referencia promedio es de 1756 mm y la precipitación de 570 mm (Rymshaw, 1998).

Los principales cultivos bajo riego son maíz y sorgo que cubren una superficie mayor de 90%. El patrón de cultivo (maíz, sorgo) varía en cada ciclo agrícola dependiendo del nivel de almacenamiento y disponibilidad de agua de la presa derivadora Marte R. Gómez, y de los precios de los productos agrícolas en el mercado nacional e internacional. Además, se tienen otros cultivos de menor cobertura como pastizal inducido, hortalizas y cítricos que cubren la superficie agrícola restante. Los terrenos de la TUAT son irrigados por el método de surcos, conducidos por una red o sistema de canales principales y parcelarios en todo el Distrito de Riego.

Se compararon dos procedimientos para generar la estimación de estadísticas agrícolas anuales en la zona de estudio; el primero, consistió en reportes agrícolas de la Tercera Unidad de Asistencia Técnica del DR-026 para tres ciclos agrícolas, mientras que el segundo, fueron

estimados mediante la clasificación supervisada de imágenes de baja y alta resolución (Modis, Spot), ambos procedimientos se describen a continuación.

## *2.2. Base de datos del padrón agrícola*

La base de datos desarrollada para la TUAT fue obtenida durante los ciclos agrícolas de 1994 hasta 2006; corresponde a una superficie agrícola de riego de 29,761 ha distribuida en 1,600 parcelas. Para garantizar la confiabilidad de los datos se cotejaron con otros registros como:

Información obtenida por encuesta directa al productor a inicio de cada ciclo agrícola por personal técnico en módulos de usuarios ó de asistencia técnica documentándose en el padrón de usuarios. Los datos adquiridos hacen referencia al cultivo, variedad y superficie cultivada en las parcelas.

Información cotejada en campo por personal de apoyo o jefe de compuertas informando cualquier anomalía en los datos, otorgando una distribución equitativa del recurso hídrico a todos los miembros del Distrito de Riego.

Información reportada (cultivo establecido) por las oficinas regionales de SAGARPA, que emiten un resolutivo por usuario para entregar el apoyo económico otorgado por el gobierno federal bajo el programa denominado PROCAMPO (Programa de Apoyos Directos al Campo).

Por último, venta de cosecha a precio de garantía. Los productores de la TUAT del Distrito de Riego venden sus productos a precio cotizado en la bolsa de valores de Chicago. Para ello, la información vertida a los módulos de asistencia es fundamental en la planeación del requerimiento hídrico específico del cultivo.

Además, los datos colectados por el personal técnico en el padrón de usuarios también fueron evaluado en primer instancia por Gutiérrez-Castorena et al. (2008), y depurados para la presente investigación con los siguientes criterios de selección:

Primero se seleccionó los ciclos agrícolas 2004, 2005 y 2006 con base en la disponibilidad de imágenes de satélite Spot proporcionada por ERMEXS-SAGARPA-INIFAP, e imágenes Modis por CONABIO, con interés de comparar la estadística agrícola anual obtenida en el padrón de usuario contra la cartografía temática derivada de la clasificación de imágenes de satélite (Modis, Spot).

Para los ciclos agrícolas en estudio, las parcelas agrícolas se registraron, ubicaron e identificaron en la base de datos del padrón de usuarios bajo el Sistema de Información Geográfico del DR-026.

a) La base de datos del padrón de usuarios debe contar con información detallada del tipo de cultivos establecidos en la parcela agrícola durante los tres ciclos agrícolas de estudio.

b) Y por último fueron excluidas, las parcelas agrícolas que estén subdivididas físicamente o con diversificación de cultivos durante cualquier ciclo agrícola de estudio y que no estén reportadas y ubicadas plenamente por el Sistema de Información Geográfico.

De esta manera, la superficie agrícola del padrón de usuarios resultante se redujo a 16,925 ha distribuidas en 635 parcelas que variaron entre 5 y 98 ha. Con esta información, se seleccionaron parcelas de muestreo y parcelas de comprobación empleadas para la clasificación de imágenes bajo los siguientes criterios: (i) muestreo aleatorio simple; (ii) superficies mayores de 40 ha en parcelas de muestreo y sin tamaño específico en parcelas de comprobación; y (iii) sin presencia de nubes o bruma que obstruyera la obtención de huellas espectrales con Números Digitales entre 0 y 255, representando los valores de radiancia de los elementos terrestres, incluidos los diferentes cultivos establecidos en el Distrito de Riego.

La cobertura vegetal establecida en las parcelas de muestreo fue asignada a una clase específica por la siguiente nomenclatura; como clases de interés al *maíz* y al *sorgo*, y de menor interés a las clases otros cultivos (*oc*) que considera al algodón, pastizales y cítricos, y a la clase suelo desnudo (*sd*).

### *2.3. Imágenes de satélite*

Se empleó la secuencia en imágenes de satélite de baja y alta resolución (Modis y Spot) para analizar y cubrir las diferentes etapas fenológicas en las clases propuestas en la nomenclatura de cobertura correspondientes a los meses de abril, mayo y junio (etapas de desarrollo, inicio de floración y madurez fisiológica) durante los ciclos agrícolas 2004, 2005 y 2006. Se utilizaron un total de nueve imágenes Spot proporcionadas por la Estación de Recepción México de la Constelación Spot (ERMEXS) bajo el convenio ERMEXS-SAGARPA-INIFAP y nueve imágenes de Modis proporcionadas por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (Cuadro 1).

## 2.4. Estadísticas agrícolas

Para comparar las metodologías propuestas en la investigación, se evitó consultar las estadísticas de cada parcela sobre la base de datos hasta no finalizar la estimación de la estadística por los diferentes métodos. Se consultó únicamente el número de lote asignado a cada parcela, las cuales fueron seleccionadas aleatoriamente en cada análisis. La finalidad fue comparar la estimación de estadísticas agrícolas del padrón contra la estimación por muestreo directo y por la clasificación supervisada de imágenes, los cuales se describen a continuación:

1. Método por Muestreo Directo de Parcelas (MDP): Se efectuaron cuatro muestreos aleatorios simples al padrón total del área de estudio para cada ciclo agrícola, con la finalidad de obtener estadísticas a diferentes niveles de muestreo. Los muestreos fueron identificados como: MDP<sub>25</sub>; MDP<sub>50</sub>; MDP<sub>75</sub>; y MDP<sub>100</sub>, donde los subíndices representan la selección al azar de 25, 50, 75 y 100 parcelas de la base de datos durante el ciclo estudiado. La cubierta vegetativa fue clasificada dentro de una de las cuatro clases asignada por la nomenclatura. Con esto se estimó el porcentaje del área total ocupada por cada clase para los diferentes tamaños de muestra.

Por último, la forma de estimar la estadística agrícola anual por muestreo directo parcelario en campo fue suponer que el muestreo sobre el padrón representaba a las visitas directas a campo manteniendo una relación de las parcelas asignadas por clase con su proporcionalidad a la superficie real. Asimismo, se estableció el tamaño de muestreo más idóneo para estimar la estadística agrícola anual que registrara continuamente la mayor precisión absoluta (inverso al error absoluto) durante los tres ciclos en estudio.

2. Método por percepción remota (MPR): Se emplearon los software ERDAS v9.1 y ArcGis v9.2. e imágenes de satélite de baja y alta resolución (Modis y Spot) con el objeto de obtener la cartografía temática de cada imagen: La estimación de la superficie agrícola para cada una de las cuatro clases de la nomenclatura de cobertura empleada fue con base en los siguientes procedimientos:

i) Geo-referencia de imágenes satelitales;

ii) Ubicación y descripción de parcelas de entrenamiento, seleccionadas por un muestreo aleatorio simple de 100 parcelas sobre la base de datos del padrón de usuario de la TUAT en cada ciclo agrícola.

Las parcelas de entrenamiento de la superficie empadronada y número de parcelas en cada clase fue: para el ciclo 2004, una superficie seleccionada de 3,656 ha (21% del total evaluada en

56 parcelas), de las cuales corresponden a la clase *maíz* 22 parcelas con 1,584 ha y a la clase *sorgo* 34 parcelas en 2,072 ha. Durante el ciclo 2005, la superficie seleccionada de entrenamiento fue de 3,553 ha (21% distribuidas en 56 parcelas), de las cuales, 33 parcelas se ubicaron en la clase *maíz* correspondiente a una superficie de 2,128 ha y 23 parcelas a la clase *sorgo* equivalente a 1,425 ha; y por último, en el ciclo 2006, la superficie seleccionada como parcelas de entrenamiento fue de 4,064 ha (24% distribuidas en 62 parcelas), de las cuales 40 se asignaron a la clase *maíz* en una superficie de 2,593 ha y 21 parcelas a la clase *sorgo* cubriendo una superficie de 1,471 ha.

i) Depuración de las parcelas de entrenamiento: se eliminaron aquellas con separabilidad de sus firmas espectrales menor de 90% en imágenes Modis y de 99% en imágenes Spot. Se utilizó el método de Jefferies-Matusita descrito por Swain et al. (1978).

ii) Clasificación supervisada de imágenes Spot y Modis con el clasificador de máxima verisimilitud, obteniendo como producto una cartografía temática de cada imagen.

iii) Estimación de las estadísticas agrícolas a partir de la cartografía temática obtenida por la clasificación de imágenes de cada ciclo y sus respectivas evaluaciones cartográficas.

iv) Conteo de los píxeles asignándolos a cada clase de la cartografía, los cuales fueron multiplicados por la superficie que cubre el píxel. De este modo se obtuvo la superficie para cada clase, así como la estimación de la superficie agrícola total, y por consiguiente la estadística agrícola anual de cada ciclo.

## *2.5. Precisión en la estimación de la estadística agrícola*

Para determinar la precisión de la estimación en el muestreo directo en parcelas, se realizó el cotejo de la estadística agrícola estimada contra la estadística agrícola generada en el registro de la base de datos del padrón de usuarios. El valor obtenido en la comparación fue denominado como precisión absoluta (complemento del error absoluto obtenido de la diferencia entre la superficie estimada y la superficie registrada en el padrón), para cada una de las clases asignadas.

La cartografía temática derivada de la clasificación de imágenes (Modis, Spot) fue evaluada por tablas de confusión, cuyo procedimiento es descrito por Stehman y Czaplewski, (1998) (Cuadro 2), para cada ciclo agrícola y bajo polígonos de verificación. La evaluación de la confiabilidad temática consistió en comparar la información de cada clase de dicha cartografía contra la información de referencia (estadística agrícola registrada en la base de datos del padrón

de usuarios en la TUAT). Para ello, se usó como unidad de verificación 100 polígonos cuadrangulares de una hectárea de superficie seleccionada por un muestreo aleatorio sobre la base de datos del padrón, donde cada polígono contiene información de su nomenclatura, asignación espacial, ubicándose al centro de la parcela que representa.

Posteriormente, se confrontó los polígonos sobreponiéndolos en la cartografía del mismo ciclo; de esta manera se comparó la clase registrada en el polígono contra la asignada por la clasificación empleando una tabla de confusión. Las columnas representan la información de las clases de referencia (base de datos) y las filas las clases de la cartografía. La diagonal de la matriz enumera el número de polígonos de verificación correctamente asignados lo que expresa la confiabilidad global del mapa, y los marginales indican los errores de asignación.

### *3. Resultados*

#### *3.1. Estadísticas agrícolas registradas en el padrón de usuarios*

La superficie agrícola reportada para cada clase en el ciclo agrícolas 2004 fue: *maíz* con 36.4%; *sorgo* con 56.6%; otros cultivos *oc* con 4.8%, y suelo desnudo *sd* con 2.2%; para el ciclo 2005 resultó: *maíz* con 54%, *sorgo* con 32%, *oc* con 13%, y *sd* con 1%; y en el ciclo 2006 se tuvo: *maíz* con 57%, *sorgo* con 34%, *oc* con 5%, y *sd* con 4%. La superficie agrícola por clase se muestra en el Cuadro 3 y la distribución, ubicación, tamaño de las parcelas en la Figura 2.

#### *3.2. Estadísticas agrícolas en muestreo directo de parcelas*

La estadística agrícola estimada en los ciclos 2004, 2005 y 2006 por el muestreo directo de parcelas y cotejada con el padrón, registró valores de precisión absoluto de 70.8%, 80.0% y 78.2% en el MDP<sub>25</sub>; de 77.2%, 92.4% y 91.4% en el MDP<sub>50</sub>; de 93.2%, 91.1% y 96.3% en el MDP<sub>75</sub>; y de 88.8%, 90.4% y 89.6% en el MDP<sub>100</sub>, respectivamente (Cuadro 4).

#### *3.3. Estadísticas agrícolas estimadas por percepción remota*

##### *3.3.1. Parcelas de entrenamiento*

La separabilidad en huellas DNS obtenida sobre las parcelas de entrenamiento en cada imagen analizada, provocó que 12 imágenes fueran descartadas por presentar poca o nula separabilidad entre huellas; mientras que en las imágenes restantes (6), el análisis visual generó una nueva clase (Nubosidad-sombra, “*Ns*”) provocada por la presencia de nubes; además, fue necesario unir las clases *oc* y *sd* por ser de menor inter renombrándose como “*Oc-sd*”. En el

Cuadro 5 se reportan las imágenes de Spot y Modis resultantes que fueron empleadas como marco para generar la cartografía temática, y en la Figura 3 se muestran los dispersogramas con las huellas espectrales en DN<sub>s</sub> por clase evaluada.

### 3.3.2. Estimación de la superficie agrícola sobre la cartografía temática

La superficie agrícola estimada en la cartografía temática generada por la clasificación supervisada de imágenes Spot para las clases de cubierta establecidas en el área de estudio fue: durante el ciclo 2004: *maíz*, 30.2%; *sorgo*, 39.0%; *Oc-sd*, 2.0%; y *Ns*, 28.8%; en 2005: *maíz*, 30.1%; *sorgo*, 25.2%; *Oc-sd*, 4.8%; y *Ns*, 39.9%; y en 2006: *maíz*, 64.0%; *sorgo*, 24.3%; *Oc-sd*, 8.5%; y *Ns*, 3.2%.

En el caso de la superficie estimada en la cartografía generada por imágenes Modis fueron en 2004: *maíz*, 16.2%; *sorgo*, 55.2%; *Oc-sd*, 5.2%; y *Ns*, 23.4%; en 2005: *maíz*, 43.8%; *sorgo*, 46.9%; *Oc-sd*, 8.0%; y *Ns*, 1.2%; y en 2006: *maíz*, 35.3%; *sorgo*, 46.7%; *Oc-sd*, 10.9%; y *Ns*, 7.1% (Cuadro 6).

Al cotejar la superficie agrícola estimada por clase en la cartografía de imágenes Spot contra la superficie reportada en el padrón de usuario, se obtuvo una precisión absoluta de 42.4%, 20.2% y 80.1% para los ciclos 2004, 2005 y 2006 respectivamente; mientras que en la cartografía por imágenes Modis, las precisiones absoluta fue de 53.2%, 68.1% y 55.6% respectivamente, debido principalmente a problemas de nubosidad (factor atmosférico) este aspecto Modis resulta con mayores ventajas debido a que por su frecuencia se pueden seleccionar imágenes con menor nubosidad. Sin embargo, al comparar las superficies agrícolas estimadas tanto en Modis con Spot, la primera sobreestima el 25.7% mientras que la segunda solo en 5.7% (Figura 4).

### 3.3.3. Evaluación y precisión de la cartografía

*Cartografía temática de imágenes Spot.* En ciclo 2004, con 100 puntos de verificación, 78 puntos corresponden a una de las clase de cubierta (12,844 ha) y 22 puntos a la clase Ns (5,119 ha) que no fueron clasificadas a una de las clases de cobertura del terreno. La confiabilidad global de la cartografía temática de imagen Spot calculada para los 78 puntos fue de 69% con un error de comisión mayor al de omisión para las clases de maíz y sorgo (Cuadro 7).

En ciclo 2005, 73 puntos fueron clasificados en una de las clases de cubierta (10,852 ha), mientras que 27 puntos fueron asignados a la clase Ns (7,142 ha) que impidió la clasificación de

la superficie. La confiabilidad global de la cartografía temática de imagen Spot del ciclo fue de 64% y el error de comisión fue mayor al de omisión para las clases de maíz y sorgo (Cuadro 8).

En ciclo 2006, 99 puntos fueron clasificados en una de las clases de cubierta (16,444 ha); mientras que sólo un punto corresponde a la clase Ns (569 ha) que no fueron clasificadas a una de las clases de cobertura. La confiabilidad global de la cartografía de imagen Spot fue de 84%, que al igual de los otros ciclos el error de comisión fue mayor al de omisión (Cuadro 9).

*Cartografía temática de imágenes Modis.* La confiabilidad global obtenida en la cartografía temática de imágenes de satélite Modis para los ciclos agrícolas 2004, 2005 y 2006 fueron de 46%, 50% y 49% respectivamente. Las confiabilidades del usuario como del productor se presentan en el Cuadro 10.

La cartografía de imágenes de Spot presentó mayores áreas cubiertas por nubes que las de Modis, tal como se muestran en la cartografía temática expresadas en la Figura 4 y corroborada con los puntos de verificación sobre la misma cartografía; en contraste, la confiabilidad global, la del productor y la del usuario fueron mayores.

Respecto a la evaluación por índice kappa en la cartografía de Spot y Modis durante los ciclos 2004, 2005 y 2006 fueron de 28%, 23% y 41%; y 7% 16% y 15% para imagen y ciclo agrícola respectivamente. Estos valores porcentuales expresan que datos, fuera de la diagonal de la matriz, pueden mejorar la confiabilidad global por tomar en cuenta el factor del azar en el muestreo.

#### 4. Discusión

Los factores de nubosidad y sombra en la zona de estudio constituyeron una limitante en la aplicación de técnicas de percepción remota, sobre todo en el caso de Spot a nivel regional, tal como lo mencionaron Hanuschal et al. (1979) sobre las primeras investigaciones realizadas con imágenes “Landsat”. La estimación de estadísticas agrícolas anuales por percepción remota están limitadas por la nubosidad, al no poder clasificar la cobertura del suelo en una de las clases de cultivo, debido a que la fecha de siembra y ciclo vegetativo del Distrito coincide en los meses de mayor probabilidad de lluvias.

Los índices de confiabilidad global, usuario y productor a partir de matrices de confusión obtenidos en el presente trabajo se encuentran entre los rangos reportados por otros autores a nivel nacional (Soria et al., 1998; Flores y Scott, 2000; Báez-González et al., 2002; Lobell et al.,

2003; Soria et al., 2004) e internacional (Gallego, 1999). Sin embargo, estos resultados deben de ser tomados con precaución, ya que la precisión absoluta obtenida durante los ciclos en estudio tuvo un rango de amplitud entre 20% a 80%. Las superficies estimadas en las clases de cobertura por técnicas de percepción remota contra las registradas en el padrón, muestran la incertidumbre que genera el uso imágenes de satélite para cada ciclo agrícola estimado.

Esto significa que las condiciones meteorológicas de la zona noreste del estado de Tamaulipas impiden el uso de imágenes de satélite como herramienta para la estimación y proyección de estadísticas agrícolas anuales en los Distritos de Riego. “En general, la clasificación o foto-interpretación de imágenes de satélite no deben ser directamente utilizados para estimar las áreas de los cultivos, debido a que la proporción de píxeles clasificados en una clase de cultivo es a menudo sesgada” (Carfagna y Gallego, 2005). Sin embargo, pueden ser empleadas para optimizar la asignación de la muestra así como el tamaño de las unidades de muestreo en los distritos.

La integración de técnicas de levantamientos sobre el marco de encuestas directas registró una precisión absoluta mayor de 91% en las estimaciones de la superficie cultivada anualmente para cada clase de cobertura durante los tres ciclos agrícolas en estudio. Estos resultados concuerdan con los reportados con Gallego y Bamps (2008), quienes obtuvieron una mayor precisión (por muestreo sistemático) con el marco de encuestas sobre el uso y cubierta de suelos.

Es necesario continuar con investigaciones en donde se apliquen los levantamientos sobre los marcos de encuestas directos en campo sobre el padrón de usuario y parcelario a partir del censo agrícola nacional INEGI (2007). Se propone que se integre tanto la estimación de estadísticas por muestreo directo y técnicas de percepción remota, y se establezca los momentos más oportunos para realizar los levantamientos de datos a nivel estatal y nacional.

## 5. Conclusiones

Los datos registrados en el padrón de usuario a partir de encuestas directas a productores de la TUAT por personal técnico presentan parámetros de seguridad (disponibilidad y distribución equitativa del recurso hídrico, inscripción a subsidios del gobierno federal por tipo de cultivo y la venta de cosecha a precio de garantía) que garantiza la confiabilidad de la información analizada. Con estas medidas, fue posible comparar las diversas metodologías para la estimación de estadísticas agrícolas anuales en el área de estudio.

La estimación de estadísticas agrícolas anuales en el DR-026 para los cultivos de interés (maíz, sorgo) utilizando sólo técnicas de percepción remota en imágenes de baja y alta resolución (Modis y Spot) no garantiza la confiabilidad de la información debido a la amplitud de la precisión en la estimación de la superficie agrícola cultivada anualmente.

El muestreo directo de 75 parcelas sobre el padrón de usuario obtuvo una precisión global mayor de 91% durante los tres ciclos agrícolas de estudio, lo que significa que esta intensidad de muestreo fue constante y cercana a la reportada por los agricultores en el padrón de usuarios de la TUAT del DR-026 lo que avala la confiabilidad de la información generada anualmente.

### Literature citada

- Andersen, H. S. and Tonboe, R. T., 1999. The operational continuation of the project monitoring agriculture with remote sensing (MARS) - Should DMI be involved? Danish Meteorological Institute. Technical Report 99-27.
- Allen, R., 2007. Crop Reporter. Safeguarding America's Agricultural Statistics. A century of successful and secure procedures, 1905-2005. U.S. Department of Agriculture. National Agricultural Statistics Service.
- Bascou, P., 2004. Agricultural statistics and the Common Agricultural Policy. Reflections on the future needs for agricultural information for the CAP. 26<sup>th</sup> CEIES seminar European agricultural statistics – Europe first or Europe only?. EUROSTAT new, Brussels.
- Bauer, M.E., Cipra, J.E., Anuta, P.E. and Etheridge, J.B., 1979. Identification and area estimation of agricultural crop by computer classification of Landsat MSS data. *Remote Sensing of Environments* 8:77-92.
- Boissezon, H. de and Sharman, M., 1993. Rapid estimates of crop production using remote sensing: European Experience. Sotema 2. Joint Research Centre, Ispra Establishment. Italy.
- Calvo-Coin, O., 2000. Sistemas de indicadores sociales: una aproximación epistemológica. *Revista de Ciencias Sociales*. Access my Library. Consultado en el portal [http://www.accessmylibrary.com/coms2/summary\\_0286-2549805\\_ITM](http://www.accessmylibrary.com/coms2/summary_0286-2549805_ITM) el día 11 de Marzo de 2009.
- Carfagna, E. and Gallego, F.J., 2005. Using remote sensing in agricultural statistics. *International Statistical Review*. 73 (3), 389-404.
- Caudill, C.E., 1984. Aerospace Remote Sensing for Domestic Crop Area Estimation by the United State Department of Agriculture. Consultado en el portal [http://www.nass.usda.gov/research/reports/Internet\\_GIS/](http://www.nass.usda.gov/research/reports/Internet_GIS/) el día 11 de Noviembre de 2008.
- Ceja, H., 1983. Diseño conceptual de los censos agropecuarios 1930 – 1970. Diseño conceptual y métodos de captación de datos de los censos agrícola, ganadero y ejidal de 1930 a 1979. Capítulo II, pag 27 – 31.

- Delincé, J., 2001. A European approach to area frame Survey. Proceedings of the Conference on Agricultural and Environmental Statistical Application in Rome (CAESAR), June 5-7, Vol. 2, pp. XXV.1-10.
- Estadística Agrícola., 1910. Imprenta y Fototipia de la Secretaria de fomento. Callejón de Betlemitas. 8. México.
- ESYRCE, 2008. Encuestas sobre superficies y rendimientos de cultivos del año 2007. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Dirección general de planeación economía y coordinación institucional. Subdirección general de estadísticas agroalimentarias. Madrid.
- EUROSTAT, 2001. Crop production: manual for current statistics. Methods and Nomenclatures. European Commission, Agriculture and Fisheries. Luxemburg.
- EUROSTAT, 2003. The LUCAS survey. European statisticians monitor territory. Working papers and Studies. European Commission. Theme 5, Agriculture and fisheries. Luxembourg.
- FAO, 1982. Estadística Agrícola: Estimación de las superficies y del rendimiento de los cultivos. Estudio FAO: desarrollo económico y social. 22. Organización de las naciones unidas para la agricultura y su alimentación. Roma, 1982.
- Flores-López, F.J. y Christopher, A.S., 2000. Superficie Agrícola estimada mediante análisis de imágenes de satélite en Guanajuato, México. IWMI, Serie Latinoamericana: No. 15.
- Gallego, F. J., 1999. Crop Area Estimation in the MARS Project. Conference on ten years of the MARS Project, Brussels. Agriculture and regional information systems space applications institute. JRC, tp. 262/21020 Ispra (Va), Italy
- Gallego, J. and Bamps, C., 2008. Using CORINE land cover and the point survey LUCAS for area estimation. *International Journal of applied Earth observation and geoinformation*. 10: 467-475.
- GEO, 2009. Group on Earth Observation. Agriculture Community of Practice. Pagina consultada en el portal [http://www.geosec.org/cop\\_ag\\_gams\\_pp.shtml](http://www.geosec.org/cop_ag_gams_pp.shtml) el día 22 de Enero de 2009.
- Gutiérrez-Castorena, E.V., Ortiz-Solorio, C.A., Gutiérrez-Castorena, Ma. Del C., Cajuste-Bontemps, L., Rocha-Aguilar, M., 2008., Technical, economical and social actions of farmers to mitigate water deficit in Tamaulipas, Mexico. *Agricultural, Ecosystems and Environment*. 128. (1-2) 77-85.
- Hale, R., 1999. Appropriate role of remote sensing in U.S. agricultural statistics. FAO regional project, Improvement of Agricultural Statistics in Asia and pacific countries (GCP/RAS/171/JPN), seminar on remote sensing for agricultural statistics. Bangkok, Thailand.
- Hanuschak, G.A., 1992. Remote Sensing Program of the national agricultural statistics service: from a Management perspective. European Community's Eurostat and Agriculture Conference on "the Impact of Remote Sensing on the European Statistical Information System", Bad Neuenahr, Germany, Sept. 1992.
- Hanuschak, G., Sigman, R., Craig, M., Ozga, M., Lubbe, R., Cook, P., Kleweno, D. and Miller, C., 1979. Obtaining timely crop area estimates using ground gathered and Landsat data. Economics, Statistics, and Cooperatives Service. USDA. Technical Bulletin No. 1609.

- Huddleston, H.F. and Russell, R., 1979. Agricultural and resource assessment in Jamaica using an area sampling frame. U.S. Department of Agriculture Washington, D.C. Jamaica Ministry of Agriculture Kingston, Jamaica.
- Huicochea, V. H., 2002. Comisión de agricultura y ganadería, Presupuesto de Egreso 2002. Partida Presupuestal INEGI para realizar el censo agropecuario.
- INEGI., 1995. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Síntesis Geográfica y estadística de Tamaulipas, Tamaulipas, México.
- INEGI, 2007. Censo agropecuario 2007. Comunicado No. 034/07. Aguascalientes, Aguascalientes. pp. 1-2.
- Jacques, P. and Gallego, J., 2006. The LUCAS 2006 project – A new methodology. EUROSTAT Unit E1: Agriculture Statistics – Methodology. JRC – ISPRA – MIPSC/AGRIFISH unit.
- Lobell, D.B., P.A. Gregory, J.I. Ortiz' Monasterio, T.L. Benning., 2003. Remote sensing of regional crop production in the Yaqui Valley, Mexico: estimates and uncertainties. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 94, 205-220.
- Mass, J. F., Diaz-Gallegos, J. R. and Vega, A. P. 2003. Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: Una revisión. *Investigaciones Geográficas. Boletín Del Instituto de Geografía, UNAM. No 51, pp. 53-72.*
- Muller, R., Wade, G. and Cook, P., 1995. Agricultural Statistics Board AVHRR GIS Product Development. USDA/NASS, Remote Sensing Section. 3251 Old Lee Hwy, Rm 305 Fairfax, Va 22030.
- Monreal, S.A., 2008. Programa Nacional Alimentario Perspectivas del Poder Legislativo. Secretaria de la Comisión de Presupuesto y Cuenta Pública. Integrante de la Comisión de Agricultura y Ganadería de la H. Cámara de Diputados.
- NASS, 2006. The Yield forecasting program of NASS, by the Statistical Methods Branch, Estimates Division, National Agricultural Statistics Service, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., NASS Staff Report No. SMB 06-01.
- Pieyrot, R. y De la Sierra, M., 2004. Programa Nacional de Estimación de Superficie, Producción y Rendimiento, PRONESPRES. Dirección General de Sistemas de Información para la Operación de Apoyos.
- PRONESPRES, 2008. Programa Nacional de Estimación de Superficie, Producción y Rendimientos 2003-2006. SAGARPA-ASERCA-INIFAP-SIAP. Portal consultado en [http://www.aserca.gob.mx/artman/publish/article\\_722.asp](http://www.aserca.gob.mx/artman/publish/article_722.asp) el 17 de septiembre de 2008.
- Rymshaw, E., 1998. Análisis del desempeño de la irrigación en los distritos de riego Bajo Río Bravo y Bajo Río San Juan, Tamaulipas, México. *IWMI. Serie Latinoamericana 1, 1-45.*
- SAGARPA-SIAP, 2003. Pronósticos de producción de cultivos agrícolas. Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera. Consultado en el portal <http://www.siap.sagarpa.gob.mx/snidruss/aguascalientes/proprodedo.pdf> el día 30 de junio de 2009.
- Sherburne f. C. and Woodrow B., 1980. Ensayos sobre historia de la población III. México y California. Siglo veintiuno. Colegio América Nuestra. pág. 284.

- Swain, P.H. and Shirey, M.D., 1978. Remote sensing: The Quantitative Approach. McGraw-Hill Internacional Book Company.
- Soria, R.J., C. Ortiz S., F. Islas G. y V. Volke H. 2000. Sitios de ocurrencia y predicción de rendimientos de maíz a través de índices de vegetación de imágenes de satélite. *Terra Latinoamericana*, 18: 001. Chapingo, México. Pp. 27-34.
- Soria, R. J., Y. Fernández., R. Granados, 2004. Methodology for prediction of corn yield using remote sensing satellite data in Central México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 55, pp. 61-78.
- SIAP, 2009. Sistema Nacional de Encuestas Continúas. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Consultado en el portal: <http://www.siap.gob.mx> consultado el 26 de junio de 2009.
- SRS, 1976. Crop Identification and Acreage measurement utilizing Landsat imagery. Statistical Reporting Service. United States Department of Agriculture. Washington, D.C. 20250.
- SRS, 1983. Scope and Methods of the Statistical Reporting Service. Prepared by the Statistical Reporting Service, U.S. Department of Agriculture. Miscellaneous Publication No. 1308. Washington, D.C. 20250. Chapter 12. pag 114-118.
- Sttechman, S.V. and Czapplewski, R.L., 1998. Design and analysis for thematic map accuracy assessment: fundamental principles. *Remote Sensing Environments*. 64:331-344.
- Torres, F. T., 2003. Seguridad alimentaria: seguridad nacional. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Investigaciones Económicas, Méx. cap 1, págs. 15-49.
- Tortolero, V. A., 1998. De la Coa a la máquina de vapor. Actividad agrícola e innovación tecnológica en las haciendas mexicanas: 1880-1914. Editores Siglo XXI

Cuadro 1. Parámetros de imágenes Spot y Modis.

Spot					Plataformas		Modis			
Fecha	Sensor	Np	Bandas	Re (m)	Fecha	Clave	Sensor	Np	Bandas	Re (m)
04/04/12	HRV 1	2A	3	20	04/04/12	1957	Modis	2A	2	250
04/05/27	HRVIR1	2A	4	10	04/05/27	1927	Modis	2A	2	250
04/06/18	HRV 1	2A	3	20	04/06/18	1723	Modis	2A	2	250
05/04/29	HRG 1	2A	4	10	05/04/02	1723	Modis	2A	2	250
05/05/18	HRV 2	2A	3	20	05/05/05	1932	Modis	2A	2	250
05/06/13	HRV 1	2A	3	20	05/05/29	1716	Modis	2A	2	250
06/04/17	HRG 2	2A	4	10	06/04/16	1704	Modis	2A	2	250
06/05/19	HRVIR2	2A	4	10	06/05/20	1957	Modis	2A	2	250
06/06/26	HRVIR2	2A	4	10	06/06/11	1921	Modis	2A	2	250

Np = nivel de procesamiento; Re= resolución espectral.

Cuadro 2. Esquema de tabla de confusión para las clases de cubierta.

		Referencia (clases registradas en el padrón de usuario)				
		1	2	3	...	$P_{1+}$
Cartografía temática (de imágenes)	1	$P_{11}$	$P_{21}$	$P_{31}$		$P_{2+}$
	2	$P_{1q}$				$P_{3+}$
	3	$P_{21}$	$P_{22}$	$P_{23}$		.
	.	$P_{2q}$				.
	.	$P_{31}$	$P_{32}$	$P_{33}$		$P_{+}$
$q$		$P_{+1}$	$P_{+2}$	$P_{+3}$	$P_{+q}$	

donde:

1)  $P_{ij}$  es la proporción del área del mapa de la clase  $i$  y la clase de referencia  $j$ ;

2)  $p_{i+} = \sum_{j=1}^q P_{ij}$  es la proporción del área mapeada en la clase  $i$ ; y

3)  $p_{+j} = \sum_{i=1}^q P_{ij}$  es la proporción correcta del área asignada a la clase  $j$ .

Con esta metodología, se trató de distinguir varios parámetros de confiabilidad y de error como son: 1) Confiabilidad global del área correctamente clasificada, cuando el polígono seleccionado al azar es correctamente clasificado en el mapa; se expresa por:

$$P_c = \sum_{k=1}^q P_{kk} \quad (1)$$

2) Confiabilidad del usuario para la cobertura de suelos de la clase ( $i$ ) Es la probabilidad condicional de que el polígono seleccionado al azar clasificado en la clase  $i$  en la cartografía sea clasificado en la misma clase por la base de datos;  $P_{Ui} = P_{ii} / P_{i+}$  (2)

3) Confiabilidad del productor para la cobertura de suelo de la clase  $j$ . Es la probabilidad condicional de que el polígono seleccionado al azar clasificado en la clase  $j$  de la base de datos sea clasificado en la misma clase por la cartografía;  $P_{Aj} = p_{jj} / p_{+j}$  (3)

4) Error por comisión. Es la probabilidad de que el polígono seleccionado al azar en la clase  $i$  por la cartografía sea clasificado como clase  $k$  en la base de datos;  $p_{ik} / p_{i+}$  (4)

5) Error de omisión. Es la probabilidad de que el polígono seleccionado al azar en la clase  $j$  por la base de datos sea clasificado como clase  $k$  en la cartografía temática;  $p_{kj} / p_{+j}$  (5)

Los índices de confiabilidad descritos anteriormente no toman en cuenta los elementos fuera de la diagonal de la matriz (Mass et al. 2003) motivo por el cual se generalizó el uso del coeficiente Kappa que utiliza las sumas marginales de la matriz y cuantifica la contribución del azar en la confiabilidad de la cartografía. Este es expresado por:  $K = \frac{P_o - P_c}{1 - P_c}$  (6)

Donde:  $K$  es el índice de Kappa;  $P_o$  la proporción del área correctamente clasificada (confiabilidad global; expresada por la ecuación 1); y  $P_c$  la confiabilidad resultante del azar expresada por:

$$P_c = \sum_{k=1}^q P_{k+} P_{+k} \quad (7)$$

Cuadro 3. Superficie agrícola registrada en el padrón de usuario en las diferentes clases.

Ciclo agrícola	Superficie cultivada (ha)				área de estudio
	Maíz	sorgo	otros cultivos (oc)	suelo desnudo (sd)	
2004	6,164	9,578	807	376	16,925
2005	9,138	5,448	2,151	188	
2006	9,739	5,785	793	608	

Cuadro 4. Estimación de la superficie agrícola por muestreo directo parcelario.

Ciclo agrícola	Clase	Superficie estimada por el muestreo parcelario(ha)				Superficie registrada (ha)
		MDP <sub>25</sub>	MDP <sub>50</sub>	MDP <sub>75</sub>	MDP <sub>100</sub>	
2004	<i>maíz</i>	4,062	4,400	6,093	7,108	6,164
	<i>sorgo</i>	11,509	11,509	10,155	9,478	9,578
	<i>oc</i>	1,354	677	677	339	807
	<i>sd</i>	0	339	0	0	376
	<i>Ea<sub>ha</sub>(%)</i>	4,942 (29.2)	3,859 (22.8)	1,153 (6.8)	1,896 (11.2)	0
2005	<i>maíz</i>	10,832	8,801	8,581	8,632	9,138
	<i>sorgo</i>	4,739	6,093	6,313	6,262	5,448
	<i>oc</i>	1,354	2,031	2,031	2,031	2,151
	<i>sd</i>	0	0	0	0	188
	<i>Ea<sub>ha</sub>(%)</i>	3,385 (20.0)	1,286 (7.6)	1,709 (10.1)	1,625 (9.6)	0.0
2006	<i>maíz</i>	11,509	10,155	9,698	9,139	9,739
	<i>sorgo</i>	4,062	6,093	6,110	6,262	5,785
	<i>oc</i>	677	338	897	508	793
	<i>sd</i>	677	339	220	1,016	608
	<i>Ea<sub>ha</sub>(%)</i>	3,690 (21.8)	1,456 (8.6)	829 (4.9)	1,760 (10.4)	0.0

oc = otros cultivos; sd = suelo desnudo; Ea = Error absoluto (diferencia entre la superficie registrada en el padrón menos la superficie estimada por el muestreo parcelario).

Cuadro 5. Escenas de Spot y Modis propuestas para la clasificación supervisada.

Ciclo Agrícola	Fecha de escena	Spot			Fecha de escena	Modis			Clases
		No. de huellas por clase	Área de "Pe" en ha, (%)			No. de huellas por clase	Área de "Pe" en ha, (%)		
2004	4 587-298 04-05-27 17:22:11 11	76	70	(0.4)	20040527_1927	8	343	(2.0)	<i>maíz</i>
		61	58	(0.3)		8	318	(1.9)	<i>sorgo</i>
		6	15	(0.09)		4	112	(0.7)	<i>Oc-sd</i>
		6	56	(0.3)		4	256	(1.5)	<i>nube</i>
		31	36	(0.2)		4	225	(1.3)	<i>sombra</i>
2005	2 587-298 05-05-18 16:59:44 2 X	52	381	(2.3)	20050505_1932	13	537	(3.2)	<i>maíz</i>
		32	136	(0.8)		10	425	(2.5)	<i>sorgo</i>
		24	63	(0.4)		5	300	(1.8)	<i>Oc-sd</i>
		12	8	(0.05)		2	181	(1.1)	<i>nube</i>
		7	3.8	(0.02)		2	200	(1.2)	<i>sombra</i>
2006	5 587-298 06/04/17 17:22:52 2 J	46	120	(0.7)	20060416_1704	21	668	(3.9)	<i>maíz</i>
		34	136	(0.8)		15	500	(2.9)	<i>sorgo</i>
		12	29	(0.1)		5	162	(0.9)	<i>Oc- sd</i>
		6	10	(0.06)		4	237	(1.4)	<i>nube</i>
		5	17	(0.1)		2	62	(0.4)	<i>sombra</i>

Oc-sd= otros cultivos y suelo desnudo; Pe= parcela de entrenamiento (ha, %), de la superficie total.

Cuadro 6. Estadísticas agrícolas reportadas por la cartografía temática de imágenes de satélite.

Ciclo Agrícola	Spot					Superficie Agrícola estimada (ha)							Modis		
	Maíz	Sorgo	Oc-sd	Ns	Total	sobre estimación	maíz		sorgo		Oc-sd		Ns	Total	Sobre estimación
							maíz	sorgo	maíz	sorgo	Oc-sd	Ns			
2004	5409	7005	361	5119	17894	1088	3451	11777	1107	4982	21317	4392			
2005	5384	4518	850	7142	17894	1061	9336	10008	1714	257	21317	4392			
2006	11453	4356	1515	570	17894	1390	7524	9955	2323	1513	21317	4392			

Oc-sd = otros cultivos y suelo desnudo; Ns= nubosidad y sombras

Cuadro 7. Matriz de confusión reportada en la cartografía temática de imágenes Spot 2004.

Cartografía del ciclo 2004	maíz	sorgo	Oc-sd	Total	Confiability del Usuario
Maíz	23	11	2	36	0.639
Sorgo	7	31	0	38	0.816
Oc-sd	0	4	0	4	
Total	42	56	2	78	
Confiability del productor	0.548	0.554			

Oc-sd = otros cultivos y suelo desnudo; Ns= nubosidad y sombras

Cuadro 8. Matriz de confusión reportada en la cartografía temática de imágenes Spot 2005.

Cartografía del ciclo 2005	maíz	sorgo	Oc-sd	Total	Confiability del Usuario
Maíz	31	5	2	38	0.816
Sorgo	13	14	3	30	0.467
Oc-sd	1	2	2	5	
Total	51	37	12	73	
Confiability del productor	0.608	0.378			

Oc-sd = otros cultivos y suelo desnudo; Ns= nubosidad y sombras

Cuadro 9. Matriz de confusión reportada en la cartografía temática de imágenes Spot 2006.

Cartografía del ciclo 2006	maíz	sorgo	Oc-sd	Total	Confiability del Usuario
Maíz	58	7	0	65	0.892
sorgo	7	25	0	32	0.781
Oc-sd	1	1	0	2	
Total	67	33	0	99	
Confiability del productor	0.866	0.758			

Oc-sd = otros cultivos y suelos desnudos; Ns = nubosidad y sombra

Cuadro 10. Matrices de confusión para imágenes de Modis en los ciclos 2004, 2005 y 2006.

Cartografía del ciclo 2004	maíz	sorgo	Oc-sd	Total	Confiabilidad del Usuario
maíz	14	18	8	40	0.333
sorgo	15	29	10	54	0.518
Oc-sd	1	0	1	2	0.50
Total	30	47	19	96	
Confiabilidad del productor	0.467	0.617	0.05		

Cartografía del ciclo 2005	maíz	sorgo	Oc-sd	Total	Confiabilidad del Usuario
maíz	26	23	4	53	0.481
sorgo	9	21	4	34	0.618
Oc-sd	3	7	2	12	0.167
Total	38	51	10	99	
Confiabilidad del productor	0.684	0.412	0.20		

Cartografía del ciclo 2006	maíz	sorgo	Oc-sd	Total	Confiabilidad del Usuario
maíz	26	28	6	60	0.426
sorgo	7	19	3	29	0.613
Oc-sd	0	5	1	6	0.125
Total	33	52	10	95	
Confiabilidad del productor	0.788	0.538	0.10		

Oc-sd = otros cultivos y suelos desnudo

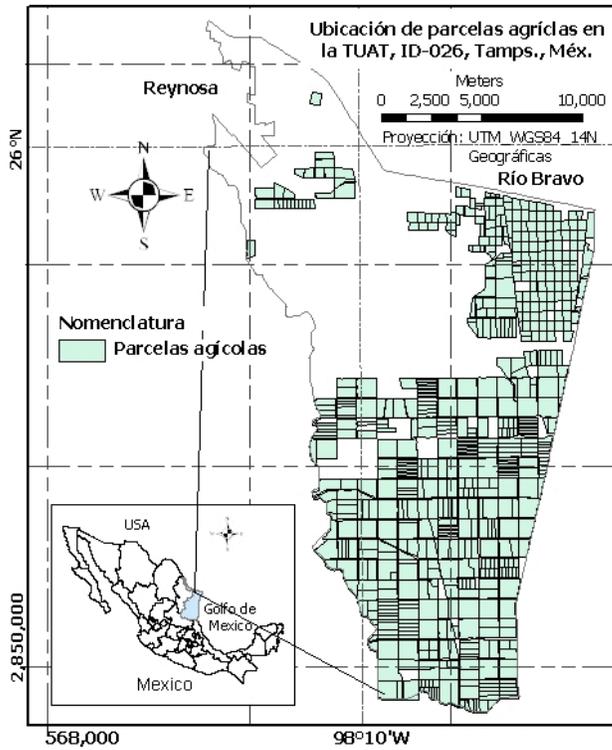


Figura 1. Localización del área de estudio.

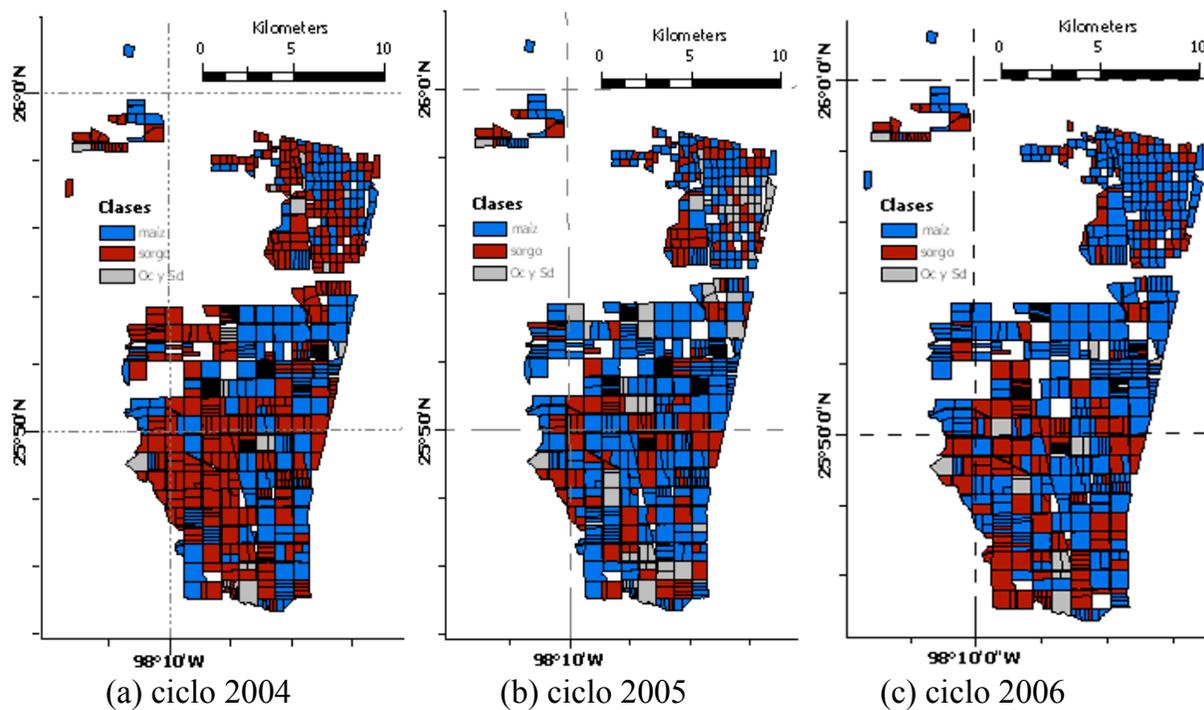


Figura 2. Distribución espacial de las clases de coberturas registrada en el padrón de usuarios.

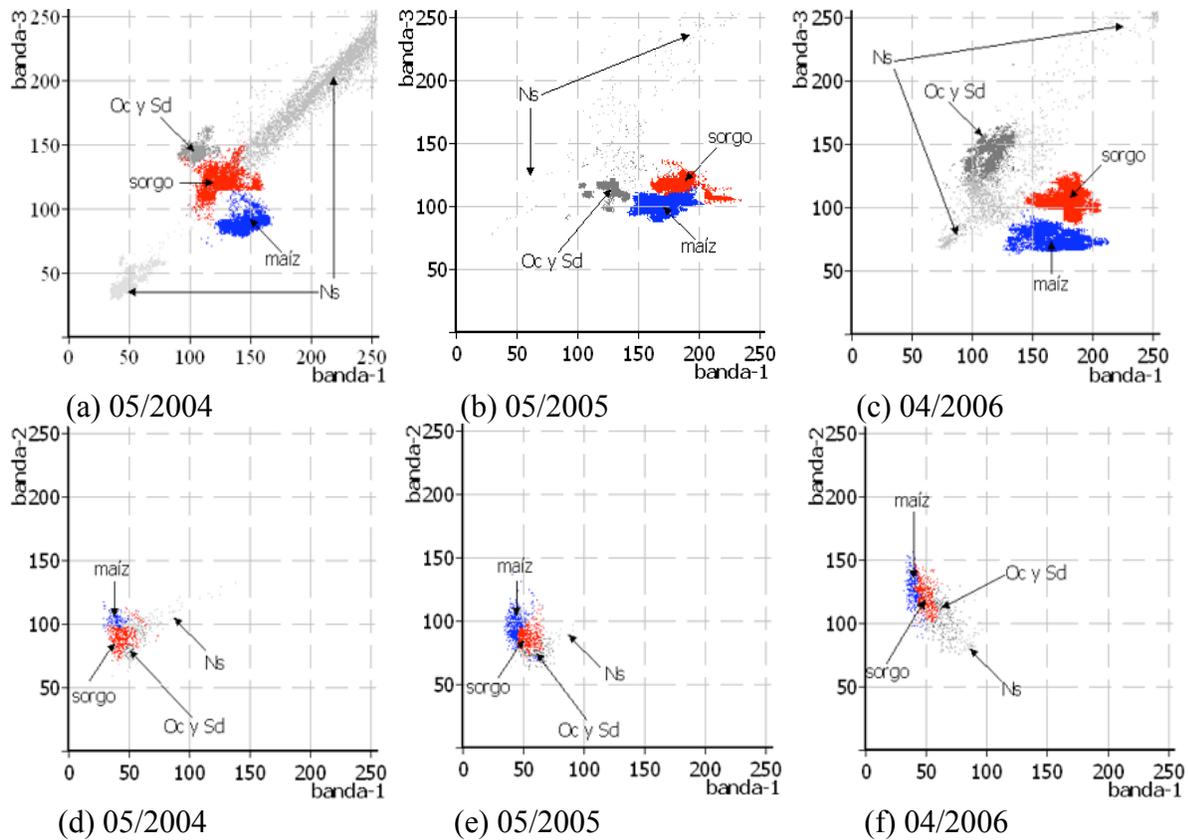


Figura3. Dispersogramas con firmas espectrales (DNs) en parcelas de entrenamiento en escenas Spot (a, b, c) y Modis (d, e, f), empleando la banda roja e infrarroja en cada plataforma.

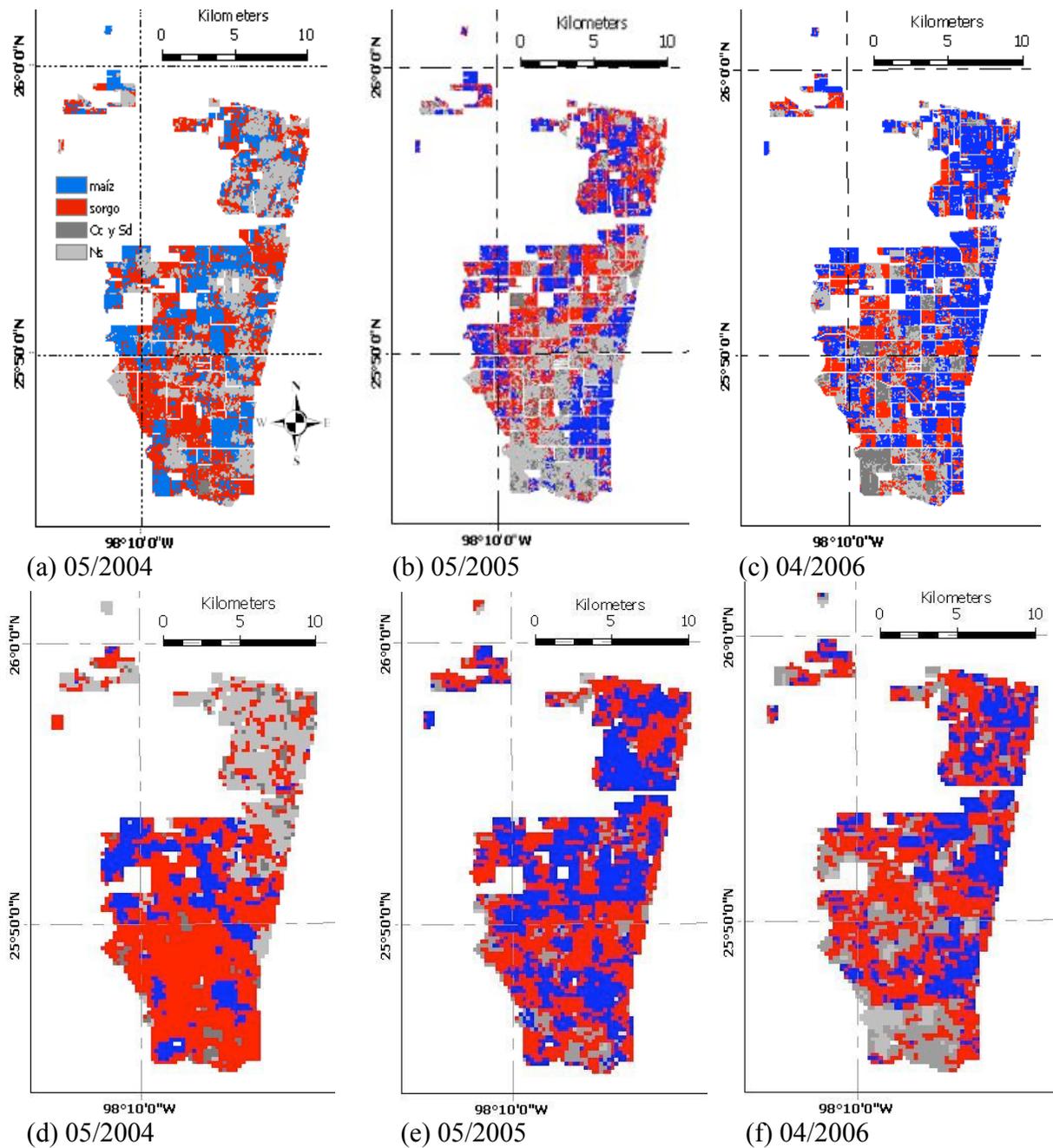


Figura 4. Cartografía temática que muestra la distribución espacial de las cuatro clases de cobertura generadas a partir de escenas Spot (a, b, c) y Modis (d, e, f).

## CAPITULO II

### TECHNICAL, ECONOMICAL AND SOCIAL ACTIONS OF FARMERS TO MITIGATE WATER DEFICIT IN TAMAULIPAS, MEXICO.

# TECHNICAL, ECONOMICAL AND SOCIAL ACTIONS OF FARMERS TO MITIGATE WATER DEFICIT IN TAMAULIPAS, MEXICO.\*

Edgar Vladimir Gutiérrez-Castorena<sup>a,\*</sup>, C.A. Ortiz-Solorio<sup>a</sup>, M.C. Gutiérrez-Castorena<sup>a</sup>,  
L. Cajuste-Bontemps<sup>a</sup>, M. Rocha-Aguilar<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Soil Science Programme, Colegio de Postgraduados, Montecillos, Texcoco 56230, México.

<sup>b</sup> Asociación de usuarios en Tercera Unidad del Distrito de Riego 026 del bajo Río San Juan, Río Bravo, Tamaulipas, México

## Resumen

El presente estudio fue llevado en la Tercera Unidad de Asistencia Técnica (TUAT) en el Distrito de Riego 026, Tamaulipas, México. Desde el inicio de construcción y operación de la presa “El Cuchillo-Solidaridad” en Nuevo León, México en 1994, El decremento y disponibilidad de la fuente de agua fue manifestado en el área de estudio. Aunado, a una prolongada sequía (1995-2003), incremento en los precios de insumos, y bajo precio de mercado del maíz. Nonetheless, el Distrito fue capaz de mantener el total de la superficie cultivada. Los objetivos fueron estudiar las acciones llevadas a cabo por los productores para mitigar el impacto del déficit de agua y abandono de las tierras agrícolas, y determinar el nivel de comunicación y organización entre los productores. 90,500 datos de información (número de parcela, superficie irrigada, cultivo sembrado, superficie del cultivo, y rendimiento del cultivo) fueron colectados por la TUAT de 1994- 2006, y fueron organizados dentro de un ambiente de Sistema de Información Geográfico. Los productores mitigaron el impacto del déficit de agua modificando el patrón de cultivo de manera drástica (de maíz a sorgo) porque este último requiere menos riego para mantener su productividad y distribuyendo el agua equitativamente. Por lo tanto, fueron capaces de evitar la migración y el abandono de la tierra. Bajo condiciones favorables en disponibilidad de agua y precios mercado internacional del maíz, se registró un nuevo cambio de cultivo, de sorgo a maíz. Los cambios drásticos en los cultivos fueron posibles debido a la igualdad de representación que cada agricultor tiene dentro de su organización, y debido a la estrecha comunicación entre ellos. Este nivel de organización permitió a los agricultores tomar decisiones inmediatas y de rápida adaptación a las restricciones ambientales y económicas dentro de cada ciclo agrícola. Estos hallazgos representan una nueva alternativa para hacer frente a la sequía agrícola en otros países bajo condiciones similares.

## Abstract

The present study was carried out in the Third Unit of Technical Assistance (TUTA) of the Irrigation District 026, in Tamaulipas, Mexico. Since the beginning of the construction and operation of the dam “El Cuchillo-Solidaridad” in Nuevo León in 1994, the decrease in available water resources was manifested in the study area; besides, there was a prolonged drought (1995-2003), increase of input prices, and a low market price for maize. Nonetheless, the district was able to maintain the totality of its cultivated surface. The objectives were to study the actions farmers carried out to mitigate the impacts of water deficit and abandonment of land, and to determine the level of communication and organization among farmers. 90,500 pieces of information (plot number, irrigated surface, crop sown, crop surface, and crop yield) were collected by TUTA from 1994 to 2006, and were organized into a GIS environment. The farmers mitigated water deficit impact modifying the crop pattern in a drastic way, from maize to sorghum, because the latter requires less irrigation to maintain its productivity, and distributing the water in equal form. Therefore, they were able to avoid migration, and abandonment of the land. Under favorable water availability and international market prices for maize, a new shift in crop cultivation was done, from sorghum to maize. The drastic shifts in crop cultivation were possible because of the equal representation that each farmer has within their organization, and because of the close communication among themselves. This level of organization enabled farmers to make immediate decisions and to adapt quickly to environmental and economic restrictions within each agricultural cycle. These findings represent a new alternative to face agricultural drought in other countries with similar conditions.

## 1. Introduction

The Irrigation district 026 (ID-026) began its operation in 1943, using the water from the San Juan River, through the Marte R. Gomez (MRG) dam. The objective was to supply an initial irrigable area of 100,000 gross ha. However, only 79,995 ha proved to be suitable for agriculture, and for the Third Unit (the study area), the total surface was 32,145 ha (SRH, 1953). Land use change in the Third Unit was inevitable, where shrub land was transformed into agricultural land. Cotton was the main crop with 90% coverage of the irrigated area (SRH, 1953) because it became a profitable commodity. However, the high agricultural production costs caused cotton to be completely replaced by maize (71.8%), sorghum (24.4%), and wheat (2.8%) in 1971

(Barbosa, 1971; SRH, 1973). With time, maize dominated the agricultural lands as a single-cycle crop until 1994.

In 1994, an increase in population and industry of the Metropolitan area of Monterrey, N.L. triggered the need to increase the storage and readiness of water resources; thus, the construction of the Cuchillo-Solidaridad (CS) dam was authorized by the government of the State of Nuevo León. This dam is located 80 km upstream from the MRG dam, and began its operation in October 1994 (Aguilar, 1999), effectively fulfilling the original objective. However, it restricted water flow towards to the Third Unit which impacted negatively on the productivity of the land (Flores and Scott, 1999). The decrease in water availability represented an almost 84% loss, since the water flow decreased from 269 Mm<sup>3</sup> in 1993 to 44 Mm<sup>3</sup> in 1999 (Rocha, 2004). Additionally, the prices of input increased substantially while prices for maize decreased. Due to water restrictions, increased price of input, and lower market prices for maize, an increase in the surface cultivated with sorghum was observed through field trips realized during the period 1991–1997. Fig. 1 illustrates some land use change in the Third Unit.

During the time period between 1994 and 2002, the northern region of Mexico suffered a severe drought (Rymshaw, 1998; Schoups et al., 2006), which caused many irrigated districts to decrease their extensions. For example, in Chihuahua (Irrigation District 05, Delicias), from 107,000 ha of labor land in 1989 only 16,500 ha of labor land were preserved in 2002 (Gutiérrez et al., 2004). In other places (Yaqui Valley Irrigation District, Sonora), a conjunctive management of surface water and groundwater resources was proposed, as well as engineered improvements, and regional pumping in order to save 30% of historical water reservoir (Schoups et al., 2006).

On the other hand, in 1994, Mexico was integrated into a free trade agreement with USA and Canada (NAFTA). As a result, Barbier (2000) mentioned that the price of fertilizer rose sharply (around 50–70%), and the fall of prices for maize caused the decrease of around 10–13% in labor land area. This could have decreased the demand for rural labor, generating emigration to urban areas (Levy and van Wijnbergen, 1992).

In the case of ID 026, some studies were carried out to forecast water volumes and availability, using hydrologic models. Flores and Scott (1999) reported that storage water would not be enough to supply neither Monterrey City nor irrigation for labor land of the district. Schmandt et al. (2000) predicted that for the year 2030 these water shortfalls could reach 55% of

the total water supply in the area. Nívar and Téllez (2002) mentioned that the irrigation area could decrease up to 65% of its total surface by the year 2045, under the worst-case scenario if the drought period would persist in the region.

In spite of the catastrophic predictions, the increase in input prices, low market prices for grain crops, and drought seasons that lasted for eight years, the farmers of the 26th Irrigation District were able to preserve their croplands until 2006. Rymshaw (1998) reported that a drastic change in land use occurred only for the first year (a reduction of 33% in cultivated land during the season 1994–1995). However, during the next growing period the district totally recovered its initial extension. This means that farmers carried out practices to mitigate the impacts caused by water deficit, as well as those impacts resulting from elevated production costs (particularly in the case of cotton and maize).

The two outlined hypotheses were that the farmers changed the crop pattern, only under certainty and with very low risk of water deficit, to guarantee their harvest and to minimize loss; and that the level of communication among farmers contributed to drastic changes in agricultural land use.

The objectives of this research were: (a) to determine the actions that farmers carry out to mitigate the impacts of water deficit, and to avoid abandonment of their lands, during the period from 1994 to 2006; and (b) to establish the level of communication between technicians and farmers, and the level of organization and communication among farmers within the Third Unit of Technical Assistance.

## 2. Materials and Methods

### *2.1. Description of the study area*

The Third Unit of Technical Assistance (TUTA) is made up of five modules (III-1, III-2, III-3, III-4 and III-5); however, module III-5 was discarded, due to lack of accurate information. The remaining four modules covered an area equal to 29,761 ha (93%), within the Irrigation District ID-026.

The landscape of the TUTA pertains to the physiographic province of the “Gran Planicie Costera del Noreste” (Great North-Eastern Coastal Plain) of Mexico, with an average altitude of 34 m above sea level (SRH, 1953). Administratively, this region lies within the boundaries of the municipalities of Reynosa and Rio Bravo, State of Tamaulipas (Fig 2). The climate is semi-arid

with an annual average temperature of 18°C (INEGI, 1995). While the total annual evaporation is near to 2011 mm, the reference evapo-transpiration averages 1756 mm. In contrast, the annual rainfall only amounts to 570 mm, with a mainly summer rainfall distribution, during the months of August and September (Rymshaw, 1998).

The soils in the TUTA are classified into three groups: Calcisols, Kastanozems, and Vertisols (FAO/UNESCO, 1970), which are suitable for continued-mechanized agriculture. Additionally, the vegetation in the region is dominated by Tamaulipean thorn shrub, with *Cercidium* spp and *Acacia* spp (mesquite) as main species (SEMARNAT, 2007).

## 2.2. Methodology

Personnel working in the TUTA provided data corresponding to plot number, irrigated surface, crop sown, crop surface, and crop yield (90,500 pieces of information), from annual recorded statistics. With this information, a database for the modules of technical assistance (BDMAT) was built, representing the different agricultural production systems occurring in the study area, during a twelve-year period (1994-2006).

The implementation of the database with annual records required a reorganization of the information, including data “debugging” (checking for error coding), data “purging” (eliminating redundant data), and data validation (checking for data consistency). The application MS Excel 2003 was used to perform such a task. Further, the agricultural plots were spatially identified and properly represented by a digital planimetric cartography of the district, which was provided by the State Bureau, covering 75% of the study area.

The digital chart was processed with the following steps:

- a) Georeference of the chart using as master sheet a Landsat ETM+ ortho-photo, issued on November 22<sup>nd</sup>, 2002, and using ERDAS IMAGINE v-8.5;
- b) Delimitation of the boundaries of the study area, using AutoCAD 2004; and
- c) Location, identification, and linkage of each plot to their corresponding data in the BDMAT using ArcMap v-8.1.

The frequency for each pattern of land use/cover change during the period between years 2001 and 2006 (excluding year 2004) was determined from the BDMAT, and the spatial representation of the landscape pattern for each year was obtained using ArcMap as a GIS environment. 658 agricultural plots were located and identified, with an extension equal to

16,645 ha, or 56% of the total study area. Each agricultural plot was assigned a letter, according to the crop cultivated, for each year: S=sorghum, M=maize, C=cotton, P=grassland and V=other crops.

Rural prices for maize and sorghum (average) were related with data from land use during the period between years 2001 and 2006, and with water volume data from the dams MRG and CS (SAGARPA, 2007), during the years 1994 to 2006, to determine the influence of such variables on the recorded land use/cover changes.

Finally, interviews were carried out to 50 farmers, selected randomly from a total of 1140 agricultural workers, registered in the district database. The main questions asked were:

- Do you receive technical support or any kind of agricultural consulting about what to cultivate in your parcel?
- Do the personnel working in the modules of technical assistance recommend you any specific crop to cultivate at the beginning of each season?
- What criteria do you use to decide what crop will be cultivated?
- Do farmers with land in the TUTA meet frequently to discuss agricultural issues?
- With how many farmers do you exchange information about crop yield, crop management and other related information from past agricultural cycles?
- How do you get access to information about available water in the dam? Do you have any idea how water is distributed for watering crops?
- Do you use groundwater to irrigate your plots?

How do you access information on crop market prices during harvest?

### 3. Results

#### *3.1. Land use change analysis*

Since the recorded information was not completed (Table 1) for all modules during the period of study (1994-2006), the dataset was subdivided into three groups. The first group included modules III-1 and III-2 for years 1994, 1996, 2001, 2003, 2005, and 2006; the second group included module III-4 only, from years 1995 to 2006; and the third group included all modules, for a time period from year 2001 to year 2006, excluding year 2004. The Land Use Change Analysis (LUCA) for each group was determined only for the main crops (maize and

sorghum), except when there was an important change for other crops, and such changes involved a large proportion in the study area; for example, in the case of cotton in some years.

### *3.1.1. Analysis of the first group*

The first group showed two important changes (Fig. 3a); the first one occurred between 1994 and 1996, when the cultivated surface of maize decreased drastically from 8,358 ha to 56 ha; while the surface cultivated with sorghum increased from 5,960 ha to 11,731 ha. The second change was recorded between 2005 and 2006 when the cultivated surface of maize increased to 7,394 ha; while the sorghum planted surface decreased to 5,746 ha. This means that maize and sorghum cropped surfaces showed an inverse relationship to an area equal (Fig. 3b).

### *3.1.2. Analysis of the second group*

The first important land use change occurred during the same period as in the first group, that is, 1995-1996 (Fig. 4a), when the area of cultivated maize decreased from 4,939 ha to 528 ha; moreover, in 2001 maize surface decreased to 191 ha. In contrast, the area of cultivated sorghum increased from 714 ha to 6,641 ha, and reached a peak of 7,506 ha in 2002. In a similar fashion, the second land use change occurred during 2005 with a same behavior; the surface of cultivated maize increased to 4,298 ha; whereas the surface with sorghum decreased to 2,892 ha. Meanwhile in 2006, the surface cultivated with sorghum was of 3,751 ha, that of maize was of 3,526 ha. Thus, the negative relationship of cultivated surface for both crops was inversely proportional (Fig. 4b), and with a negative correlation coefficient ( $r = -0.9591$ ; in Fig. 4).

The surface of cotton decreased drastically, to a point where it was not cultivated during years 2002 and 2004; nevertheless, in 2006, it occupied 2% of the total surface in module III-4. Likewise, grasslands occupied 2.6% and 5.5 % of the total surface in module III-4, respectively, for the same years, with a decrease to 4.1% during 2006.

### *3.1.3. Analysis of the third group*

A similar trend was observed in this group, compared to the previous groups. During the years 2005 and 2006, the surface cultivated with sorghum decreased from 26,165 ha to 11,078 ha; whereas the surface cultivated with maize increased from 505 ha to 14,766 ha. In addition, maize was for 2006, the crop with the greatest surface in the TUTA. The relation between

cultivated surfaces for both crops was similar to that found in the other groups, that is, inversely proportional (Fig. 5). As for cotton, it oscillated around 4%, and induced grassland between 2.43% and 4.34%. Other crops represented a mere 2.78% of the study area.

Two shifts in land use therefore detected during the 12 years (1994-2006) that corresponded to the study time frame. These shifts included mainly two crops: maize and sorghum, which kept an inverse relationship in terms of cropped surface.

### *3.2. Patterns of land use change*

Figure 6 shows the distribution of patterns of land use change in the study area, from the period between years 2001 and 2006, excluding year 2004. In the 26<sup>th</sup> Irrigation District, five main patterns were identified, these being:

- SSSMM, which occupied 4,550 ha,
- SSSSS, which occupied 2,638 ha,
- SSSSM, which occupied 1,316 ha,
- SSSMS, which occupied 1,210 ha, and
- SSMMM, which occupied 767 ha.

The remaining area in the TUTA, that is 6,162 ha, showed another 600 individual patterns, such as SSSAS or SSAMM. However, they did not represent by themselves an important proportion of the study area (less than 2.3% each).

Land use change and crop distribution for four years in the module III-4 is represented in Fig. 7. During the year 1995, the extension of maize was 4,939 ha, greater than that of sorghum, which was 714 ha. In contrast, during the years 1999 and 2003, sorghum crops dominated the landscape with extension equal to 6,269 ha and 6,808 ha respectively; while maize extensions amounted 478 ha and 537 ha, respectively for the same years. In 2006 both crops presented similar cultivated surfaces (maize = 3,526 ha; sorghum = 3,751 ha).

When analyzing the agricultural lands during the 1994-1995 crop cycles, whether with spatial tools as in Fig. 7 or with graphic tools as in Fig. 3 and 4, a drastic shift in crop cultivation (from maize to sorghum) was identified, caused by the water deficit. This shift lasted as long as the drought was made present in the land (till 2003). A similar behavior occurred during the 2005-2006 cycle, instead, there was no drought but an excess in available water, reverting the

shift to the previous state of land use in the 26th district (Fig. 7 and Fig. 3, 4, and 5), that is, from sorghum to maize.

### *3.3. Water storage*

Fig. 8 shows the CS dam exceeded its available holding capacity since 2003, to proportions equivalent to 170% of its total capacity. As a safety measure, the State Government of Nuevo Leon has indicated to keep CS dam gates open in such cases, in order to avoid flooding. This action in turn, has increased the flow of water to the MRG dam, which exceeded its holding capacity since 2004.

When comparing Fig. 5a and 7d with Fig. 8, we found that the excess water in the dam MRG promoted the increase of cultivated maize; in contrast, when water deficit was present such as in the years 2002 and 2003, cultivation of sorghum was promoted in the TUTA.

The relationship between surface of cultivated maize and water storage in the MRG dam was directly proportional; i.e. the greater the volume of stored water, the greater the extension of cultivated maize. On the contrary, the relationship between water storage and surface of cultivated sorghum was inversely proportional (Fig. 9).

### *3.4. Average rural price*

Table 2 shows how the average rural price for maize (Mexican pesos, M\$; M\$/ton, M\$/ha) during the period 2001–2006 was higher than that for sorghum. Maize, however, did not have an important proportion of cultivated surface within the TUTA. It was not until the dams registered a water-stored volume of 100% that maize started to present a large proportion of cultivated surface within the TUTA (Fig. 8).

### *3.5. Interview to farmers*

From the 50 farmers interviewed 24 belonged to an area with a land tenure of ejido type, 12 belonged to an area of private small holders, and 14 belonged to areas where production societies (agricultural enterprises) presided. More than 80% of the farmers, regardless of the land tenure status, commented during the interviews that they receive no technical support regarding crop management, or any recommendation about what crop to produce. Additionally, the National Water Commission (CNA, from its abbreviation in Spanish) is the agency responsible for

managing and allotting water in the Irrigation Districts. If there is not enough stored water in the MRG dam, CNA informs the agricultural technicians working in the district about the shortage. These technicians then, set up a meeting with the farmers to let them know how much water from the dam is available for the cropping season. This is how farmers start to decide what they will sow in their plots. If there is enough water for planting maize, three watering times (one for sowing establishment and two for auxiliary growth) are assigned to each plot. On the contrary, if available water in the dam is not enough, sorghum is planted (during semi-rainfed season).

Another decisive factor that determines what crop will be cultivated during the season is the price of each crop (M\$/ton) at harvest time, since farmers sign purchase contracts with traders to sell their crops. Each farmer waits for the appropriate time, according to their own experience, to sign the contract with the trading company, because crop prices are fixed according to their value in the stock market. In the interviews, farmers have also suggested that if the difference in prices between maize and sorghum is not relatively large enough, they prefer to cultivate sorghum because sorghum fields carry less risk than cornfields.

In summary, for a farmer to decide on cultivating maize in any season, there has to be a great positive difference between prices of corn and sorghum crops, and there also has to be enough stored water in the MRG dam.

Farmers alternatively get together two to four times a month to have coffee and exchange experiences in their agricultural work. They discuss issues such as: grain variety, crop management, fertilization and fumigation strategies, and crop yield in past seasons, among other topics. They also discuss problems occurring in other northern irrigation districts in the country. Regarding the use of subsurface water for irrigation purposes, farmers commented that water in aquifers is of very low quality, because of its high content of salts, which represents a potential hazard to their lands. A last topic discussed during the interviews with farmers was the opportunity to plant other agricultural commodities. The farmers argued that there have been attempts to establish other economically profitable crops in the districts. However, such attempts have failed due to the high production costs and the very poor competitive market prices obtained at harvest time.

#### 4. Discussion

After 12 years of operation of the CS dam, the farmers with plots belonging to the TUTA had to adapt to the fluctuations in available water from the MRG dam. The construction of the earlier dam had negative economic impacts, as they were reported by several authors (Rymshaw, 1998; Flores and Scott, 1999; Rocha, 2004); though farmers took actions to mitigate such impacts.

To solve the problem of water deficit, authors like Rymshaw (1998) proposed changing maize cultivation to crops with a higher economic value. It is known that such crops correspond to vegetables; however, they require higher water volumes, and more efficient irrigation systems. According to the farmers, these strategies failed to be an option long before the water deficit occurred, because of the high production costs and low competitive market prices for vegetables. Flores and Scout (1999) suggested reducing the extension of irrigated land, from 78,995 ha to 56,500 ha, representing a 30% reduction of the total surface, an equally harsh alternative for farmers. In addition, in terms of economic loss, Rocha (2004) reported that the change in land use caused a difference of income equal to M\$854 million (USA\$76 millions), between 1994 and 2001.

Nonetheless, the farmers found less drastic actions to solve the problem of water deficit modifying crop patterns according to available water and crop prices. They made a substitution of maize cultivation (80% in total area in 1993; Rymshaw, 1998) to sorghum cultivation (88% in total area in 1996), and the access of water and its distribution per surface unit was made equal to all farmers belonging to the district.

Before the construction of the CS dam, sorghum was usually cultivated in rainfed systems, because it is a drought-resistant crop. With the water deficit, the farmers only had 290 mm of water available for crops (Rocha, 2004). This available water was not enough for maize crop production (three irrigations), but was more than enough to produce sorghum. According to comments from the farmers, sorghum production increased from 1.5–2.0 ton/ha to 3.5–4.5 ton/ha when it was implemented into semi-irrigated agriculture; therefore, the agricultural surface was not reduced by water deficit. Although there were important economic losses (Rocha, 2004), the farmers were able to maximize their profits by cultivating sorghum instead of maize.

These actions helped to avoid the reduction of farmers and agricultural workers, maintaining most of the agricultural land and prevented rural emigration, when the fall of price of maize decreased the demand for rural labor.

The change in crops is explained as a response of the close communication among farmers, about the environmental conditions, whether unfortunate (as in 1994) or favorable (as in 2005); a topic that is not usually discussed through the conventional broadcasting media (Hernandez, 1985).

The level of organization based on the cooperation among farmers allowed to make immediate decisions and to adapt to the environmental restrictions. This cultural value has been reported by Stevenson (1996) when differentiating traditional knowledge from western knowledge; that is, cooperation vs. competition. In England, for example, the farmers are risk averse and profit maximizes (Rounsevell et al., 2003); whereas in Belgium agricultural land use patterns are not influenced by farmer imitation (Schmit and Rounsevell, 2006), perhaps because of different economical and environmental conditions.

At international level, there are two theories about how human beings interact with their surrounding environment, building human–environment relations: the first one mentions that humans are able to adapt to environmental constraints, and the second one that humans are at the mercy of them. The results in this paper support the first theory as long as these relations are built on traditional knowledge and traditional values; although this does not exclude the integration of modern elements or scientific knowledge, as mentioned by Toledo (1988), who states that communities possess diverse ways to adapt to their physical environment.

The experience obtained through this study, about organization and cooperation among farmers, could be extended to areas with similar conditions of water deficit within irrigation districts throughout the whole country (Gutiérrez et al., 2004). These findings also represent a new alternative to those reported by Debaeke and Aboudrare (2004) in water limited environments in order to face global change. However, it is necessary to take into account the people directly involved in the use of agricultural lands to ensure proper understanding of the particular phenomenon in a given area and to avoid catastrophic predictions (Flores and Scott, 1999; Schmandt et al., 2000; Návar and Téllez, 2002).

## 5. Conclusions

The actions carried out by farmers from the Third Unit of the ID-026 to mitigate the impacts of several factors, such as the water deficit, caused by the building of the Cuchillo-Solidaridad dam, the prolonged drought, and a fall in the price of maize in 1995, were: (a) change of crop cultivation (from maize to sorghum), and (b) equal distribution of water per surface unit among farmers. These actions allowed to maintain the productivity of agricultural land without modifying the amount of irrigated agricultural land. In 2006, under favorable conditions, such as good water availability and the higher international price of maize caused a reverse shift in crop cultivation (from sorghum to maize).

These abrupt changes in crop pattern (maize–sorghum, sorghum–maize) were possible because of the type of organization and cooperation among farmers. In addition, the close communication among them allowed the quicker decision-making and its implementation in the field during each agricultural cycle, given the environmental or human-induced restrictions prevailing in their land.

## Acknowledgements

The authors wish to express their gratitude to the personnel and farmers of the 26th Irrigation District, Tamaulipas, for providing the information to carry out this research.

## References

- Aguilar, B.I., 1999. Interregional transfer of water in northeastern México: The dispute over El Cuchillo (R824799). *Journal of Hazardous Materials*. 39(1), 65-98.
- Barbier, E.B., 2000. Links between economic liberalization and rural resource degradation in the developing regions. *Agricultural Economics*. 23, 299-310.
- Barbosa, S.B., 1971. Programación óptima de cultivos en los Distritos de Riego Río Bravo y Bajo Río San Juan en el estado de Tamaulipas, México. MSc. Thesis, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Flores, L.F.J. and Scott, C.A., 1999. Simulación de alternativas de manejo del agua en la cuenca del río San Juan, México. IWMI, Serie Latinoamericana No. 9. Instituto Internacional del Manejo del Agua. México, D.F.
- Gutiérrez, M., Johnson, E., Mickus, K., 2004. Watershed assessment along a segment of the Río Conchos in Northern Mexico using satellite images. *Journal of Arid Environments*. 56, 395-412.

- Hernández, X.E., 1985. Agricultura tradicional y desarrollo. XOLOCOTZIA. Obras de Efraín Hernández Xolocotzi. Revista de Geografía Agrícola. Tomo I. Chapingo, México. 799 pp.
- INEGI., 1995. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Síntesis Geográfica y Estadística de Tamaulipas, Tamaulipas, México.
- Levy, S., van Wijnbergen, S., 1992a. Maize and the free trade agreement between Mexico and the United States. *World Bank Econ. Rev.* 6(3), 481-502.
- Návar, J. and Téllez, E.R., 2002. Caracterización de la superficie agrícola y sus volúmenes de irrigación en la cuenca del río San Juan, México. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía. UNAM.* 47, 77-91.
- Rocha, M.A., 2004. Dictamen técnico de la afectación económica ocasionada a los usuarios de riego de la tercera unidad del Distrito de Riego 026 bajo río San Juan. Publicación Módulo de Asistencia Técnica del Distrito de Riego 026, Tamaulipas, México.
- Rymshaw, E., 1998. Análisis del desempeño de la irrigación en los distritos de riego Bajo Río Bravo y Bajo Río San Juan, Tamaulipas, México. *IWMI. Serie Latinoamericana.* 1, 1-45.
- SAGARPA., 2007. Anuario estadístico de la producción agrícola. Reviewed in February 28, 2007. [http://www.siap.sagarpa.gob.mx/ar\\_comdeanuadin.html](http://www.siap.sagarpa.gob.mx/ar_comdeanuadin.html)
- Schmandt, J., Aguilar-Barajas, I., Mathis, M., Armstrong, N., Chapa-Alemán, L., Contreras-Balderas, S., Edwards, R., García-Ramírez, Ma. E., Hazleton, J., Lozano-Vilano, Ma. L., Navar-Chaidez, J. J., Vogel, E., and Ward, G., 2000. Water and Sustainable Development in the Binational Lower Rio Grande/Río Bravo Basin. Final Report to EPA/NSF Water and Watersheds Grant Program (Grant No. R 824799-01-0), Houston Advanced Research Center, Center for Global Studies, The Woodlands, Texas.
- Schmit, C., Rounsevell, M.D.A., 2006. Are agricultural land use patterns influenced by farmer imitation. *Agriculture Ecosystems and Environment.* 115, 113-127.
- SEMARNAT, 2007. Instituto Nacional de Ecología. Reviewed in April 11, 2007. <http://www.ine.gob.mx/publicaciones/libros/109/cap2.html>
- SRH, 1953. Memorias de los distritos de riego. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Irrigación y Control de Ríos. 2<sup>a</sup> ed. Tamaulipas, México.
- SRH., 1973. Características de los distritos de riego. Tomo I. pacifico norte, centro norte, noreste. Secretaría de Recursos Hidráulicos, Distritos de Riego. Tamaulipas, México.
- Stevenson, M.G., 1996. Indigenous knowledge in environmental assessment. *Arctic.* 49(3), 278-291.
- Schoups, G., Addams, C.L., Mijares, J.L., Gorelick, S.M., 2006. Sustainable conjunctive water management in irrigated agriculture: Model formulation and application to the Yaqui Valley, Mexico. *Water Resources Research.* 42, W10417, doi10.1029/2006WR004922.
- Toledo, V.M., 1988. Enseñanzas de la ecología indígena. *México Indígena. Revista del Instituto Nacional Indigenista.* 24 (3), 278-291.

Table 1. Summary of the annual data availability of the Third Unit of Technical Assistance modules

Module	Section	No. of lots	Watering surface (ha)	Years studied													
				'94	'95	'96	'97	'98	'99	'00	'01	'02	'03	'04	'05	'06	
1	41-44	73	528	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	45	117	1591	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	46	36	657	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	47	104	1436	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	48	143	2861	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2	48-A	68	1334	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	49	49	629	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	50	68	937	X	•	X	•	•	X	•	X	•	•	X	•	•	X
	51	45	844	X	•	X	•	•	X	•	X	•	•	X	•	•	X
	52	70	1380	X	•	X	•	•	X	•	X	•	•	X	•	•	X
	53	117	1525	X	•	X	•	•	X	•	X	•	•	X	•	•	X
3	54	60	1670	X	•	X	•	•	X	•	X	•	•	X	•	•	X
	55	63	1961	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	56	107	2144	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	57	72	2095	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
4	58	92	2989	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	59	84	2970	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	60	72	2202	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

X Annual data availability  
• No information.

Table 2 Average rural price (M\$/ton), surface (ha), average price by surface (M\$/ha) established by corn and sorghum in different agricultural cycles

Agricultural cycle	Price (M\$/ton)			Surface (ha)		Price (M\$/ha)	
	Sorghum	Corn	difference (C-S)	Sorghum	Corn	Sorghum	Corn
2001	967	1392	424	25598	505	3675	2644
2002	1256	1407	150	26165	1139	5778	7598
2003	1234	1631	396	24075	2095	4936	7340
2004	1270	1572	302	x	x	3810	6759
2005	1141	1260	118	10503	14627	4450	6174
2006	x	X	x	11078	14766	x	x

x= No data; M\$11.0 = USA \$1.0; (C-S) = Corn minus Sorghum.

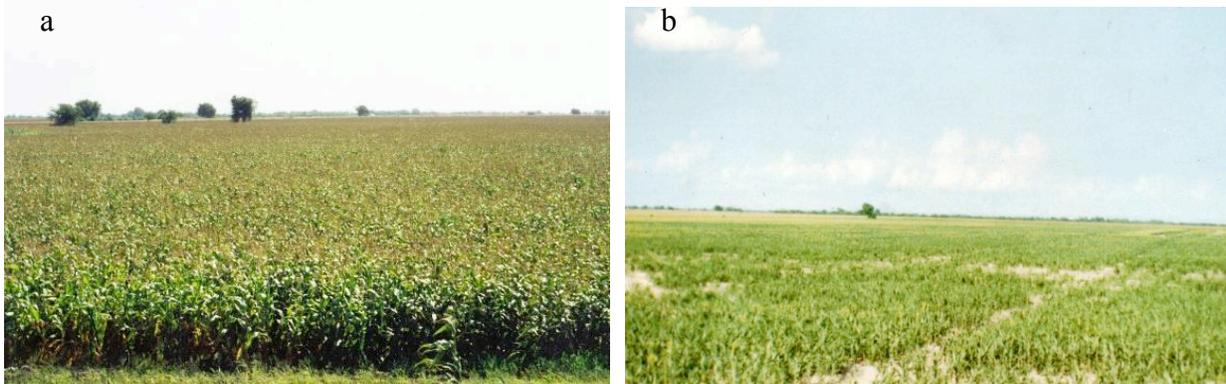


Fig. 1. Crop patterns in Third Unit of Technical Assistance. (a) Corn before the water deficit; (b) Sorghum with water deficit

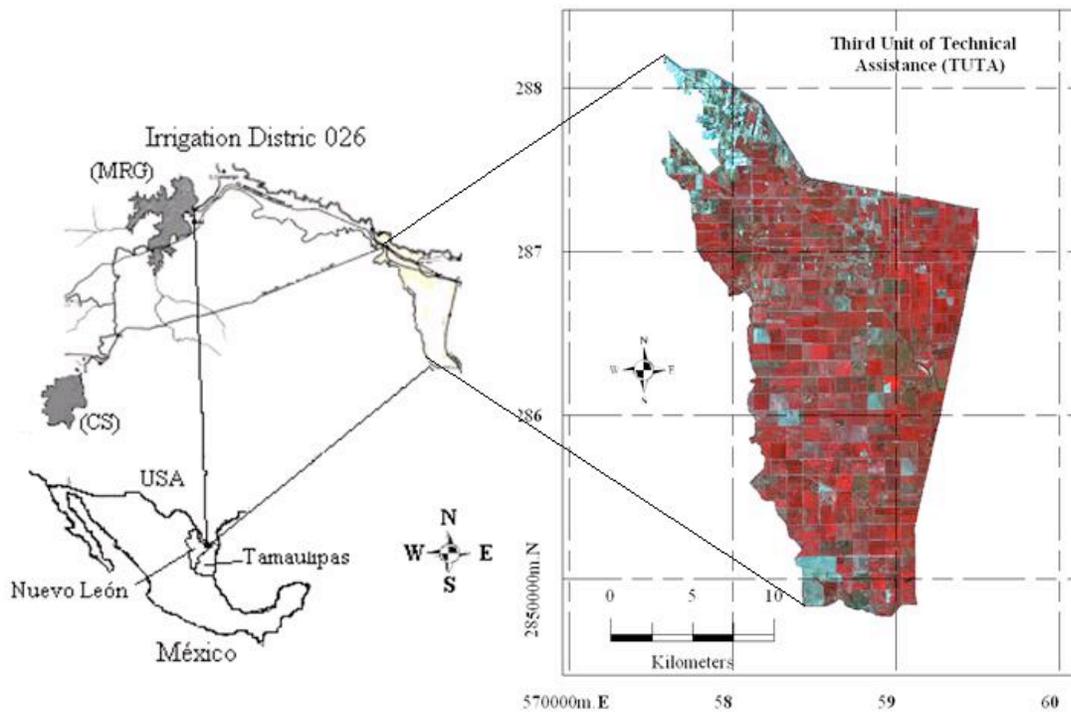
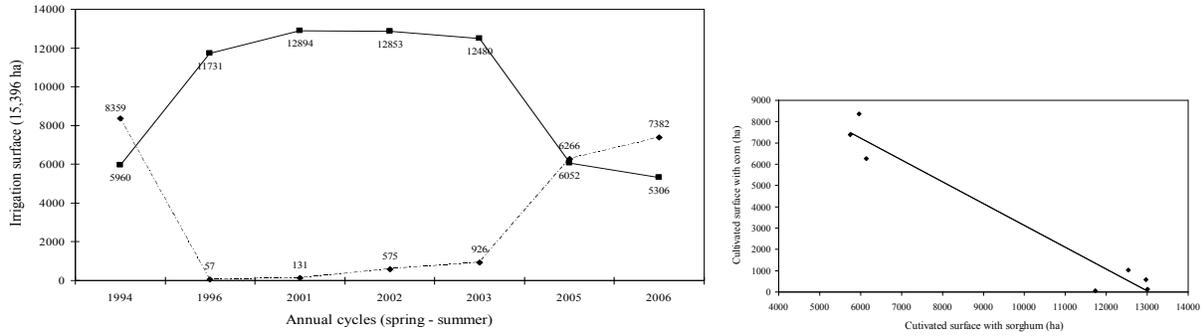
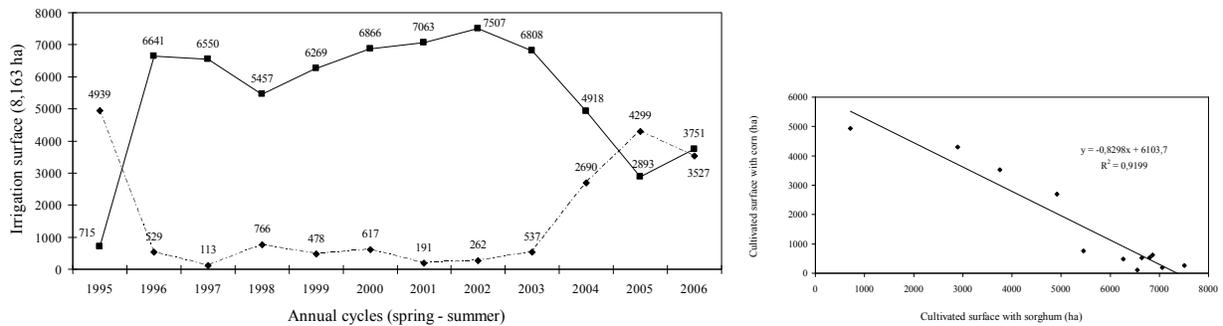


Fig. 2. Location of the study area.



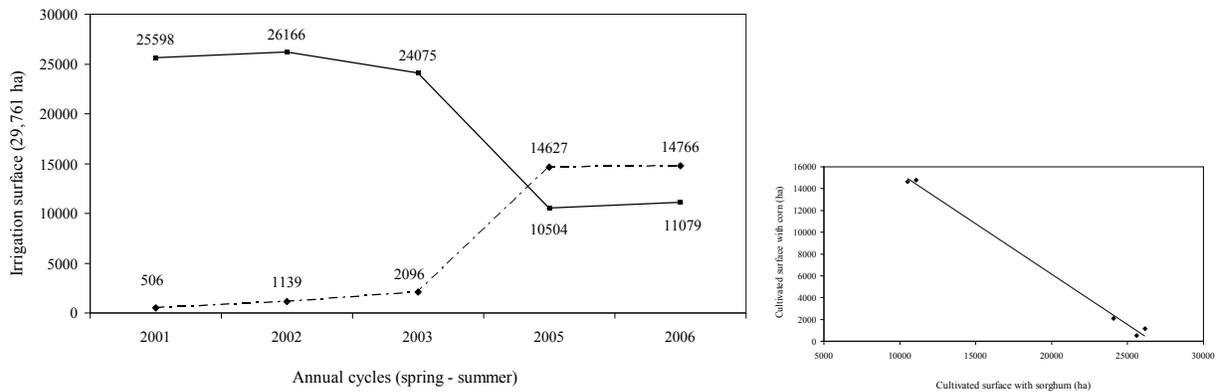
a) Surface cultivated with corn (--◆--) and sorghum (—■—), b) Relationship between cultivated surfaces, each point is an agricultural cycle.

Fig. 3. Dynamics of land use change between corn and sorghum in modules 1 and 2 in different agricultural cycles.



a) Surface cultivated with corn (--◆--) and sorghum (—■—), b) Relationship between cultivated surfaces, each point is an agricultural cycle.

Fig. 4. Dynamics of land use change between corn and sorghum in module 4 in different agricultural cycles.



a) Surface cultivated with corn (--◆--) and sorghum (—■—), b) Relationship between cultivated surfaces, each point is an agricultural cycle.

Fig. 5. Dynamics of the land use change between corn and sorghum in modules 1, 2, 3, and 4 in different agricultural cycles.

Pattern of annual crop cycles (2001, 2002, 2003, 2005 and 2006)

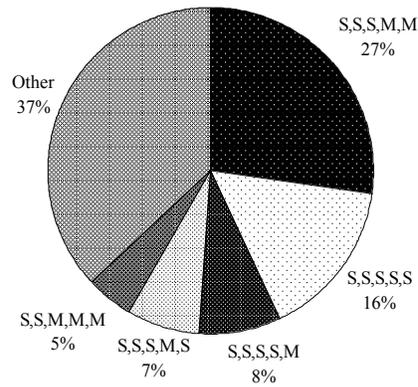


Fig. 6. Frequency of use patterns (S=sorghum, M=maize) of the Third Unit of Technical Assistance.

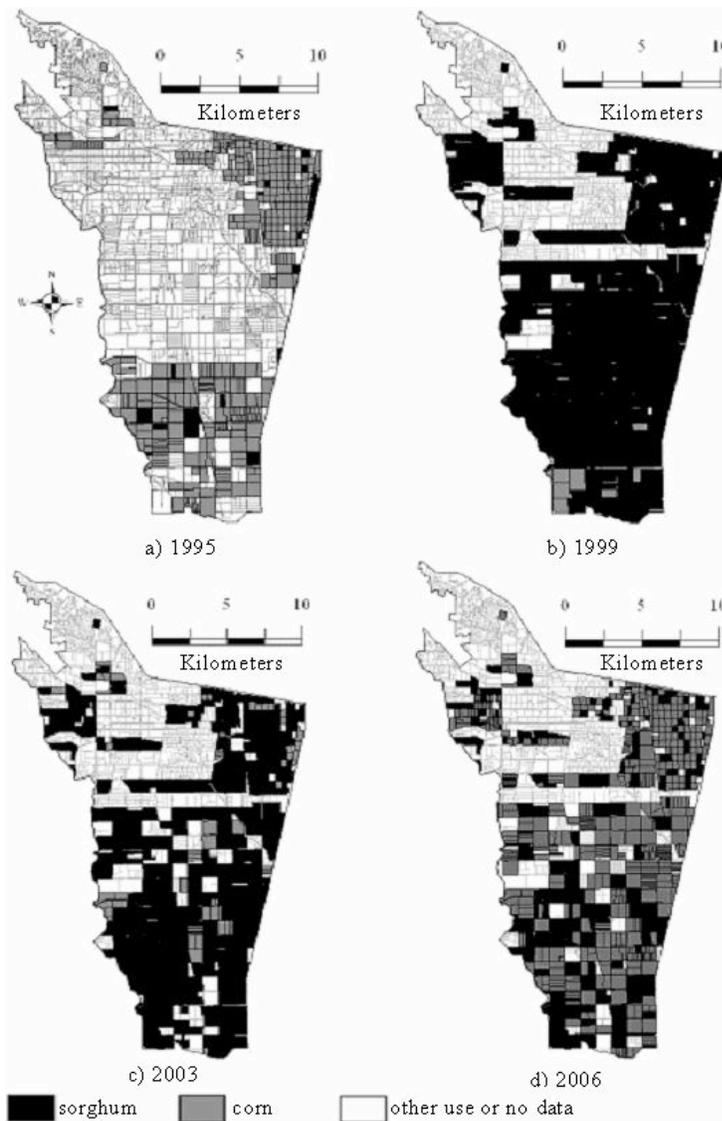


Fig. 7. Dynamics of changes of land use present in Third Unit of Technical Assistance in different time of period.

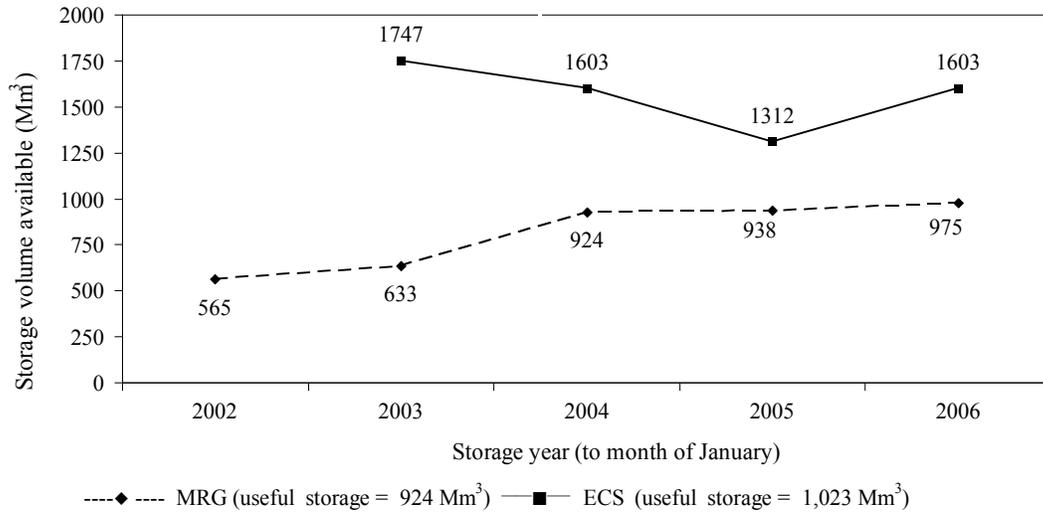


Fig. 8. Registry of useful stored volume in the MRG and CS dams, before the spring-summer agricultural cycle in the ID-026

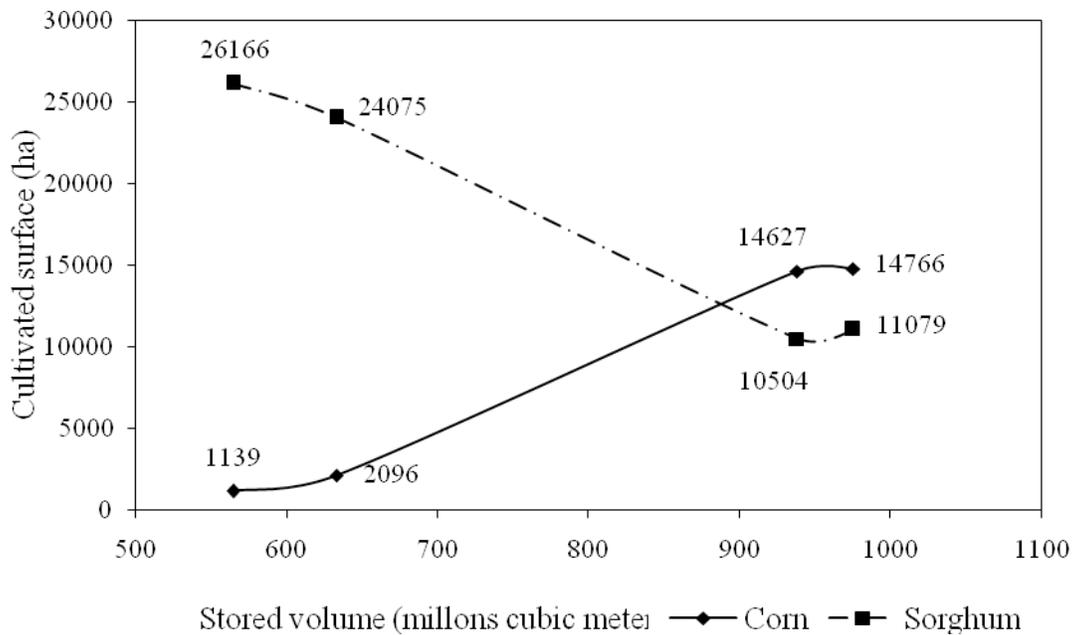


Fig. 9. Relationship between the useful stored volume in the MRG dam and the surface cultivated in the Third Unit of Technical Assistance.

## CAPITULO III

### MODIFICACION DE LAS PROPIEDADES EDAFICAS POR EL CAMBIO DEL REGIMEN DE HUMEDAD EN EL SUELO

## MODIFICACION DE LAS PROPIEDADES EDAFICAS POR EL CAMBIO DEL REGIMEN DE HUMEDAD EN EL SUELO

Edgar Vladimir Gutiérrez-Castorena<sup>a,\*</sup>, M. del C. Gutiérrez-Castorena<sup>a</sup>, C.A. Ortiz-Solorio<sup>a</sup>,

<sup>a</sup> Soil Science Programme, Colegio de Postgraduados, Montecillos, Texcoco 56230, México.

### Resumen

México cuenta con importantes áreas de riego en la frontera norte, donde algunas de ellas destinadas a la producción de granos han pasado a través del tiempo por diversos regímenes de humedad. La irrigación ha influido en los procesos de formación del suelo, y las investigaciones relacionadas con el tema han analizado los cambios en las propiedades edáficas ocasionados por el hundimiento y secado en la sección de control. Los suelos estudiados se encuentran en el Distrito de Riego 026 y en el Distrito agrícola de temporal del estado de Tamaulipas, los diferentes regímenes de humedad del suelo involucrados en el resiente estudio parten del arídico (agricultura de temporal), ústico (agricultura de riego, de uno a tres riegos) y llegan al údico (agricultura de riego + humedad proveniente del canal de riego principal), en un periodo de 50 años y bajo diferentes manejos con y sin drenaje parcelario. Los objetivos planteados en la investigación son: 1) determinar los cambios en las propiedades edáficas (físicas y químicas), y estudiar la mineralogía y micromorfología de suelos en agricultura de temporal y de riego; 2) evaluar el tamaño de partículas y agregados bajo diferente intensidad de humedad (temporal, riego y saturación); y 3) establecer la clasificación taxonómica de suelos con y sin alteración del régimen de humedad. Los resultados muestran que la capa arable en suelos bajo sistemas de labranza convencional en agricultura de riego o temporal, con o sin la incorporación de residuos de cosecha ó con y sin la instalación de drenaje parcelario, presentan las mismas características físicas, químicas, mineralógicas y micromorfológicas. En contraste, los suelos bajo condiciones de saturación registran mayor actividad biológica, presencia de cristales aciculares de carbonato de calcio, procesos de hidromorfismo y agregación de partículas en agregados > de 2 mm de diámetro. Asimismo, la clasificación de los suelos pasa de Aridisoles a Inceptisoles con procesos de carbonatación en horizontes subsuperficiales.

Palabras Clave: Agregación de partícula, Clasificación taxonómica de suelos, Distritos de Riego, Estabilidad de agregados en seco

## Summary

Mexico has important irrigation areas located alongside its northern border, where a good number of these destined to grain production, have experienced through time, different moisture regimes. Irrigation is an agricultural practice influencing soil formation processes (Birkeland, 1999), and research related to such an issue, have studied the effects of this practice (wet-dry) in soil properties within the control section (Triplett et al., 2008). The different soil moisture regimes identified in the area study of this research included the aridic (rain-fed agriculture), the ustic (irrigated agriculture), and the udic (irrigated agriculture plus moisture provided from neighboring irrigation channels), within a period of 50 years, and under different management and drainage conditions. The objectives of this research were: 1) to determine the changes in soil physical and chemical properties, to determine the mineralogy and micromorphology of rain-fed and irrigated agricultural soils, 2) to assess the particle size and aggregate size under different moisture conditions (rain-fed, irrigated, saturated), and 3) to establish the taxonomic classification of soils with and without alteration of the soil moisture regime. Results showed that the vadose zone of soils under conventional tillage, whether rain-fed or irrigated, with or without mulching, and with or without drainage, presented the same soil physical, chemical, mineralogical, and micromorphological characteristics. In contrast, soils under moisture saturation conditions presented biological activity, occurrence of  $\text{CaCO}_3$  needle-form crystals, hydromorphism, and particle aggregation over 2 mm of size. In addition the soil taxonomic classification of the area under study included aridisols and inceptisols with carbonation processes in subsuperficial horizons.

Keywords: particle size and aggregate size, taxonomic classification of soils, Irrigation District, Semi-arid soil, stability of aggregate on wet and dry.

## 1. Introducción

Los Aridisoles ocupan más de 12% de la superficie del mundo y generalmente no son aptos para el desarrollo de los cultivos. Sin embargo, cuando estos suelos son incorporados a la actividad agrícola con irrigación y uso de fertilizantes son altamente productivos; de hecho los más grandes distritos de riego se localizan en condiciones áridas y semiáridas (Brady y Weil, 1999).

México tiene importantes y muy productivos distritos de riego localizados en la frontera norte. El distrito de riego 026 así como el distrito de temporal localizados en el estado de Tamaulipas destinados principalmente a la producción de cereales, y presentan un régimen de humedad arídico. Estos distritos se incorporaron a la producción agrícola desde 1954 y han pasado por diversas etapas de condiciones de humedad: desde la aplicación de cuatro a cinco riegos en épocas de disponibilidad de agua (425 mm anuales) a solamente un riego (85 mm) en épocas de estiaje.

De acuerdo con Birkeland (1999), la irrigación altera al factor clima natural como procesos de formación. Las principales propiedades morfológicas y mineralógicas del suelo que se relacionan con el clima son el contenido de materia orgánica, contenido y tipo de arcilla, minerales de hierro, color, cationes solubles y la presencia o ausencia de carbonato de calcio y otras sales solubles. Asimismo, la irrigación causa cambios en la morfología y en las propiedades químicas, físicas y actividad microbiana del suelo como: pH, el sodio intercambiable (Dixon, 1960), contenido de carbono y nitrógeno (Leuking y Shepers, 1985), en la iluviación de arcilla (Presley et al., 2004), en la fabrica del suelo ( Khalifa et al., 1989; Hussein y Adey, 1998), en la superficie del suelo y su erodabilidad (Hussein et al., 1992), en las condiciones redoximórficas (Walter y Lin, 2008),y en la actividad microbiana (Kostopoulou y Zotos, 2005).

También se ha reportado que puede afectar negativamente a la estructura del suelo (De Campos et al., 2007; Kostopoulou y Zotos, 2005), modificar la distribución de los poros grandes (Carson y Pierce, 1955) y generar las condiciones para la neoformación de arcillas esmectíticas (Hassannezhad et al., 2008).

Algunos de estos estudios se han realizado de manera específica en Molisoles, Vertisoles, Alfisoles, Inceptisoles, Entisoles, Ultisoles, los cuales se caracterizan por presentar cambios drásticos en su morfología ocasionados por el humedecimiento y secado (Triplett et al., 2008); sin

embargo, los resultados no se pueden generalizar, porque el manejo de esos suelos es específico y por lo tanto, el conocimiento que se genere no es transferible.

La mayoría de los estudios de suelos que han analizado cambios en las propiedades edáficas por modificaciones en la humedad se han llevado a cabo con diferentes metodologías; por ejemplo, utilizando el simulador de lluvias (Martínez-Mena et al., 1998), por inundaciones (Hassannezhad et al., 2008), con riego por aspersión durante 31 años (De-Campos et al., 2009), y trabajando gradientes de humedad (Carlson and Pierce, 1954; Khormali et al., 2006). Otros colectan núcleos en estado húmedo (por lluvia) y en estado seco (Unger et al., 1998); o bien en diferentes estaciones (Armbrust et al., 1982). No obstante, no se han llevado a cabo investigaciones en campo donde se analicen las modificaciones en las propiedades físicas, químicas y mineralógicas bajo diferentes regímenes de humedad del suelo, partiendo desde arídico (agricultura de temporal), ústico (agricultura de riego, de uno, dos o tres riegos) hasta údico (agricultura de riego + humedad proveniente de los canales principales) dentro de un periodo de cinco décadas como en la zona de estudio; además, bajo diferentes manejos (con y sin la incorporación de materia orgánica), y con o sin drenaje agrícola parcelario instalado hace 15 años.

Los objetivos de la presente investigación son: 1. Determinar los cambios en las propiedades edáficas (físicas, químicas), y estudiar la mineralogía y micromorfología de suelos con agricultura de temporal y de riego; 2. Evaluar el tamaño de partícula y agregados bajo diferentes intensidades de humedad (temporal, riego, y saturación); y 3. Establecer la clasificación taxonómica de suelos con y sin alteración del régimen de humedad.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1. Área de estudio

El área de estudio se ubica en la parte noreste de la República Mexicana, en el estado de Tamaulipas. La entidad federativa es reconocida a nivel nacional por su actividad agrícola y producción de granos (maíz y sorgo) desde hace 40 años. Dentro de la región se encuentra ubicado en Distrito Agrícola de Riego 026 (DAR), además del Distrito Agrícola de Temporal (DAT). En la Figura 1 se reporta la localización geográfica de los distritos agrícolas tanto de temporal como de riego así como la posición de los sitios seleccionados.

Los suelos tienen un relieve regular con pendientes que varían entre 0.01 y 0.3%; sin afloramientos rocosos, ni pedregosidad; la superficie cuando seca presenta costras duras entre 2 y

5 mm; se encuentran a una altitud sobre el nivel medio del mar de 29.1 y 33.4 m; el drenaje interno es normal, mientras que el drenaje externo puede ser donador o receptor de escorrentías superficiales; el material parental es sedimentario, constituido por arenas depositadas por el viento (INE, 2007).

El Distrito Agrícola de Temporal cuenta con una agricultura convencional establecida durante décadas; la diferencia de manejo entre parcelas consiste en la incorporación de residuos de cosecha al suelos: El sorgo predomina en toda la agricultura de temporal con un ciclo vegetativo de 125 – 135 días; el periodo de siembra es de 15/enero a 25/mayo, la densidad de siembra es 16 semillas/m<sup>2</sup> y la preparación de las tierras es por tracción mecánica (roturación, subsuelo, rastreo, bordeo y contra bordeo).

El Distrito Agrícola de Riego tiene una agricultura convencional mecanizada desde su inicio; además, en algunos suelos fueron instalados sistemas de drenaje subterráneo con el objetivo de disminuir el efecto del nivel freático provocado por exceso de riegos o incursión de agua proveniente de los canales principales de riego o por condiciones edáficas particulares de cada parcela. A partir de 1994, el distrito entró en un periodo de déficit de humedad provocada por sequía, que generó cambios en el patrón de cultivos en la región (de maíz a sorgo), es decir, agricultores que incorporaban residuos de cosecha (maíz) al suelo, se vieron en la necesidad de hacer pacas para alimento del ganado, empobreciendo aun más las condiciones edáficas del distrito.

Dentro de cada tipo de manejo, fueron seleccionados suelos de la siguiente manera: dos perfiles de suelos en el DAT cultivados con sorgo durante los últimos 13 años, con y sin incorporación de los residuos de cosecha al finalizar cada ciclo agrícola; y cuatro suelos en el DAR. Dos suelos con agricultura de riego (perfiles DAR-NII y DAR-PI) que se localizan entre 50 m y 150 m de separación de los canales principales de riego (Guillermo Rode y Anzaludua), lo que incrementa la humedad en todo el perfil durante un periodo de 6 meses; además, los perfiles tienen un manejo de no incorporación de residuos de cosecha en cada ciclo agrícola y no cuentan con drenaje agrícola, y otros dos DAR-FI, y DAR-JFI que se encuentran a 1500 m de separación del canal principal Guillermo Rode, y se abastecen de humedad mediante la aplicación de riegos, con manejo de incorporación de residuos de cosecha y uno con y otro sin instalación de drenaje artificial.

## *2.2. Obtención de muestras*

En cada sitio de muestreo se excavaron pozos pedológicos y se describieron morfológicamente con base en el manual de Cuanalo (1990). Se colectó información de clima, topografía, vegetación, tiempo de manejo y material parental. Se tomaron muestras alteradas por horizonte genético de cada perfil para los análisis de laboratorio y muestras inalteradas para la elaboración de secciones delgadas de suelos hasta una profundidad de 1.20 m, para determinar el espacio poroso.

## *2.3. Análisis de laboratorio*

Las muestras alteradas fueron secadas a temperatura ambiente bajo sombra y posteriormente molidas y tamizadas con malla # 30. Los análisis físicos y químicos realizados fueron: textura (método de la pipeta), color en seco y en húmedo (tabla de colores Munsell), densidad aparente (parafina), carbón orgánico (Walkley y Black), reacción del suelo (pH) en agua (relación agua:suelo 1:2); carbonatos totales  $\text{CaCO}_3$ ; capacidad de intercambio catiónico y bases intercambiables, por el método de acetato de amonio (Ca y Mg por titulación y, Na y K por absorción atómica); saturación de bases a partir de la suma de bases intercambiables y fósforo soluble en ácido cítrico. Todas las metodologías fueron extraídas del Manual de Procedimientos Analíticos para Suelos de Van Reeuwijk (2003).

## *2.4. Análisis mineralógico de la fracción de arcillosa*

La fracción arcillosa ( $< 2 \mu\text{m}$ ) se obtuvo primero separándola de arenas y limos por tamizado y el residuo se colocó en probetas para la suspensión del material fino. No se eliminó la materia orgánica (porque los suelos presentaron un bajo contenido), ni los carbonatos de calcio para determinar su naturaleza calcárea. Después de 24 h de sedimentación se colectó un alícuota de arcilla suspendida y se depositó en un portaobjeto para provocar que se orienten. Las muestras se analizaron en un difractómetro de rayos X (GBC) con un tubo de cobre y radiación  $\text{CuK}\alpha$ . La interpretación de los difractogramas se realizó con base en los cuadros de reflexión de minerales y filosilicatos del programa ICCD (2002).

## *2.5. Análisis micromorfológico*

Las muestras inalteradas se secaron al aire y se impregnaron con resina poliéster y monómero de estireno en una relación de 7:3; posteriormente, se dejaron en gelación a la sombra por un lapso de dos meses. Una vez endurecidas se cortaron con un disco de punta de diamante y se procedió a fijarlas a un vidrio (portaobjeto) cuyas dimensiones fueron 7.5 cm x 6 cm. Las muestras se pulieron con diversos abrasivos: primero con carburo de silicio y el acabado final con Bauxita, hasta tener un espesor de 30  $\mu\text{m}$  (Murphy, 1986), que se corroboró por el blanco o gris de primer orden del cuarzo. Las secciones delgadas fueron analizadas con un microscopio petrográfico marca Olympus Bx52, y se describieron con base en el Manual de Descripción de Secciones Delgadas de Suelos de Bullock et al. (1985) y de Stoops (2003). Asimismo, se tomaron fotografías con una cámara canon reflex para cada uno de los microconstituyentes (poros, agregados, minerales, y fabricas- birrefringentes).

## *2.6. Análisis de distribución de partículas en agregados*

El análisis de distribución de partículas y estabilidad de agregados se determinó en seco. Se llevó a cabo el siguiente procedimiento: se colocaron 100 g de suelo sin tamizar en una serie de tamices (torre) con diámetro de apertura: 10, 20, 18, 35, 60, 150, 200, 300 y colector (apertura de malla en mm: 2, 0.841, 0.5, 0.25, 0.105, 0.074, 0.053, <0.053, respectivamente); después se aplicó una vibración con amplitud de 2 mm durante 5 min, al finalizar el tiempo se peso los tamices con suelo. Posteriormente, se empleó otra vibración de igual amplitud con una duración de 2 min registrando nuevamente el peso de los tamices con suelo. La prueba finalizó cuando no se registró variación en el peso de los tamices respecto al peso anterior. Con la información obtenida se determinó el diámetro medio geométrico y la desviación estándar geométrica de las partículas de cada muestra.

## *2.7. Clasificación de suelos*

Los suelos se clasificaron con base en la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 2006) y la estimación de los regímenes de humedad y temperatura para la sección de control se obtuvieron a partir de datos climáticos de temperatura y precipitación reportados por la estación meteorológica de Río Bravo, Tamaulipas y se empleó el modelo de Newhall (Van Wambeke, 2000).

### 3. Resultados

#### 3.1. Propiedades edáficas

Los análisis físicos y químicos de los suelos agrícolas de temporal con diferente sistema de manejo se reportan en el Cuadro 1 y Figura 2.

*Suelos agrícolas de temporal*, con incorporación de residuos de cosecha (DAT-AI), son suelos que tienen una capa arable (0 - 33 cm), pardo a pardo oscura, de textura migajón arcillo arenosa a arcillosa; mientras que los suelos (DAT-NI), sin incorporar residuos de cosecha (sorgo), la capa arable (0 - 30 cm) es pardo a pardo oscura, de textura migajón arcillo arenosa a arcillosa. En ambos suelos, el tamaño de partícula tiene una distribución regular con la profundidad; en donde, el porcentaje de arena disminuye (de 57 a 30%) y el porcentaje de arcilla se incrementa (de 32 a 50%).

El contenido de materia orgánica (MO), de DAT-AI de la capa arable, fue alto (entre 3.6 y 6.0%) con una disminución regular con la profundidad (entre 0.6 y 1.5%); mientras que, en los suelos DAT-NI, en sus horizontes superficiales y subyacentes fue bajo. A pesar de que la incorporación de residuos fue disminuida cuando se presentó el problema de déficit de agua en la región, su incorporación constante en DAT-AI incrementó el contenido de MO. La densidad aparente presentó el mismo comportamiento regular de 1.53 g cm<sup>3</sup> en el horizonte superficial (0 - 33 cm) a 1.43 g cm<sup>3</sup> en el horizonte subyacente (64 - 110 cm).

En cuanto al porcentaje de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>), y Ca<sup>2+</sup> intercambiable, en ambos perfiles se incrementan regularmente con la profundidad, de muy bajo (<0.5%) a alto (40%) en el primero, y alto (>10 cmol(+) kg<sup>-1</sup>) en el segundo.

Esto significa que suelos que no son irrigados, con o sin la incorporación de residuos de cosecha como fuente de materia orgánica, generan un incremento de MO; sin embargo, no ha sido lo suficiente para disminuir la densidad aparente. El incremento regular de los carbonatos de calcio con la profundidad significa que hubo un proceso de iluviación; sin embargo, no están cementando a las partículas.

*Suelos agrícolas de riego separado de canales de riego*. Los análisis físicos y químicos de los suelos agrícolas de riego con y sin drenaje agrícola, y con y sin incorporación de MO se reporta en el Cuadro 2 y en la Figura 3 (DAR-FI y DAR-JFI).

El contenido de materia orgánica en los perfil DAR-FI y DAR-JFI decreció regularmente con la profundidad, de mediano contenido en la capa arable hasta muy bajo en los sub-

horizontes. De igual forma, su densidad aparente decreció al pasar de 1.58 a 1.52 g cm<sup>3</sup> y de 1.64 a 1.46 g cm<sup>3</sup> respectivamente.

El contenido de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) y calcio intercambiable (Ca<sup>2+</sup>) en los perfiles DAR-FI Y DAR-JFI también tienen un comportamiento regular con la profundidad, de mediano a alto contenido (>10 cmol (+) kg<sup>-1</sup>).

Es notorio que los suelos agrícolas bajo riego, presentaron el mismo comportamiento que los suelos de temporal. aun cuando en teoría se esperaba que presentaran diferencias en las propiedades edáficas.

*Suelos agrícolas de riego cercanos a canales principales.* Los suelos agrícolas con y sin drenaje, sin incorporación de MO y cercanos a los canales principales se reportan en el Cuadro 2 y en la Figura 4 (DAR-NII y DAR-PI). En los suelos de los perfiles DAR-NII y DAR-PI, el contenido de materia orgánica decreció con la profundidad, de mediano en la capa arable (0 – 23 cm) a muy bajo en los horizontes subsuperficiales (76 - 113 cm de profundidad). Este comportamiento es igual a los otros suelos; sin embargo, se encontraron diferencias en la densidad aparente, propiedad que se incrementó de 1.58 en la capa arable a 1.69 g cm<sup>3</sup> hasta el límite inferior de 109 cm de profundidad, y de 1.65 a 1.86 g cm<sup>3</sup> en horizonte subsuperficiales (76 a 113 cm profundidad) respectivamente.

El contenido de carbonato de calcio y calcio intercambiable en los perfiles DAR-NII y DAR-PI se incrementó con la profundidad de un contenido mediano en la capa arable hasta alto (rango de 16 a 40%) a profundidad de 76 a 113 cm; mientras que, para el calcio intercambiable se mantuvo en alto (> 10% Ca<sup>2+</sup>) en todo el espesor de los perfiles.

### 3.2. Mineralogía de arcillas

Los suelos estudiados presentaron la misma mineralogía, ya que se encontró que estaban constituidos principalmente por cuarzo (3.33 A<sup>0</sup>) y calcita (3.02 A<sup>0</sup>); sin embargo, son inversamente proporcionales; es decir, las reflexiones de cuarzo que son dominantes en el horizonte superficial (de 0 a 33 cm), y las reflexiones de la calcita dominan en los horizontes subsuperficiales (de 33 a 110 cm; Figura 5).

Los materiales secundarios son arcillas 2:1 ó 1:1, tanto en suelos de agricultura de temporal como bajo riego en cada horizonte genético. Tentativamente se tiene vermiculita (14.2 A<sup>0</sup>),

montmorillonita (14.76 A<sup>0</sup>) y biotita (10.06 A<sup>0</sup>) y con menor intensidad kaolinita (7.05 A<sup>0</sup>) (Figura 5).

### *3.2.1. Micromorfología en agregados*

Se presentaron principalmente estructuras masivas y de micro-agregados entre granos en los suelos de temporal con incorporación de MO y bajo riego (Figura 6a). Se observaron canales rellenos de excrementos en todos los suelos y a lo largo de perfil, excepto en DAR-FI (Figura 6b). La mineralogía está compuesta principalmente por cuarzo (macro y policristalino) y calcedonia, además, de calcita micrítica de forma sub-redonda y sub-angular, producto de la erosión eólica.

La masa basal de los suelos en estudio no varió mucho; se presentó una fábrica- b moteada en los horizontes superficiales y cristalítica en los horizontes sub-superficiales (Figura 6c). Los rasgos podológicos que se observaron fueron hipo-revestimientos, nódulos típicos y concéntricos y agujas de calcita, lo que indica que el proceso de formación de suelos fue la iluviación de carbonatos.

### *3.3. Distribución de partículas y agregados del suelo*

La distribución por tamaño de partícula en suelos con agricultura de temporal (Figura 7) muestra que la capa arable (0 – 33 cm) presenta partículas de 0.105 mm de diámetro con una frecuencia entre 34 y 37%; mientras que las partículas de 0.841 mm representaron menos de 1%. Con incremento en la profundidad (hasta 115 cm), las partículas se aglutinaron formando agregados mayores de 2.0 mm constituyendo hasta 45% de su peso.

El diámetro geométrico medio y la desviación estándar geométrico del peso se incrementó con la profundidad en cada horizonte, de manera que, en la capa arable inició con 0.16 y 0.21 mm aumentando su diámetro en 0.41 mm y finalizando en 0.62 mm a la profundidad de 115 cm. Mientras que, la desviación geométrica del peso hasta la profundidad de 64 cm vario entre 2.88 y 2.42 mm, y se incrementó a la profundidad entre 64 – 115 cm con 4.33 y 4.13 mm.

En el caso de suelos agrícolas de riego, con incorporación de materia orgánica, con y sin la instalación de drenaje artificial y retirados de los canales principales de riego (DAR-FI y DAR-JFI respectivamente), presentaron partículas en la capa arable de 0.105 mm (27 y 36% del peso) y partícula de 0.841 mm (menos de 0.35%). Con el incremento en la profundidad, el tamaño aumentó hasta desarrollar agregados mayores de 2.0 mm (28 y 36%; Figura 8). Por lo tanto, el

diámetro geométrico pasó de 0.2124 a 0.4543 mm y la desviación geométrica del peso por clase de tamaño fue de 3.08 y 4.23 mm, respectivamente.

Los suelos de DAR-NII presentaron el mismo comportamiento; sin embargo, los agregados mayores de 2.0 mm constituyen 59% de la muestra y el diámetro geométrico medio de partículas y agregados pasó de 0.3105 mm a 0.7532 mm y la desviación geométrica fue de 3.69 mm a 4.08 mm (Figura 9).

Con respecto a los suelos cercanos al canal de riego (DAR-PI), las partículas se aglutinan desde la capa arable en agregados mayores de 2.0 mm (37% del peso de la muestra) y se incrementa con la profundidad (de 43 hasta 75% del peso). El diámetro geométrico medio pasó de 0.45 a 0.81 mm con una desviación de 4.64 y 3.06 mm respectivamente (Figura 9).

### 3.4. Clasificación de suelos

El régimen de humedad el suelo (RH) es arídico y el régimen de temperatura hipertérmico (anexo A-2). En la mayoría de los suelos estudiados se presentó un epipedón ócrico (horizonte superficial “Ap” ó capa arable) entre 0 y 33 cm, debido a que presentan colores claros y consistencias duras y un horizonte cálcico (Bk) entre 64 y 110 cm de profundidad, por la acumulación de mas de 15% de  $\text{CaCO}_3$  secundario (anexo A-1). En caso de los suelos DAR-JFI, se presentó un epipedón ócrico entre 0 y 40 cm de profundidad y un horizonte cámbico (Bw) entre 40 y 110 cm de profundidad.

Los suelos del distrito agrícola de temporal fueron clasificados como *Petronodic Haplocalcids* (DAT-AI, DAT-NI); mientras que, los suelos con una agricultura de riego como *Petronodic Ustic Haplocalcids* (DAR-FI, DAR-NII y DAR-PI) y *Ustic Haplocambids* (DAR-JFI). Sin embargo, debido a la aplicación de riegos, el régimen de humedad se tornó a ústico y la clasificación de los suelos se modificó a *Typic Calciustepts* (DAR-FI, DAR-NII y DAR-PI) y a *Typic Haplustepts* (DAR-JFI).

## 4. Discusión

### 4.1. Cambios en las propiedades edáficas

Tanto los distritos agrícolas de temporal como los distritos de riego han sido manejados durante los últimos 50 años con labranza convencional; la diferencia entre ellos está relacionada con la agregación de residuos de cosecha, la manera de preparar las tierras y la aplicación de

riegos. En ambos distritos la incorporación de MO ha incrementado su contenido (hasta 3.95%); sin embargo, no se ha traducido en una modificación de la estructura ni de la densidad aparente tal como ha sido señalado por otros autores (Daraghme et al., 2009). Se esperaban modificaciones al menos a nivel de micro-estructura (Bullock et al., 1985); no obstante sólo se presentó una estructura apedal principalmente masiva con densidades mayor de  $1.5 \text{ g cm}^{-3}$ .

Una explicación es el manejo llevado a cabo por los productores quienes intensifican el uso de maquinaria agrícola hasta pulverizar el suelo junto con los residuos de cosecha. Debido a esto, no se forman microagregados de origen biológico en la capa arable de los distritos, excepto en los suelos cercanos al canal principal de riego. Esto significa que el proceso físico (contracción) domina al proceso biológico en la formación de agregados (Pape y Lager, 1995).

Cuando se analizó la densidad aparente (Dap) se encontraron relaciones directas con el contenido de humedad e inversas con el contenido de MO y actividad biológica. Los suelos de riego cercanos a los canales, registraron una densidad aparente alta en los horizontes sub-superficiales. A nivel micromorfológico se observó que los poros están rellenos con carbonato de calcio, lo que no se apreció en suelos de temporal ni de riego retirados del canal.

No se modificó el pH, ni el porcentaje de sodio intercambiable; se incrementaron regularmente el carbonato de calcio y el contenido de arcilla. Estos resultados son diferentes a los reportados por Presley et al. (2004), quienes indican que los cambios importantes en Mollisoles fueron pH, sodio intercambiable e iluviación de arcilla, y no afectó el contenido de carbono orgánico ni el de carbonato de calcio.

#### *4.2. Formación de agregados por cambios en el régimen de humedad*

Las partículas con un diámetro de 0.84 mm no se presentan en la capa arable, pero se encontraron partículas mayores y menores a este diámetro. Este tamaño de partícula es el límite entre agregados estables o susceptibles a la erosión eólica (Chepil, 1942). En suelos de temporal o de riego se tienen 86% y 93% de partículas erodables; mientras que en suelos cercanos a los canales, las partículas se redujeron a 62%. Martínez-Mena et al. (1998), indican que la estabilidad de los agregados en condiciones húmedas es más alta que en condiciones secas (85%) utilizando el simulador de lluvias. Woodruff y Siddoway (1965) y Fryrear (1984) reportaron que el suelo es estable a la erosión eólica cuando tiene entre 60% y 75% de agregados mayores a 0.84 mm. Lo anterior significa que solamente los suelos cercanos a los canales principales no tienen problemas de erodabilidad, el resto es altamente susceptible (SEMARNAP-CP, 2002).

Cuando los suelos están en descanso, el impacto del viento es mínimo porque se forman terrones; sin embargo, cuando los suelos son pulverizados por labranza, los agregados se rompen con el impacto de las gotas de lluvia y sellan la superficie (Unger et al., 1998). Las arenas son arrastradas por el viento y depositadas en linderos o barreras rompevientos, en tanto que las arcillas forman agregados estables, aunque erodables, son muy grandes para transportarse (Chepil, 1952).

El uso de la labranza mínima se recomienda para mejorar la estructura del suelo Daraghmeah et al. (2009), incrementar el contenido de carbón orgánico y nitrógeno López-Fando y Pardo (2009), mientras que Norwood (1994), Peterson et al. (1996), Jones y Popham (1997) señalan que la labranza cero está siendo adoptada en cultivos de temporal de regiones semiáridas. De acuerdo con la experiencia de los productores, este tipo de prácticas genera una disminución en el rendimiento de los cultivos hasta 30%, debido a la formación de terrones masivos que impiden la germinación y el uso eficiente de la aplicación de los riegos, al percolar gran cantidad. Asimismo, mencionan que para evitar la erodabilidad de sus suelos, emplean de nuevo la mecanización con el objeto de romper y voltear las costras. Triplett et al. (2008), reportaron que el rompimiento de costras incrementa la cantidad de infiltración de agua.

En los horizontes subyacentes, se presentaron agregados mayores de 2 mm de diámetro, en suelo cercanos a canales de riego cuya intensidad fue hasta 75%. El contenido de MO es bajo (menor de 1 %), la textura es arcillosa, compuesta principalmente de arcillas 2:1 (vermiculita y montmorillonita) y con un alto contenido de carbonato de calcio; estos dos últimos actúan como agentes cementantes (Lyles and Woodruff, 1960; Chepil 1955). Se esperaba la misma cantidad y distribución de las clases y tamaños de partícula y agregados en todos los suelos estudiados, por que en teoría estos dos factores no están relacionados con el manejo. Sin embargo, cuando se agruparon los suelos con base en la presencia o ausencia de humedad, se encontró que la clase de tamaño de partícula es proporcional a la cantidad de humedad; es decir, suelos cercanos a los canales de riego registraron, desde la capa arable, agregaciones mayores de 2 mm.

#### 4.3. Clasificación de suelos

Los suelos de temporal se clasifican como *Petronodic Haplocalcids* y por el cambio del régimen de humedad como *Petronodic Ustic Haplocalcids* y *Ustic Haplocambids* (cuando los suelos están sometidos a dos riegos) y como *Typic Calciustepts* o *Typic Haplustepts* (cuando se

aplican tres o mas riegos). Esto significa que el cambio del régimen de humedad en los suelos modificó su clasificación en un periodo menor de 50 años.

De acuerdo con Jenny (1941), la formación de suelos está en función del clima, biota, relieve, material parental y tiempo; en tanto que Gaucher (1981) indica que se debe de incluir el factor manejo (m) ya que el hombre está acelerando la modificación de las propiedades del suelo.

Por otra parte, el material parental de los suelos de estudio es sedimentario de naturaleza calcárea (INE, 2007). El proceso de iluviación de carbonatos ocurre en todos los suelos estudiados, de ahí que se incremente su contenido de manera regular con la profundidad (de 6% a 23%). No obstante, los suelos cercanos a los canales presentaron revestimientos y calcita acicular en los poros de conducción; es decir, se presentó mas carbonato de calcio secundario por procesos de disolución y depositación. Khormali *at al.* (2006), reportaron que los cristales aciculares se presentan en un régimen de humedad ústico, mientras que los revestimientos y los nódulos de calcita micrítica en ambientes áridos.

Otro proceso que se presentó en los suelos fue el de óxido – reducción, por la presencia de nódulos e hipo-revestimientos de óxidos de Fe. De acuerdo con Veneman et al. (1976), la ocurrencia de estos rasgos redoximórficas implica que los suelos han estado sometidos a un hidromorfismo moderado. El riego por si solo no genera condiciones de saturación porque todos los suelos tienen un buen drenaje, pero sí con la incursión de agua a través de los canales de riego, proceso que ocurre en un periodo mínimo de 6 meses en años normales.

Los suelos estudiados han sido clasificados como Vertisoles (INEGI, 1995) por su alto contenido de arcilla (arriba de 45%) y presencia de grietas; no obstante, no se observaron superficies de deslizamiento en campo ni en secciones delgadas (poros o grano estrías), requisito obligado para su designación (Soil Survey Staff, 2006). Los suelos son arcillosos de naturaleza montmorillonita; sin embargo, no presentan propiedades vérticas. Karathanasis y Hajel (1985) encontraron que algunos factores pueden influir en la no expansión y contracción de las arcillas, específicamente debido al espesor del suelo, textura, estructura del subsuelo, drenaje del suelo y vegetación. El alto contenido de carbonato y un régimen de humedad de suelo a ústico puede estar inhibiendo los procesos vérticos y en los suelos de temporal falta la humedad para que se de la alternancia de los periodos secos y húmedos característicos de los Vertisoles.

## 5. Conclusiones

Los suelos bajo sistema de labranza convencional en agricultura de temporal o riego, con o sin la incorporación de residuos de cosecha o con la instalación de drenajes agrícolas subterráneos, presentan las mismas características físicas, químicas, mineralógicas y micromorfológicas. En contraste, los suelos bajo condiciones saturación por la cercanía a los canales principales de riego, registran modificaciones en la actividad biológica (canales de mesofauna), y cristales aciculares de carbonatos de calcio, procesos de hidromorfismo y agregación en partículas mayores de 2 mm.

La clase de tamaño de partícula y agregados en los suelos dentro de la capa arable no se modificó por la incorporación de la materia orgánica, pero si por el uso intensivo de maquinaria agrícola.

La clasificación y los procesos de formación de suelos se alteraron o se intensifican con el cambio del régimen de humedad (de arídico a ústico): de Aridisoles a Inceptisoles y carbonatación con mayor número de rellenos y acículas micríticas de carbonato de calcio.

## Literatura citada

- Armbrust, V.D., Dickerson, J.D., Skidmore, E.L., and Rus, O.G., 1982. Dry soil aggregation as influenced by crop and tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:390-393.
- Birdkeland, P.W., 1999. *Soil and geomorphology* 3<sup>rd</sup> ed. Oxford University Press, New York.
- Brady, N.C. and Weil, R.R., *The nature and properties of soil* 12a ed. Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey.
- Bullock, P., Jongerius, A., Tursina, T., Federoff, N., Stoops, G., Babel, U., 1985. Manual para la descripción micromorfológica de suelos. Gutiérrez Ma. De C., Ortiz, C.A., (Trads). Colegio de Postgraduados. Montecillos, Texcoco, México.
- Carlson, C.A. and Pierce, R.S., 1955. The field maximum moisture content. Division V.A.-forest and Range soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 19:81-83.
- Chepil, W.S., 1942. Relation of wind erosion to water stable and dry clod structure of soil. *Soil Sci.* 55:275-287.
- Chepil, W.S., 1952. Factors that influence clod structure and erodability of soil by wind: I. soil Texture.
- Chepil, W.S., 1955. Factors that influence clod structure and erodability of soil by wind: V. Organic matter at various stages of decomposition. *Soil Sci.* 80:413-421.
- Cuanalo, C.H., 1990. Manual para la descripción de perfiles en el campo. 3er ed. Colegio de Postgraduados. Chapingo. México.

- Daraghmeh, O.A., Jensen, J.R., Peterson, C.T., 2009. Soil Structure stability under conventional and reduced tillage in a sandy loam. *Geoderma* 150:64-71.
- De-Campos, A., Mamedov, A.I., Huang, C., 2009. Short-Term reducing conditions decrease soil aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73:550-559.
- De Both, M., De Leenheer, L., Don Kirkham, 1960. Soil aggregate stability indexes and crop yields. State Agriculture University Ghent and Iowa State University.
- Dixon, R.M., 1960. The effects of irrigation on the chemical properties of some north central and southwestern Kansas soils. M.S. Tesis Kansas State Univ., Manhattan.
- Ducloux, J., Gueri, Y., Fallavier, P., 1998. Clay particle differentiation in alluvial soils of southwestern Niger (West Africa). *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:212-222.
- Fryrear, D.W., 1984. Soil rides-clods and wind erosion. *Trans. ASAE* 27:445-448.
- Gaucher, G., 1981. Les facteurs de la Pédogénèse. G. Lelotte, Dison. 730 pp.
- Hassannezhad, H., Pashae, A., Khormali, F., Mohammadian, M., 2008. Effect of soil moisture regime and rice cultivation on mineralogical characteristics of Paddy soil of Mazandaran Province, Northern Iran, Amol. *International Journal of Soil Science.* 3 (3):138-148.
- Hussein, J., Adey, M.A., Elwell, H.A., 1992. Irrigation and dryland cultivation effects on the surface properties and erodability of a Zimbabwe vertisol. *Soil Use Manage.* 8:96-103.
- Hussein, J. and Adey, M.A., 1998. Changes in microstructure, voids and b-fabric of surface samples of a vertisol caused by wet/dry cycles. *Geoderma* 85:63-82.
- INE, 2007. Condiciones generales del ambiente en la frontera norte de México. Instituto Nacional de Ecología. <http://www.ine.gob.mx/publicaciones/libros/109/cap2.html> Consultado el 20 de agosto del 2009.
- INEGI, 1995. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Síntesis Geográfica y Estadística de Tamaulipas, México.
- Jenny, H., 1941. Factors of soil formation: A system of quantitative pedology. McGraw-Hill, New York.
- Jones, O.R. and Popham, T.W., 1997. Cropping and tillage systems for dryland grain reduction in the southern High Plains. *Agron. J.* 89:222-232.
- Karathanasis, A.D. and Hajek, B.F., 1985. Shrink-swell potential of montmorillonitic soil in udic moisture regimes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:159-166.
- Khalifia, E.M., Reda, M., Al-Awajy., 1989. Changes in soil fabric f torripsamments Ander irrigated date palms, Saudi Arabia. *Geoderma* 44:307-317.
- Khormali, F., Abtahi, A., Stoops, G., 2006. Micromorphology of calcitic features in highly calcareous soil of Fars Province, Southern Iran. *Geoderma* 132:31-46.
- Kostopoulou, S.K. and Zotos, A., 2005. The effect of soil water content and microbial activity on restoring the structure of a Vertisol. *Soil & Tillage Research.* 82:203-209.
- López-Fando, C. and Pardo, M.T., 2009. Changes in soil chemical characteristics with different tillage practices in a semi-arid environment. *Soil & Tillage Research.* 104:278-284.

- Lueking, M.A. and Shepers, J.S., 1985. Changes in soil carbonate and nitrogen do to irrigation development in Nebraska's Sandhills. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:15-24.
- Lyles, L.J. and Woodruff, N.P., 1960. Abrasive action of windblown soil on plant seedlings. *Agronomy Journal.* 2:533-563.
- Martínez-Mena, M., Williams, A.G., Ternan, J.L., Fitzjohn, C., 1998. Role of antecedent soil water content on aggregates stability in a semi-arid environment. *Soil & Tillage Research.* 48:1-80.
- Murphy, C.P., 1986. Thin section preparation of soil and sediments. AB. Academic Publishers. Great Britain.
- Norwood, C., 1994. Profile water distribution and grain yield as affected by cropping system and tillage, *Agron. J.* 86:558-563.
- Pape, Th. And Lager, 1994. Manual for soil description and classification. Department of Soil Science and Geology. Wageninggen Agricultural University. Wageninggen, Netherlands.
- Peterson, G.A., Schlegel, A.J., Tanaka, D.L., Jones, O.R., 1996. Precipitation use efficiency as affected by cropping and tillage systems. *J. Prod. Agric.* 9:180-186.
- Presley, D.R., Ransom, M.D., Kluitenberg, G.J., Finnell, P.R., Effects of thirty years of irrigation on the genesis and morphology of two semi-arid soil in Kansas. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1916-1926.
- Rymshaw, E., 1998. Análisis del desempeño de la irrigación en los distritos de riego Bajo Río Bravo y Bajo Río San Juan, Tamaulipas, México. IWMI. Serie Latinoamericana. 1, 1-45.
- Soil Survey Staff, 2006. Claves para la Taxonomía de Suelos. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Servicio de Conservación de Recursos Naturales. 10<sup>a</sup> ed. Ortiz, C.A. y Gutiérrez, Ma. del C. (Trads). Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.
- SRH, 1973. Características de los distritos de riego. Tomo I. Pacifico norte, Centro norte, Noreste. Secretaria de Recursos Hidráulicos, Distritos de Riego.
- SEMARNAT-CP, 2002. Evaluación de la Degradación del Suelo causada por el Hombre en la República Mexicana escala 1:250,000. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados, México.
- Triplett, Jr., Kingery, W., Shankle, M., 2008. Tillage effects on the soil moisture regime. In D.M. Endale (ed.) Proc. 30<sup>th</sup> Southern Conserv. Agric. Syst. Conf. and 8<sup>th</sup> Ann. Georgia Conserv. Prod. Syst. Trng. Conf., Trng. Conf., Tifton, Georgia.
- Unger, P.W., Jones, O.R., McClenagan, J.D., Stewart, B.A., 1998. Aggregation of soil cropped to dryland wheat and grain sorghum. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:1659-1666.
- Van Reeuwijk, 2003. Procedimiento para el análisis de suelos clasificación y correlación. Colegio de Postgraduados. Montecillos, Texcoco, México.
- Van Wambeke, A.R. 2000. The Newhall Simulation Model for estimating soil moisture and temperature regimes. Department of Crop Sciences. Cornell University, Ithaca, New York.

- Veneman, P.L.M., Vepraskas, M.J. and Bouman, J., 1976. The physical significance of soil mottling in a Einsconson toposecuence. *Geoderma* 15:103-118.
- Walker, C., and Lin, H.S. 2008. Soil property changes after four decades of wastewater irrigation: A landscape perspective. *Catena* 73, 63-74.
- Woodruff, N.P. and Siddoway, F.H., 1965. A wind erosion equation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 29:602-608.

Cuadro 1. Análisis físicos y químicos de los suelos del Distrito Agrícola de Temporal (DAT).

Perfil	Horizonte	Espesor (cm),	Tamaño de partículas (mm)			Textura	pH (H <sub>2</sub> O)	M.O. (%)	C.O. (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Dap (gr/cc)	Color		C.E. (dSm <sup>-1</sup> )	CIC (Cmol kg <sup>-1</sup> )	Cmol kg <sup>-1</sup>				Dgm (mm)	Sgw (mm)
			Arena (2-0.05)	Limo (0.05-.002)	Arcilla (<0.002)								Seco	Húmedo			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>		
DAT-AI	Ap	(0 – 14)	57	11	32	Migajón Arcillo Arenoso	7.7	3.95	2.33	4.19	18.25	1.53	10YR5/2	10YR4/3	0.43	29.68	17.48	1.16	0.23	1.74	0.20	2.88
	Ap	(14 – 33)	54	14	32	Migajón Arcillo Arenoso	7.9	3.90	2.17	4.62	16.96	1.53	10YR5/2	10YR4/2	0.46	26.52	18.86	1.06	0.23	1.74	0.16	2.4
	Bk	(33 – 64)	36	19	45	Arcilloso	8.0	0.99	0.61	16.30	10.47	1.44	10YR6/3	10YR5/3	0.37	25.60	22.66	1.68	0.23	0.70	0.40	4.33
	Bk1	(64 – 110)	30	20	50	Arcilloso	8.0	1.06	0.53	23.01	13.07	1.61	10YR7/3	10YR6/3	0.37	28.05	23.84	2.51	0.44	0.28	0.61	4.13
DAT-NI	Ap	(0 – 14)	58	10	32	Migajón Arcillo Arenoso	8.0	0.85	0.36	0.42	14.36	1.57	10YR5/2	10YR3/2	0.40	24.48	14.97	1.00	0.13	1.60	0.15	2.52
	Ap1	(14 – 30)	57	6	37	Arcillo Arenoso	7.9	1.06	0.53	0.41	14.36	1.66	10YR4/2	10YR2/2	0.47	22.13	13.12	1.10	0.13	1.60	0.14	2.19
	Bk	(33 – 75)	39	16	45	Arcilloso	8.0	0.78	0.45	12.79	7.88	1.48	10YR5/3	10YR5/3	0.47	29.27	16.15	1.32	0.34	0.70	0.45	1.23
	Bk1	(64 – 115)	32	17	501	Arcilloso	8.0	0.35	0.20	23.66	9.18	1.46	10YR7/3	10YR6/4	0.55	25.70	17.82	1.38	0.44	0.42	0.64	3.50

Cuadro 2. Análisis físicos y químicos de los suelos del Distrito Agrícola de Riego (DAR).

Perfil	Horizonte	Espesor (cm),	Tamaño de partículas (mm)			Textura	pH (H <sub>2</sub> O)	M.O. (%)	C.O. (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Dap (gr/cc)	Color		C.E. (dSm <sup>-1</sup> )	CIC (Cmol kg <sup>-1</sup> )	Cmol kg <sup>-1</sup>				Dgm (mm)	Sgw (mm)
			Arena (2-0.05)	Limo (0.05-.002)	Arcilla (<0.002)								Seco	Húmedo			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>		
DAR-FI	Ap	(0 – 16)	40	20	39	Arcillosa	8.1	2.40	1.35	5.91	15.66	1.58	10YR4/1	10YR3/1	0.65	30.40	18.33	3.54	1.17	2.43	0.21	3.08
	Ap1	(16 – 35)	41	17	42	Arcillosa	8.3	1.34	0.94	6.34	9.18	1.56	10YR4/1	10YR2/2	0.50	34.99	20.25	2.90	1.49	2.02	0.14	2.19
	Bk	(35 – 110)	30	22	48	Arcillosa	8.2	0.21	0.12	21.51	5.29	1.52	10YR7/1	10YR6/2	1.37	31.11	21.31	2.96	2.43	0.91	0.45	4.23
DAR-JFI	Ap	(0 – 22)	43	17	41	Migajón Arcilloso	8.1	1.62	0.94	3.87	14.36	1.64	10YR5/3	10YR3/1	2.07	31.82	17.18	3.19	2.22	2.71	0.21	2.94
	A	(22 – 40)	43	18	39	Arcillosa	8.0	0.99	0.57	3.98	14.36	1.57	10YR4/2	10YR3/2	3.78	35.70	15.39	2.80	2.95	2.02	0.28	4.14
	Bw	(40 – 110)	27	18	55	Arcillosa	8.1	0.56	0.32	10.32	2.69	1.46	10YR6/2	10YR5/2	5.35	30.91	19.69	2.42	6.30	1.12	0.62	3.83
DAR-NII	Ap	(0 – 21)	39	14	46	Arcilloso	8.2	1.84	1.10	6.56	46.78	1.58	10YR5/2	10YR4/1	0.45	29.58	18.26	3.37	1.70	1.95	0.31	3.69
	A	(21 – 36)	40	15	45	Arcillosa	8.0	2.33	1.26	6.02	46.78	1.59	10YR4/1	10YR4/2	1.06	28.25	19.61	3.70	2.32	1.95	0.31	3.97
	Bk	(36 – 109)	24	20	56	Arcillosa	8.0	1.06	0.61	20.54	10.47	1.69	10YR5/2	10YR6/3	0.95	41.51	18.70	4.49	1.80	0.77	0.75	4.08
DAR-PI	Ap	(0 – 23)	37	21	42	Arcillosa	8.3	0.85	0.49	12.79	16.96	1.65	10YR5/2	10YR4/2	0.51	34.17	14.86	2.74	0.65	1.95	0.45	4.64
	A	(23 – 55)	36	21	43	Arcillosa	8.2	1.41	0.81	9.68	22.14	1.64	10YR3/2	10YR3/2	0.88	57.43	18.68	2.75	0.96	1.67	0.46	4.87
	Bk	(55 – 76)	36	19	45	Arcillosa	8.1	0.92	0.53	10.00	11.77	1.61	10YR5/2	10YR4/2	1.16	27.03	22.79	2.84	1.28	1.25	0.81	3.56
	Bk1	(76 – 113)	31	21	48	Arcillosa	8.3	0.42	0.24	20.32	6.58	1.86	0YR7/1	10YR5/2	1.06	34.48	13.96	3.70	2.32	0.15	0.96	3.06

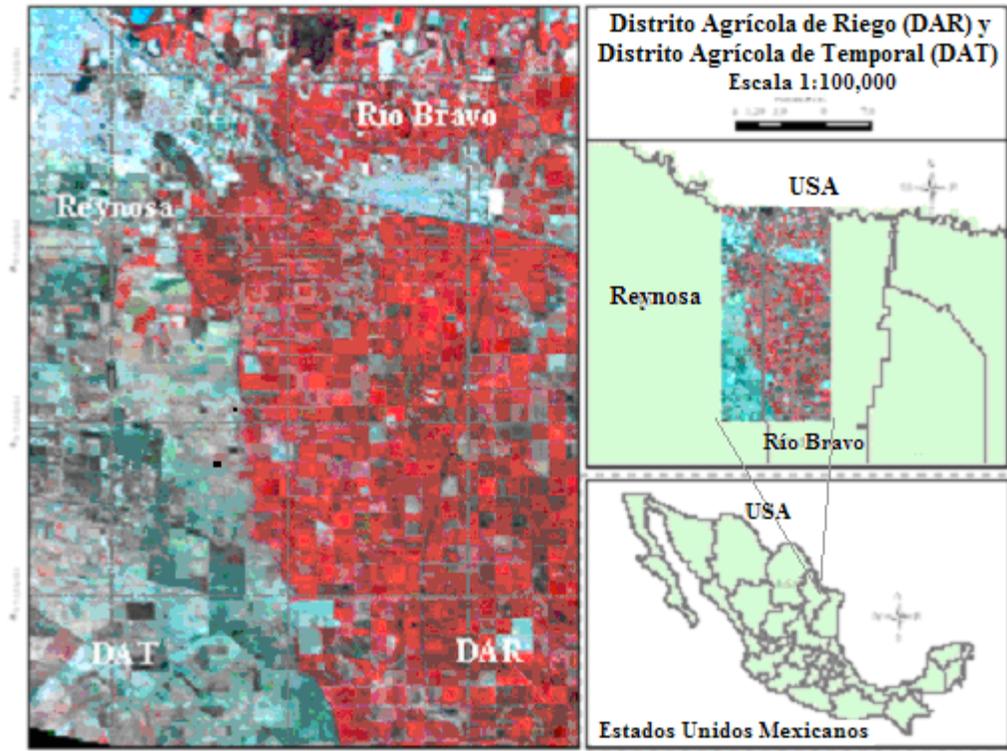


Figura1. Localización del área de estudio.

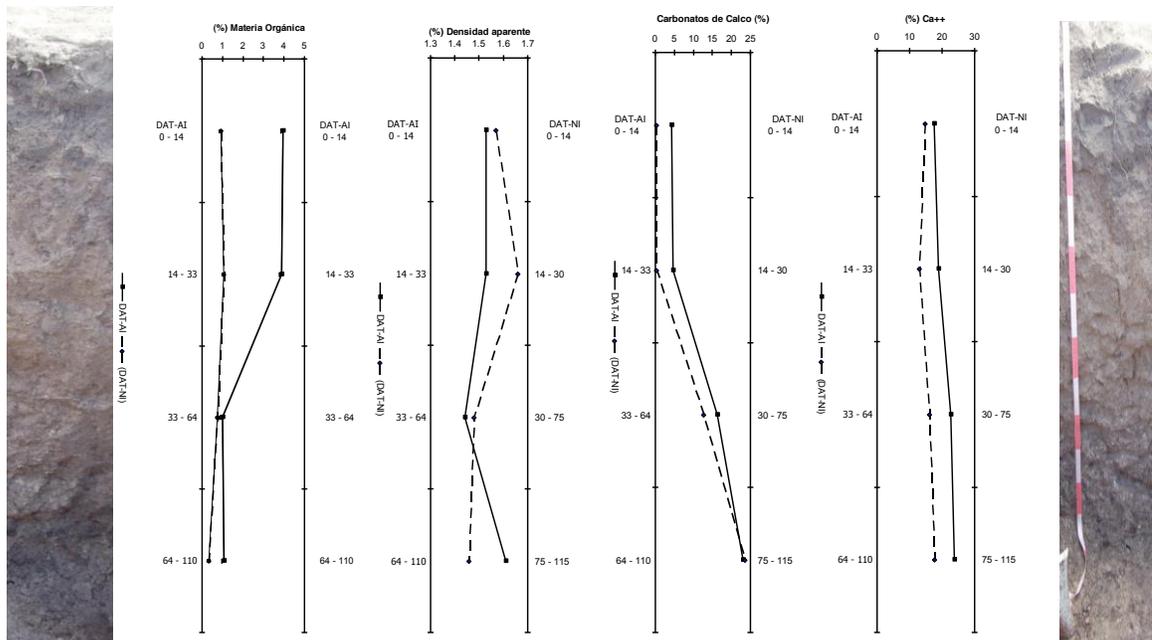


Figura 2. Propiedades edáficas en suelos del Distrito Agrícola de Temporal (DAT-AI y DAT-NI)

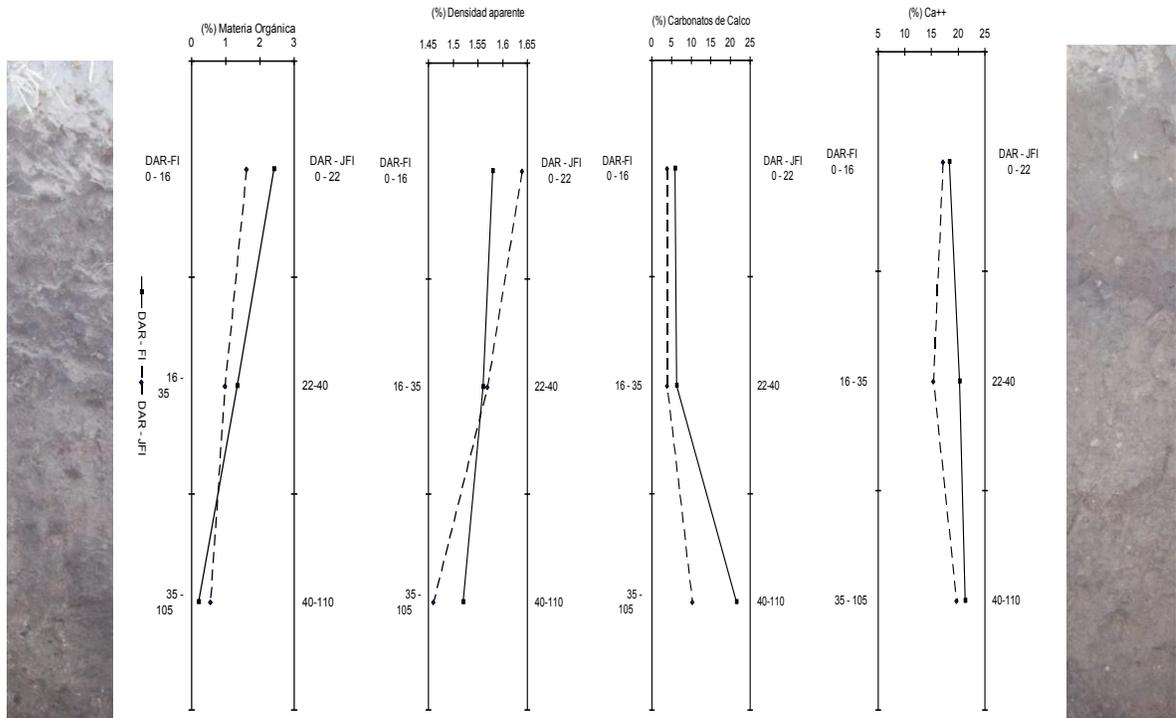


Figura 3. Propiedades edáficas en suelos del Distrito Agrícola de Riego (DAR-FI y DAR-JFI).

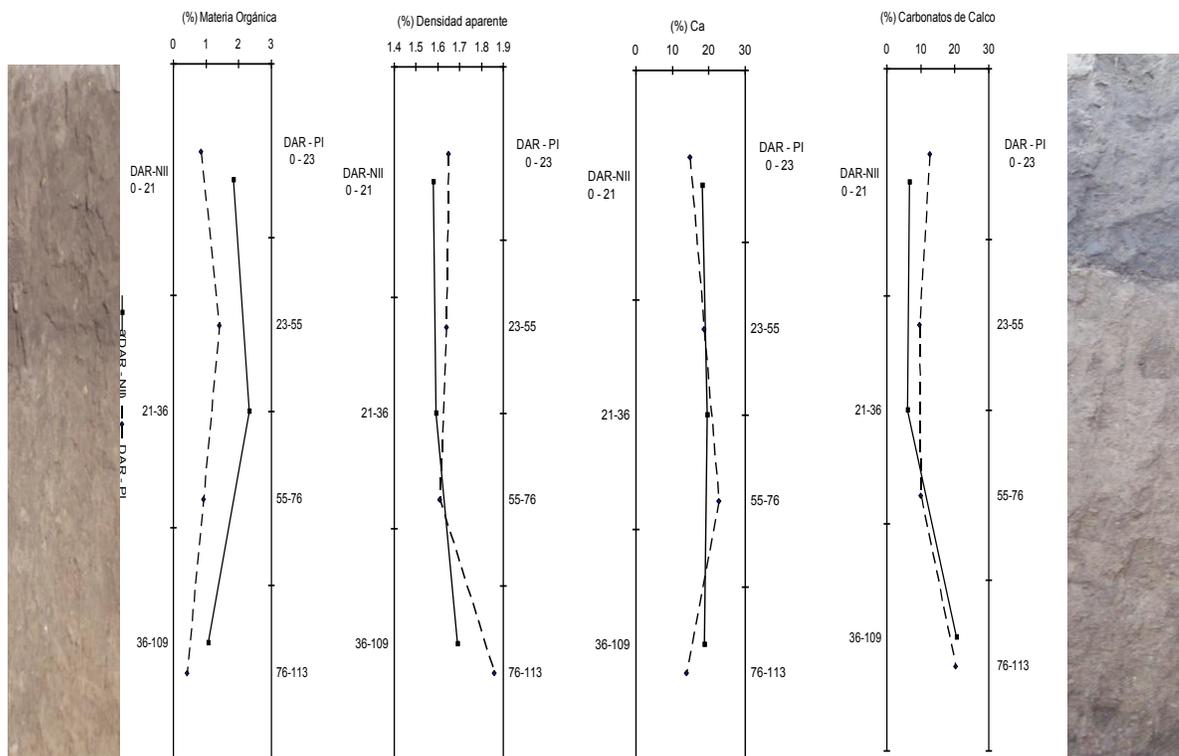


Figura 4. Propiedades edáficas en suelos del Distrito Agrícola de Riego (DAR-NII y DAR-PI).

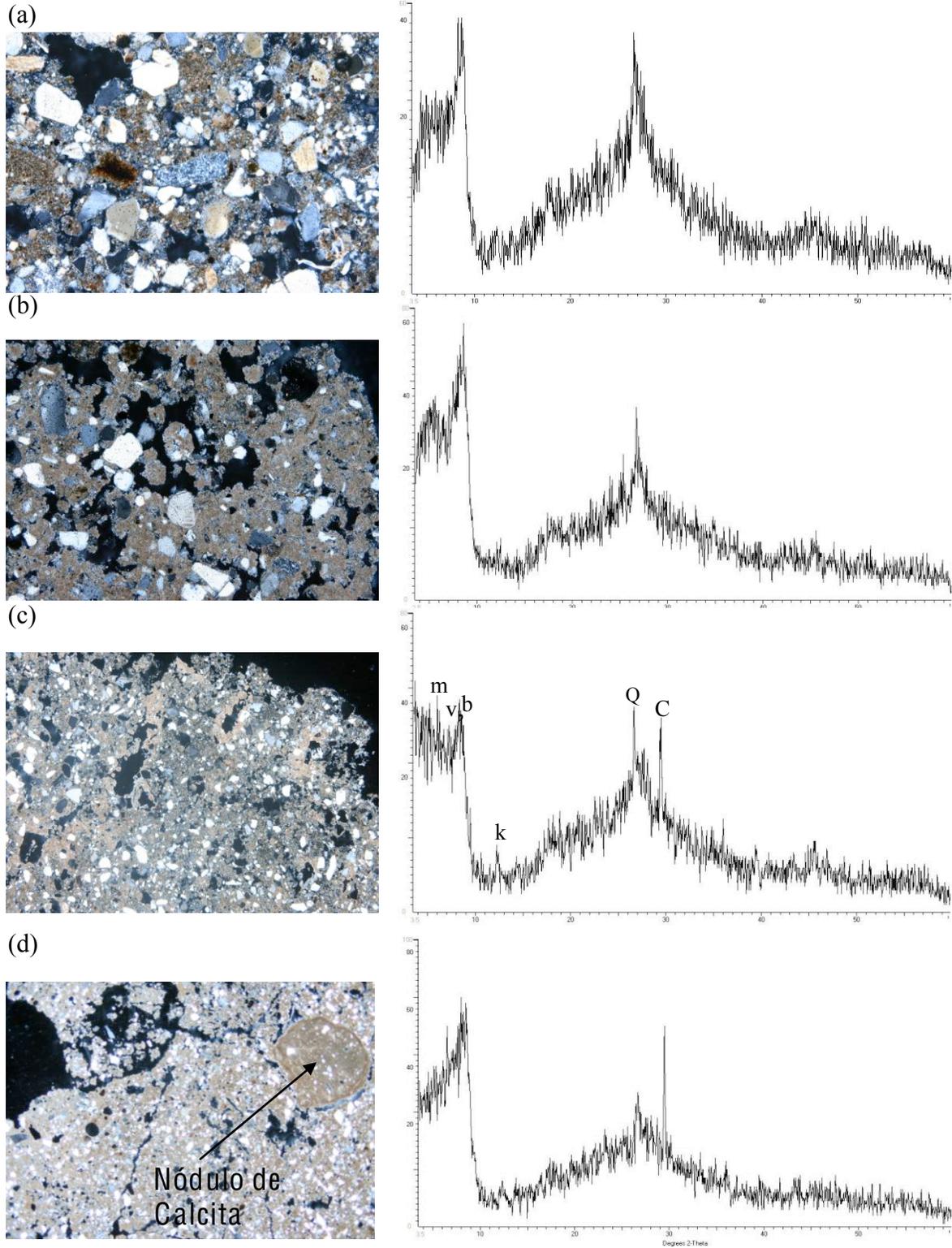
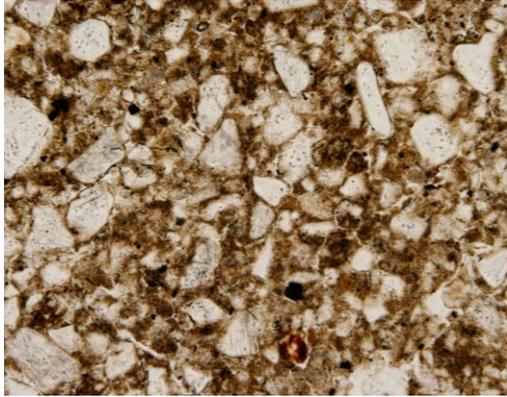
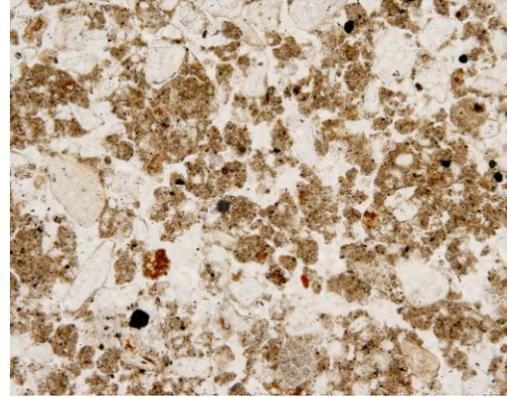


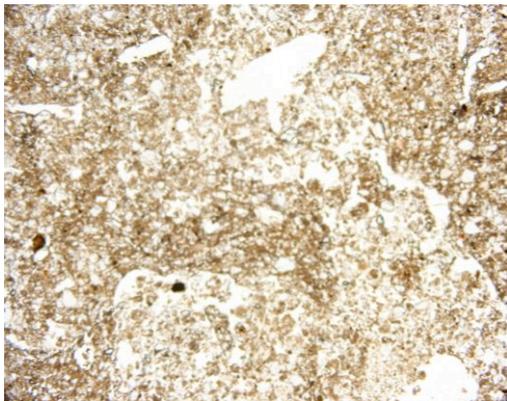
Figura 5. Micromorfología y mineralogía de los suelos agrícolas de temporal y de riego. Cuarzo (Q), y calcita (C); v (vermiculita), m (montmorillonita), b (biotita) y k (kaolinita). Longitud de marco 1.0 mm



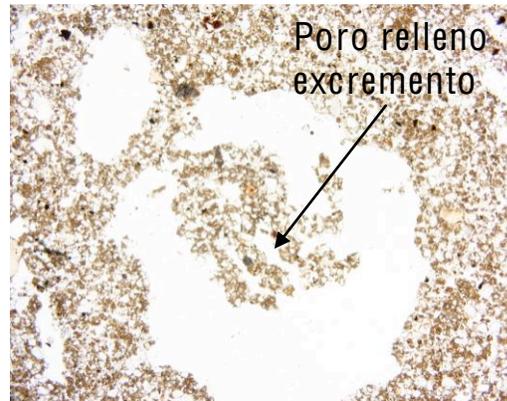
(a)



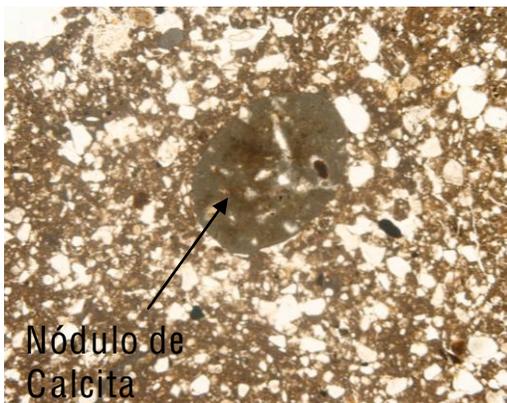
(b)



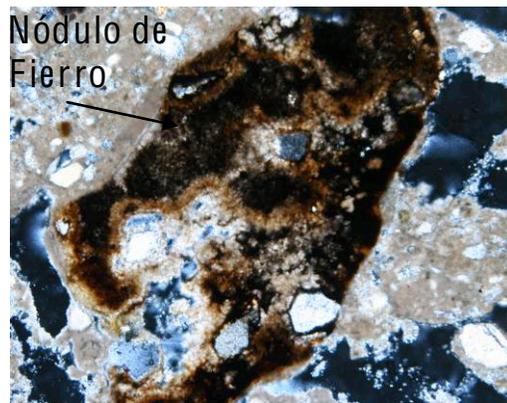
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 6. Características micromorfológico en horizontes superficiales y sub-superficiales. Fabrica apedal: a) masiva, porfirica de espacio cerrado, b), microagregados entre granos; rellenos: c) suelto completo de agregados esferoidales y d) suelto incompleto de excrementos; rasgos podológicos: e) nódulo típico de calcita y f) nódulo de hierro impregnando una masa basal cristalítica. Longitud de marco 1.0 mm.

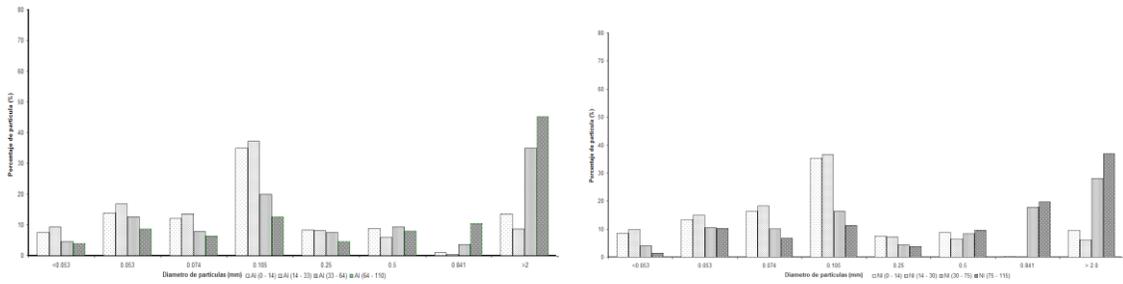
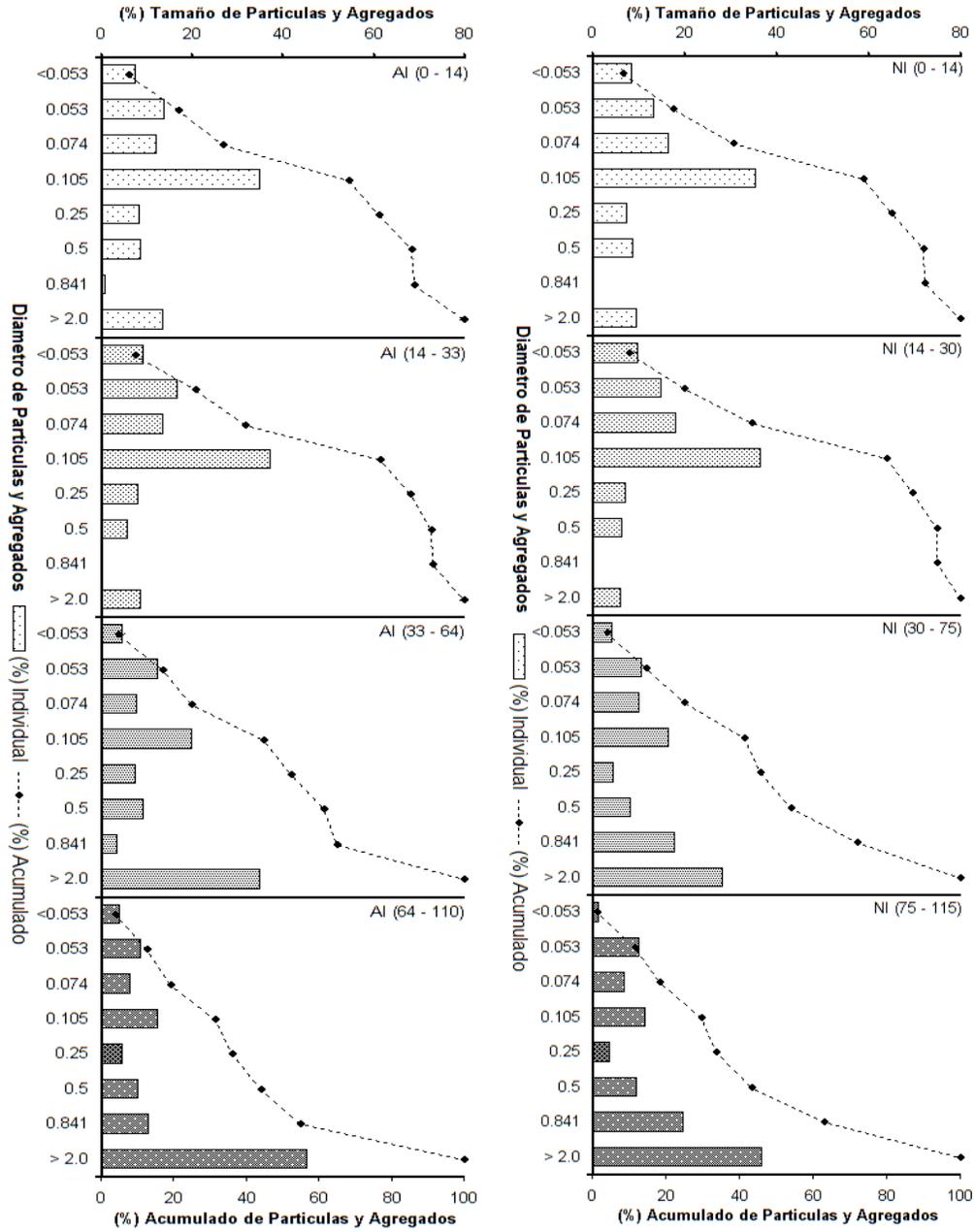


Figura 7. Distribución de tamaños de partículas y agregados en horizontes de los perfiles DAT-AI y DAT-NI.

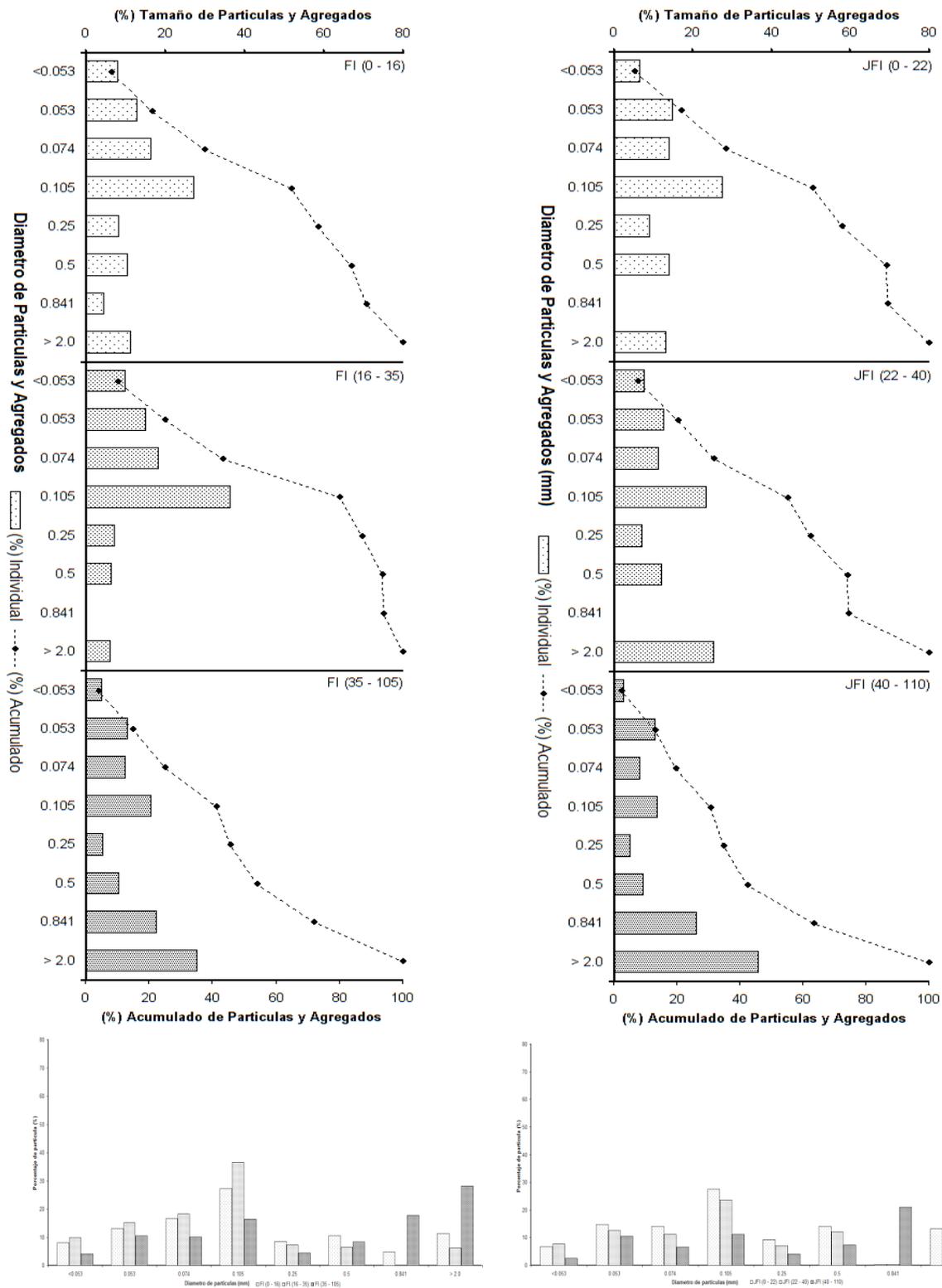


Figura 8. Distribución de tamaño de partícula en horizontes genéticos de perfiles DAR-FI y DAT-JFI.

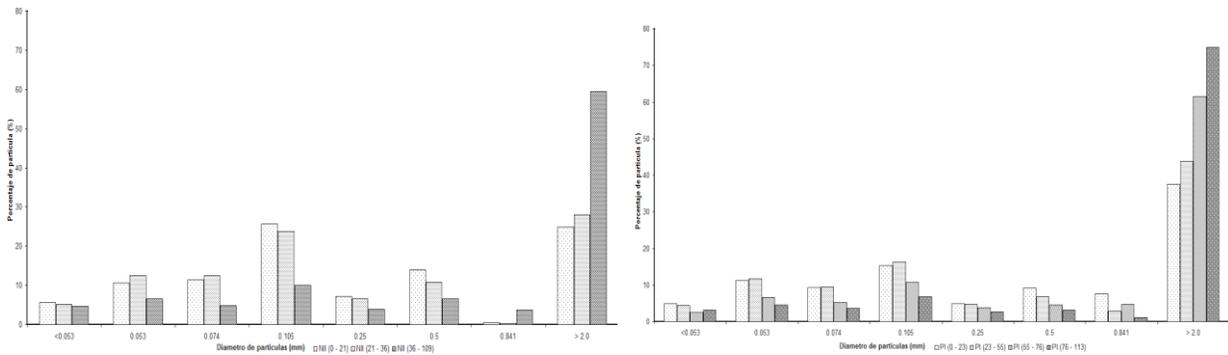
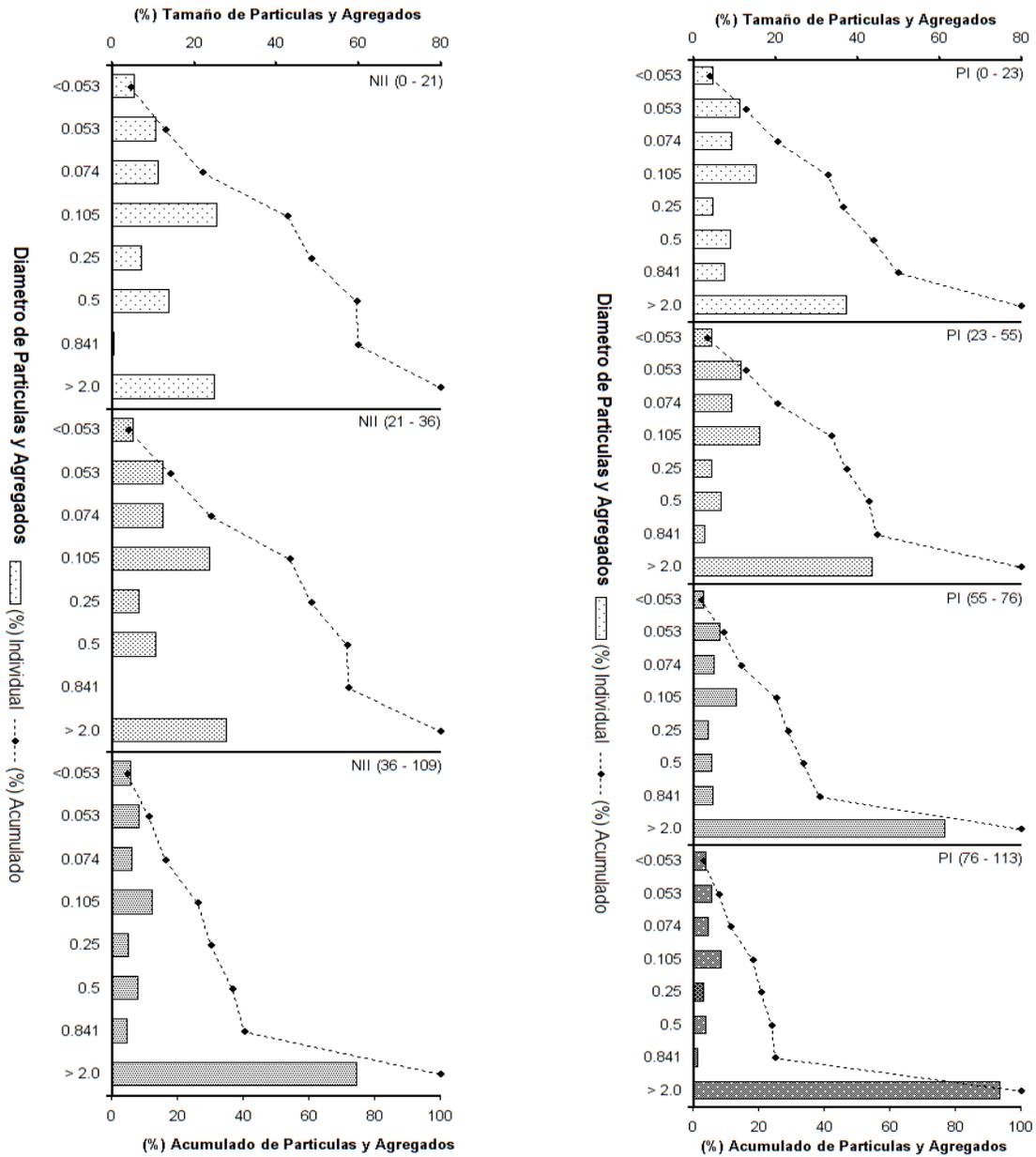


Figura 9. Distribución de clases de tamaño de partícula y agregados en perfiles DAR- NII y DAR-PI.

## ANEXO A-1. Descripción de perfiles

### I. Descripción de sitios: Perfil DAT-AI

Descrito por: Edgar V. Gutiérrez; Fecha: 3 de octubre de 2007; Localidad: Rancho particular de agricultura de temporal, Reynosa, Tamaulipas; Propiedad del Sr. Alfredo Herrera; Coordenadas geográficas UTM (14 R): X: 577893, Y: 2865119; Relieve: regular con pendiente de 1%; Elevación: 30.9 msnm; Drenaje del sitio: sitio normal temporal; Material parental: sedimentaria; horizontal, arenas depositadas por el viento; Flora: agricultura de temporal, incorporación de residuos de cosecha; Vegetación: cultivo de sorgo; Periodo vegetativo: 125 -135 días; Fecha de siembra: de 10/Enero a 25/Mayo; Densidad y rendimiento: 16 semillas/metro<sup>2</sup>, 3.5 ton/ha; Modo de preparación de terreno: Tracción mecánica: rotura, subsuelo, bordeo; Condiciones meteorológicas: registró 3/10 de precipitación, (tres días antes); Superficie del suelo: costra de 2mm, con trabajo mecánico agrícola rastra, incorporación de residuos de cosecha.

### II. Descripción del perfil:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0 – 14	Color en seco pardo (10YR 5/2), en húmedo pardo oscuro (10YR 4/2); textura migajón arcillo arenoso; pedregosidad ninguna; estructura granular; consistencia en seco blando, en húmedo muy friable; ligeramente pegajoso y plástica; estrato endurecido ninguno, cutanes ninguno, nódulos ninguno, reacción al HCl no calcáreo; reacción ligeramente alcalina (pH 7.7); poros ninguno; permeabilidad rápida; raíces comunes, delgadas; fauna ninguna; drenaje bien drenado; transición tenue.
Ap1	14 – 33	Color en seco pardo (10YR 5/2), en húmedo pardo oscuro (10YR 4/2); textura migajón arcillo arenoso; pedregosidad ninguna; estructura bloque subangular; consistencia en seco blando en húmedo friable, pegajoso y plástica; estrato endurecido ninguno, cutanes ninguno, nódulos ninguno; reacción al HCl no calcáreo; reacción ligeramente alcalina (pH 7.8); poros pocos finos, continuos y verticales, dentro de agregados, tubulares; permeabilidad rápida; raíces comunes finos; fauna ninguna; drenaje bien drenado; transición marcada.
Bk	33 – 64	Color en seco pardo pálido (10YR 6/3), en húmedo pardo (10YR 5/3), motas tenues, pocas y grandes; textura arcilloso; pedregosidad ninguna; estructura subangular débilmente desarrollada; consistencia en seco ligeramente duro, en húmedo friable, ligeramente pegajoso, plástico; estrato endurecido ninguno, cutanes ninguno, nódulos ninguno, reacción al HCl no calcáreo; reacción ligera a moderadamente alcalina (pH 8.0); poros pocos finos continuos verticales dentro de los agregados y tubulares; permeabilidad moderada; raíces pocas y finas; fauna ninguna; drenaje bien drenado; transición tenue.
Bk1	64 - 110	Color en seco pardo pálido (10YR 7/3), en húmedo pardo pálido (10YR 6/3); textura arcilloso; pedregosidad ninguna; estructura subangular moderadamente desarrollada; consistencia en seco ligeramente duro, en húmedo friable, ligeramente pegajoso, plástico; estrato endurecido ninguno, cutanes ninguno, nódulos de carbonatos de calcio, frecuentes, pequeños blancos de subangular a esférico, blandos, reacción al HCl altamente calcáreo; reacción de ligera a moderadamente alcalina (pH 8.0); poros pocos finos continuos verticales dentro de los agregados y tubulares; permeabilidad moderada; raíces raras y finas; fauna ninguna; drenaje bien drenado.

I. Descripción de sitios: Perfil DAT-NI

Descrito por: Edgar V. Gutiérrez; Fecha: 4 de octubre de 2007; Localidad: rancho particular de agricultura de temporal, Reynosa, Tamaulipas; Propiedad del Sr. Efraín Cantú; Coordenadas geográficas UTM (14 R): X: 578408, Y: 2867982; Relieve: regular con pendiente de 1%; Elevación: 33.8 msnm; Drenaje del sitio: sitio normal temporal  
 Material parental: Sedimentaria; Horizontal, arenas depositadas por el viento, calcáreo (5% a 10%); Flora: Agricultura de temporal, sin incorporación de residuos de cosecha; Vegetación: cultivo de sorgo; Periodo vegetativo: 125 -135 días, variedad DK-S40; Fecha de siembra: de 10/Enero a 25/Mayo; Densidad y rendimiento: 18 semillas/metro, 3.5 ton/ha; Modo de preparación de terreno: tracción mecánica: rotura, subsuelo, bordeo; Condiciones Meteorológicas: registró 3/10 de precipitación, (tres días antes), precipitación acumulada 10''; Superficie del suelo: sin trabajo mecánico agrícola y con presencia de surcos del ciclo anterior, sin la incorporación de residuos de cosecha

II. Descripción del perfil:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0 – 14	Color en seco pardo (10YR 5/2), en húmedo pardo oscuro (10YR 3/2); textura migajón arcillo arenoso; pedregosidad ninguna; estructura poliédrica subangular moderadamente desarrollada; consistencia en seco blando, en húmedo muy friable; ligeramente pegajoso y plástica; Estrato endurecido ninguno, cutanes ninguno, nódulos ninguno, reacción al HCl no calcáreo; reacción ligera a moderadamente alcalina (pH 8.0); poros pocos, muy finos, continuos con orientación vertical y tubular dentro de agregados; Permeabilidad lenta; raíces pocas delgadas; fauna ninguna; drenaje bien drenado; transición tenue.
Apl	14 – 30	Color en seco pardo (10YR 4/2), en húmedo pardo oscuro (10YR 2/2); textura arcillo arenoso; pedregosidad ninguna; estructura poliédrica subangular moderadamente desarrollada; consistencia en seco ligeramente duro, en húmedo muy friable, ligeramente pegajoso y plástica; estrato endurecido ninguno, cutanes ninguno, nódulos ninguno; reacción al HCl muy ligeramente calcáreo; reacción ligeramente alcalina (pH 7.9); Poros pocos finos, continuos con orientación verticales y tubular dentro de agregados; permeabilidad lenta; raíces pocas y delgadas; Fauna ninguna; drenaje bien drenado; transición marcada.
Bk	30 – 75	Color en seco pardo (10YR 5/3), en húmedo pardo (10YR 5/3), motas tenues, pocas y grandes; textura arcillosa; pedregosidad ninguna; estructura poliédrica subangular débilmente desarrollada; consistencia en seco ligeramente duro, en húmedo friable, no pegajoso, plástico; estrato endurecido ninguno, cutanes ninguno, nódulos ninguno, reacción al HCl calcáreo; reacción ligera a moderadamente alcalina (pH 8.0); poros pocos finos continuos verticales y tubulares dentro de agregados; permeabilidad lenta; raíces pocas y finas; fauna ninguna; drenaje bien drenado; transición tenue.
Bk1	75 - 115	Color en seco pardo pálido (10YR 7/3), en húmedo pardo pálido (10YR 6/4); textura arcillosa; pedregosidad ninguna; estructura poliédrica subangular débilmente desarrollada; consistencia en seco ligeramente duro, en húmedo friable, no pegajoso, plástico; estrato endurecido ninguno, cutanes ninguno, nódulos de carbonatos de calcio, abundantes, muy pequeños blancos de subangular a esférico, blandos, reacción al HCl altamente calcáreo; reacción de ligera a moderadamente alcalina (pH 8.0); poros pocos finos continuos verticales y tubulares dentro de agregados; permeabilidad lenta; raíces pocas y finas; fauna ninguna; drenaje bien drenado.

I. Descripción de sitios: Perfil DAR-NII

Descrito por: Edgar V. Gutiérrez; Fecha: 4 de octubre de 2007; Localidad: rancho particular de agrícola bajo riego, Reynosa, Tamaulipas; Propiedad del Sr. Efraín Cantú; Coordenadas geográficas UTM (14 R): X: 578022, Y: 2871732; Relieve: Regular con pendiente de 2%; Elevación: 32.5 msnm; Drenaje del sitio: Sitio normal bajo riego durante 4 a 5 meses y sitio con drenaje agrícola subterráneo; Material parental: sedimentaria; Horizontal, calcáreo (5% a 10%); Flora: Agricultura de riego; Vegetación: cultivo de maíz; Periodo vegetativo: 135 -150 días; Fecha de siembra: de 15/Enero a 25/Mayo; Densidad y rendimiento: 6 semillas/metro, de 4 a 6 ton/ha, 2 0 3 riegos por ciclo; Modo de preparación de terreno: tracción mecánica: Rotura, subsuelo, bordeo y surcado; Condiciones meteorológicas: registró 3/10 de precipitación, (tres días antes), precipitación acumulada 10''; Superficie del suelo: sin trabajo mecánico agrícola y con presencia de surcos del ciclo anterior, sin la incorporación de residuos de cosecha. Durante tres ciclos agrícolas anteriores se ha incorporado los residuos de cosecha debido a buenas condiciones de humedad lo que ocasiona la siembra de maíz.

II. Descripción del perfil:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0 – 21	Color en seco pardo (10YR 5/2), en húmedo pardo (10YR 4/1); textura arcillosa; pedregosidad ninguna; estructura poliédrica subangular moderadamente desarrollada; consistencia en seco ligeramente duro, en húmedo friable; ligeramente pegajoso y plástica; estrato endurecido ninguno, cutanes ninguno, nódulos de CaCO <sub>3</sub> muy pocos, muy pequeños, blancos, irregulares, duros, reacción al HCl no calcáreo; reacción moderadamente alcalina (pH 8.1); poros pocos, muy finos, continuos con orientación vertical y tubular dentro de agregados; permeabilidad lenta; raíces comunes delgadas; Fauna ninguna; drenaje bien drenado; transición tenue.
Ap1	21 – 36	Color en seco pardo (10YR 4/1), en húmedo pardo (10YR 4/2); textura arcillosa; pedregosidad ninguna; estructura poliédrica subangular moderadamente desarrollada; consistencia en seco duro, en húmedo friable; ligeramente pegajoso y plástica; estrato endurecido ninguno, cutanes ninguno, nódulos de CaCO <sub>3</sub> muy pocos, muy pequeños, blancos, irregulares, duros, reacción al HCl ligeramente calcáreo; reacción moderadamente alcalina (pH 8.1); poros pocos, muy finos, continuos con orientación vertical y tubular dentro de agregados; permeabilidad lenta; raíces comunes delgadas; fauna ninguna; drenaje bien drenado; transición marcada.
Bk	36 – 109	Color en seco pardo (10YR 5/2), en húmedo pardo pálido (10YR 6/3); textura arcillosa; pedregosidad ninguna; estructura poliédrica subangular moderadamente desarrollada; consistencia en seco duro, en húmedo friable; no pegajoso y muy plástica; estrato endurecido ninguno, cutanes ninguno, nódulos de CaCO <sub>3</sub> muy pocos, muy pequeños, blancos, irregulares, duros, reacción al HCl calcáreo; reacción moderadamente alcalina (pH 8.1); poros frecuentes, finos, continuos con orientación vertical y tubular dentro de agregados; permeabilidad lenta; raíces pocas finas; fauna ninguna; drenaje bien drenado.

I. Descripción de sitios: Perfil DAR-FI

Descrito por: Edgar V. Gutiérrez; Fecha: 5 de octubre de 2007; Localidad: rancho particular de agrícola bajo riego, Reynosa, Tamaulipas; Propiedad del Sr. Francisco Rodríguez; Coordenadas geográficas UTM (14 R): X: 588093, Y: 2845603; Relieve: regular con pendiente de 3%; Elevación: 23.8 msnm; Drenaje del sitio: sitio normal bajo riego durante 4 a 5 meses y sitio con drenaje agrícola subterráneo; Material parental: Sedimentaria; Horizontal, calcáreo (5% a 10%); Flora: agricultura de riego; Vegetación: cultivo de maíz y sorgo; Periodo vegetativo: 125 -150 días; Fecha de siembra: de 15/Enero a 25/Mayo; Densidad: 6 semillas/metro para maíz, y de 18 a 20 semillas/metro en sorgo por ciclo; Modo de preparación de terreno: tracción mecánica: rotura, subsuelo, bordeo; Condiciones meteorológicas: registró 3/10 de precipitación, (tres días antes), precipitación acumulada 10'; Superficie del suelo: con trabajo mecánico agrícola (rotura), se ha incorporado los residuos de cosecha durante 15 años excluyendo el ciclo 2007.

II. Descripción del perfil:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0 – 16	Color en seco pardo (10YR 4/1), en húmedo pardo (10YR 3/1); textura arcillosa; pedregosidad ninguna; estructura poliédrica subangular débilmente desarrollada; consistencia en seco duro, en húmedo friable; no pegajoso y plástica; estrato endurecido ninguno, cutanes ninguno, nódulos ninguno, reacción al HCl calcáreo; reacción moderadamente alcalina (pH 8.1); poros frecuentes, finos, continuos con orientación caótica y tubular dentro de agregados; permeabilidad lenta; raíces comunes delgadas; fauna lombrices; drenaje bien drenado; transición tenue horizontal.
Ap1	16 – 35	Color en seco pardo (10YR 4/1), en húmedo pardo (10YR 2/2); textura arcillosa; Pedregosidad ninguna; Estructura poliédrica subangular ligeramente desarrollada; consistencia en seco duro, en húmedo friable; no pegajoso y plástica; estrato endurecido ninguno, cutanes ninguno, nódulos ninguno, reacción al HCl calcáreo; reacción moderadamente alcalina (pH 8.2); poros frecuentes, finos, continuos con orientación caótica y tubular dentro de agregados; permeabilidad lenta; raíces comunes delgadas; fauna ninguna; drenaje bien drenado; transición media ondulada.
Bk	35 – 110	Color en seco gris claro (10YR 7/1), en húmedo gris parduzco claro (10YR 6/2), motas pocas y finas; textura arcillosa; pedregosidad ninguna; estructura poliédrica subangular moderadamente desarrollada; consistencia en seco duro, en húmedo friable; no pegajoso y plástica; estrato endurecido ninguno, cutanes ninguno, nódulos de CaCO <sub>3</sub> muy pocos, muy pequeños, blancos, irregulares, duros, reacción al HCl altamente calcáreo; reacción moderadamente alcalina (pH 8.2); poros numerosos, muy finos, continuos con orientación vertical y tubular dentro de agregados; permeabilidad lenta; raíces pocas finas; fauna ninguna; drenaje bien drenado.

I. Descripción de sitios: Perfil DAR-JFI

Descrito por: Edgar V. Gutiérrez; Fecha: 5 de octubre de 2007; Localidad: Rancho particular de agrícola bajo riego, Río Bravo, Tamaulipas; Propiedad del Sr. Juan Francisco Hernández; Coordenadas geográficas UTM (14 R): X: 588082, Y: 2846023; Relieve: regular con pendiente de 3%; Elevación: 24 msnm; Drenaje del sitio: sitio normal bajo riego durante 4 a 5 meses, sin drenaje agrícola; Material parental: sedimentaria; Flora: agricultura de riego; vegetación: cultivo de maíz y sorgo; Periodo vegetativo: 125 -150 días; Fecha de siembra: de 15/Enero; Densidad: 6 semillas/metro de maíz, y de 18 a 20 semillas/metro en sorgo; Modo de preparación de terreno: tracción mecánica: rastras, subsuelo cruzado, bordeo; Condiciones Meteorológicas: registró 3/10 de precipitación, (tres días antes), precipitación acumulada 10''; Superficie del suelo: con trabajo mecánico agrícola (rotura), se ha incorporado los residuos de cosecha durante 15 años, no presenta drenaje agrícola subterráneo.

II. Descripción del perfil:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0 – 22	Color en seco pardo (10YR 5/2), en húmedo pardo (10YR 4/2); textura arcillosa; pedregosidad ninguna; estructura poliédrica subangular débilmente desarrollada; consistencia en seco ligeramente duro, en húmedo friable; ligeramente pegajoso y plástica; estrato endurecido ninguno, cutanes ninguno, nódulos ninguno, sin reacción al HCl; reacción moderadamente alcalina (pH 8.1); poros frecuentes, finos, continuos con orientación vertical, tubular dentro de agregados; permeabilidad lenta; raíces comunes medianas; fauna ninguna; drenaje bien drenado; transición tenue horizontal, presencia de grietas rellenas de suelo de la capa arable.
A	22 – 40	Color en seco pardo (10YR 4/2), en húmedo pardo (10YR 3/2); textura arcillosa; pedregosidad ninguna; estructura poliédrica subangular moderadamente desarrollada; consistencia en seco duro, en húmedo friable; no pegajoso y plástica; estrato endurecido ninguno, cutanes ninguno, nódulos ninguno, reacción al HCl ligeramente calcáreo; reacción moderadamente alcalina (pH 8.0); poros frecuentes, finos, continuos con orientación vertical, tubular dentro de agregados; permeabilidad lenta; raíces comunes medianas; fauna ninguna; drenaje bien drenado; transición marcada ondulada, presencia de grietas rellenas de suelo del horizonte superior.
Bw	40 – 110	Color en seco pardo (10YR 6/2), en húmedo pardo (10YR 5/2); textura arcillosa; pedregosidad ninguna; estructura poliédrica subangular moderadamente desarrollada; consistencia en seco duro, en húmedo friable; no pegajoso y plástica; estrato endurecido ninguno, cutanes ninguno, nódulos ninguno, reacción al HCl calcáreo; reacción moderadamente alcalina (pH 8.0); poros frecuentes, muy finos, continuos con orientación caótica, tubular dentro de agregados; permeabilidad lenta; raíces pocas delgadas; fauna ninguna; drenaje bien drenado.

### I. Descripción de sitios: Perfil DAR-PI

Descrito por: Edgar V. Gutiérrez; Fecha: 12 de octubre de 2007; Localidad: Rancho particular de agrícola bajo riego, Río Bravo, Tamaulipas; Propiedad del Sr. José; Coordenadas geográficas UTM (14 R): X: 591817, Y: 2845438; Relieve: Regular con pendiente de 3%; Elevación: 16.4 msnm; Drenaje del sitio: sitio normal bajo riego a receptor, sin drenaje agrícola; Material parental: sedimentaria; Vegetación: cultivo de sorgo; Periodo vegetativo: 115 -135 días; Fecha de siembra: de 15/Enero; Densidad: 20 semillas/metro en sorgo; Modo de preparación de terreno: tracción mecánica; Condiciones meteorológicas: registró 4/10 de precipitación, (tres días antes), precipitación acumulada 10''; Superficie del suelo: con trabajo mecánico agrícola arado de reja cruzado, no se ha incorporado los residuos de cosecha y no presenta drenaje agrícolas subterráneos. El perfil se localiza a 50 m del canal Anzalduas y a 30 m de un dren superficial, es receptora de humedad por ser la parte mas baja de la parcela.

### II. Descripción del perfil:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0 – 23	Color en seco pardo (10YR 5/2), en húmedo pardo (10YR 4/2); textura arcillosa; pedregosidad ninguna; estructura poliédrica subangular débilmente desarrollada; consistencia en seco duro, en húmedo friable; no pegajoso y plástica; Estrato endurecido ninguno, cutanes ninguno, nódulos ninguno, reacción al HCl ligeramente calcáreo; reacción moderadamente alcalina (pH 8.3); poros pocos, muy finos, continuos con orientación caótica, tubular fuera de agregados; permeabilidad rápida; raíces pocas delgadas; fauna lombrices, hormigas; drenaje imperfectamente drenado; transición tenue horizontal.
A	23 – 55	Color en seco pardo (10YR 3/2), en húmedo pardo (10YR 3/2); textura arcillosa; pedregosidad ninguna; estructura poliédrica subangular débilmente desarrollada; consistencia en seco duro, en húmedo friable; pegajoso y plástica; estrato endurecido ninguno, cutanes ninguno, nódulos ninguno, reacción al HCl ligeramente calcáreo; reacción moderadamente alcalina (pH 8.2); poros frecuentes, finos, continuos con orientación caótica, tubular fuera de agregados; permeabilidad rápida; raíces pocas delgadas; fauna ninguna; drenaje imperfectamente drenado; transición media ondulada.
Bk	55 – 76	Color en seco pardo (10YR 5/2), en húmedo pardo (10YR 4/2); textura arcillosa; pedregosidad ninguna; estructura poliédrica subangular débilmente desarrollada; consistencia en seco muy duro, en húmedo friable; pegajoso y plástica; estrato endurecido ninguno, cutanes ninguno, nódulos ninguno, concentraciones de suelos de horizontes superiores en grietas; reacción al HCl calcáreo; reacción moderadamente alcalina (pH 8.1); poros frecuentes, finos, continuos con orientación vertical, tubular dentro de agregados; permeabilidad moderad; raíces comunes delgadas; fauna ninguna; drenaje imperfectamente drenado; transición marcada irregular.
Bk1	76 – 113	Color en seco pardo (10YR 7/1), en húmedo pardo (10YR 5/2); textura arcillosa; pedregosidad ninguna; estructura poliédrica subangular débilmente desarrollada; consistencia en seco muy duro, en húmedo friable; pegajoso y plástica; estrato endurecido ninguno, cutanes ninguno, nódulos ninguno, concentraciones de CaCO <sub>3</sub> ; reacción al HCl calcáreo; reacción moderadamente alcalina (pH 8.3); poros pocos, finos, continuos con orientación vertical, tubular dentro de agregados; permeabilidad moderad; Raíces raras gruesas; fauna ninguna; drenaje imperfectamente drenado.

## Anexo A-2. Régimen de humedad y temperatura del suelo con datos climáticos, estimados por el software de Van Wambeke (1986).

Station: rEYNOSA      Country: Mexico      Latit: 26    6    N  
 Elevation: 34      Longit: 98   17   W

Annual rainfall 453 mm      Moisture regime: Aridic  
 Temperature regime: hyperth.

SOIL CLIMATIC REGIME ACCORDING TO NEWHALL COMPUTATION  
 (soil temp.=air temp.+2.5 C; amplit. reduced by 1/3)

	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
monthly rainfall (mm)	14.6	12.6	7.3	24.8	73.0	99.7	24.3	67.4	72.6	27.4	11.9	16.9
monthly air temperatures (Celcius)	16.2	18.4	21.9	23.9	27.6	28.5	29.9	29.8	27.2	24.6	20.0	17.3
monthly evapotranspiration (Thorntwaite), mm.	28.9	40.4	79.3	105.8	165.3	174.5	185.9	178.0	142.3	107.7	53.5	34.7

MOISTURE CALENDAR

1 = dry ; 2 = m/d ; 3 = moist

1\*\*\*\*\*15\*\*\*\*\*30

JAN	11111111111111111111111111111111
FEB	11111111111111111111111111111111
MAR	11111111111111111111111111111111
APR	11111111111111111111111111111111
MAY	111111111111112222222222221111
JUN	111111111111112222222222222222
JUL	11111111111111111111111111111111
AUG	111111111111112222222222111111
SEP	111111111111112222222222222211
OCT	11111111111111111111111111111111
NOV	11111111111111111111111111111111
DEC	11111111111111111111111111111111

Number of cumulative days that the moisture control section						Highest number of consecutive days that the MCS is					
During one year is			When soil temp is above 5 deg. C			Moist in some parts		Dry after summer		Moist after winter	
DRY	M/D	MOIST	DRY	M/D	MOIST	YEAR	T>8	solstice		solstice	
312	48	0	312	48	0	15	15	45		0	

\*  
 Computed by BASIC program NSM, November 1986  
 Tentative subdivision: Typic Aridic

## CONCLUSIONES GENERALES

El estudio multiescalar proporciona una visión más amplia e integral sobre los factores que originan cualquier tipo de cambio sobre un área específica. Uno de estos factores involucrados son el excedente o el déficit de agua sobre el régimen de humedad del suelo que altera sus propiedades. De manera que al utilizar diversas herramientas se tiene la posibilidad de comprender la tendencia del cambio, proporciona información específica de los efectos benéficos o perjudiciales tanto para el hombre como para el suelo.

A nivel megasópico, las estadísticas agrícolas anuales con un marco de muestreo en campo con 75 parcelas, presentaron el mayor acercamiento a las obtenidas por la base de datos; mientras que, la estimación de superficie por técnicas de percepción remota se encuentran limitada por factores meteorológicos y a la obtención de firmas puras de los cultivos de maíz y sorgo. Estos dos cultivos tienen gran movilidad en espacio y tiempo, ya que dependen de la disponibilidad de agua en las presas en cada ciclo agrícola, haciendo más difícil su identificación sobre imágenes de satélite y por consiguiente la estimación de la superficie agrícola ocupada por tales cultivos cada ciclo agrícola.

A nivel de campo, el déficit de humedad en el distrito de riego causó que los agricultores realizaran acciones de tipo técnico, económico y social con la finalidad de mitigar el desabasto de agua y evitar el abandono de las tierras. Desde el punto de vista técnico, los productores cambiaron el patrón de cultivo al pasar de maíz a sorgo en ciclos agrícolas continuos manteniendo su actividad; en el ámbito económico, el cultivo de sorgo proporcionó fuentes de empleo y mantuvo la productividad de sus tierras y evitaron así el abandono y la migración; y por último, el aspecto social permitió una comunicación directa y efectiva entre productor-productor y productor-técnico necesaria para realizar los cambios de cultivo entre ciclos agrícolas en beneficio de la comunidad y de la región.

A nivel de microscopio, el efecto del agua sobre la estabilidad de agregados de los suelos, fue directamente proporcional; es decir, a mayor cantidad de agua mayor la agregación de las partículas evitando la erodabilidad del suelo. Esto es causado principalmente por la cementación de partículas con carbonatos de calcio y no tanto por la aplicación de materia orgánica provenientes de residuos de cosecha. Por otra parte, también se modificó el régimen de humedad y con ello su clasificación taxonómica, de manera que, un suelo puede ser clasificado en el orden

de los Aridisoles (suelos sin riego o humedad) o en el orden de los Inceptisoles si tienen disponibilidad de agua durante seis meses consecutivos.