

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

**DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE CIENCIAS DE LOS
RECURSOS NATURALES RENOVABLES**



**DETERMINACIÓN DE SUELOS DEGRADADOS MEDIANTE TÉCNICAS DE
TELEDETECCIÓN EN LA MICROCUENCA DEL RIO DELFÍN - POZUZO**

TESIS

Para optar el título de :

INGENIERO EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

MENCIÓN: CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA

TULIO WILFREDO CHÁVEZ ESPÍRITU

PROMOCIÓN 2005

Tingo María - Perú

2007

P36

Ch26

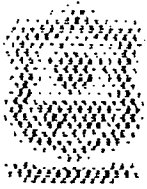
Chávez Espiritu, Tulio W.

Determinación de Suelos Degradados Mediante Técnicas de Teledetección en la Microcuenca del Río Delfín – Pozuzo. Tingo María, 2007

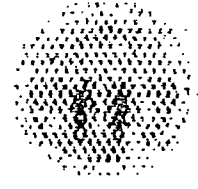
84 h.; 10 cuadros; 26 fgrs.; 5 anexo; 36 ref.; 30 cm.

Tesis (Ing. Recursos Naturales Renovables Mención: Conservación de Suelos y Agua) Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María (Perú). Facultad de Recursos Naturales Renovables.

SUELOS DEGRADADOS / TELEDETECCIÓN / METODOLOGÍA /
ECOSISTEMA / RÍO DELFÍN – POZUZO / TINGO MARÍA / RUPA
RUPA / LEONCIO PRADO / HUÁNUCO / PERÚ.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María - Perú



FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 19 de Abril de 2007, a horas 07:00 p.m. en la Sala de Grados de la Facultad de Recursos Naturales Renovables, para calificar la tesis titulada:

“**DETERMINACION DE SUELOS DEGRADADOS MEDIANTE TECNICAS DE TELEDETECCION EN LA MICROCUENCA DEL RIO DELFIN – POZUZO**”

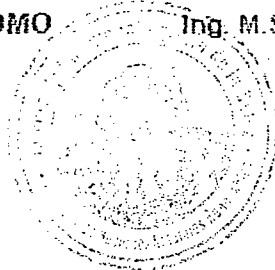
Presentado por el Bachiller: **TULIO WILFREDO CHÁVEZ ESPÍRITU**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara aprobado con el calificativo de **“MUY BUENO”**:

En consecuencia el sustentante queda apto para optar el **Título de INGENIERO en RECURSOS NATURALES RENOVABLES**, mención **CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUAS**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, tramitándolo al Consejo Universitario para la otorgación del título correspondiente.

Tingo María, 14 de mayo del 2007

.....
Ing. MSc. JOSE LEVANO CRISOSTOMO
Presidente

.....
Ing. M.Sc. LUIS ALBERTO VALDIVIA ESPINOZA
Vocal



AUSENTE

.....
Ing. MSc. LUCIO MANRIQUE DE LARA SUAREZ
Vocal

.....
Ing. RICARDO CHAVEZ ASECIO
Asesor

DEDICATORIA

A mi querida madre Rufina; a mi hermano Juan Carlos y a mis adorables abuelos: Gregorio y Rufina, quienes con gran sacrificio y amor han hecho posible mi profesión.

A mi recordada sobrina Deysi, y a toda mi hermosa familia por sus grandes muestras de amor y cariño que fue un estímulo necesario para llegar a esta meta propuesta.

AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Teledetección (LABTEL) de la Facultad Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos que me abrió las puertas para iniciar el presente trabajo.

Al Dr. Joel Rojas Acuña, mi coasesor, que con su paciencia, sabiduría y su orientación permitió que el trabajo llegase al fin alcanzado.

Al Dr. Robinson Negrón Juárez, que con su apoyo e información ayudaron a culminar el trabajo de investigación.

Al Ing. Ricardo M. Chávez Asencio, mi profesor consejero, que no solamente con su sabiduría, sino también con su amistad, me guió hasta alcanzar el objetivo propuesto.

Al Ing. Msc. Rafael R. Robles Rodríguez, por todo su valioso apoyo brindado, dedicación y apreciable amistad.

A mis amigos de LABTEL: Carlos Eche, Octavio Fashe, José Pasapera, Arturo Lauro, Cesar Santisteban quienes me iluminaron en los momentos más difíciles en el desarrollo del presente trabajo de investigación.

A mi amigo José Tuesta, por su valiosa amistad y colaboración en los trabajos de campo.

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva y a todos mis profesores que supieron brindar sus conocimientos y dedicación en mi formación profesional.

A la Asociación para el Desarrollo Integral de Ganaderos y Agricultores de Pozuzo (ADIGAP) y al Programa de Desarrollo Alternativo Pozuzo-Palcazú (PRODAPP) por su aporte y colaboración en el desarrollo del presente trabajo de investigación.

ÍNDICE GENERAL

	Páginas.
I. INTRODUCCIÓN	01
II. REVISIÓN DE LITERATURA	04
2.1. Teledetección	04
2.2. Mecanismo para la obtención de datos de satélite	04
2.3. Radiación electromagnética	05
2.4. Espectro electromagnético	05
2.5. Bandas espectrales	06
2.5.1. Espectro visible	06
2.5.2. El infrarrojo	07
2.5.2.1. Infrarrojo próximo	07
2.5.2.2. Infrarrojo medio	07
2.5.2.3. Infrarrojo lejano o térmico	07
2.5.3. Microondas	07
2.6. Sensores espaciales	08
2.6.1. Satélite CBERS	08

2.7. Teoría básica de la radiación solar y su influencia de la atmósfera en la teledetección	10
2.8. Consideraciones físicas geométricas de interés para el cálculo de la reflectancia aparente	12
2.8.1. Ángulo cenital solar	12
2.8.2. Distancia Tierra-Sol	13
2.9. Correcciones radiométricas.....	14
2.9.1. Conversión de ND a radiancia.....	15
2.9.2. Conversión de radiancia a reflectancia.....	16
2.9.3. Corrección atmosférica.....	17
2.10. Correcciones geométrica.....	19
2.11. Conceptos de degradación de los suelos	20
2.11.1. Procesos de degradación de suelos	21
2.11.2. Caracterización de la degradación de los suelos.....	21
2.11.3. Indicadores de la degradación de suelos.....	22
2.11.4. Propiedades que controlan la reflectancia del suelos	23
2.11.5. Interacciones óptico – geométrico en los suelos.....	24
2.12. El problema de la degradación de suelos y su importancia para la investigación	24
2.13. Vigilancia de la degradación de suelos con observaciones de satélite	25
2.14. Firmas espectrales utilizadas para estudios de la degradación de suelos.....	26
2.15. Índices espectrales en la caracterización de la degradación	

de suelos	29
2.16. Métodos estadísticos utilizados para la clasificación de la degradación	31
2.16.1. Exactitud total.....	31
2.16.2. El coeficiente kappa (k).....	32
2.16.3. Exactitud producida.....	33
2.16.4. Exactitud usada.....	33
2.16.5. Distancia mínima	33
III. MATERIALES Y MÉTODOS	35
3.1. Ubicación de la zona de estudio	36
3.2. Características del área de estudio.....	36
3.2.1. Clima.....	36
3.2.2. Humedad.....	36
3.2.3. Temperatura.....	37
3.2.4. Características ecológicas	37
3.2.5. Suelos	37
3.2.6. Fisiografía	37
3.2.7. Hidrografía	38
3.2.8. Vegetación	38
3.3. Materiales.....	39
3.3.1. Material cartográfica	39
3.3.2. Material satelital.....	39
3.3.3. Hardware y software.....	39
3.3.4. Equipos y/o materiales complementarios	39

3.4. Metodología	40
3.4.1. Trabajo de campo.....	40
3.4.1.1. Localización y caracterización del área experimental	40
3.4.1.2. Caracterización de los niveles de degradación de suelos.....	40
3.4.1.2.1. Degradación no aparente	41
3.4.1.2.2. Degradación leve.....	42
3.4.1.2.3. Degradación moderada	42
3.4.1.2.4. Degradación severa	43
3.4.2. Procesamiento digital de imágenes CBERS-2	45
3.4.2.1. Adquisición de la imagen	45
3.4.2.2. Corrección geométrica	45
3.4.2.3. Corrección radiométrica	45
3.4.3. Métodos de clasificación y determinación de índices espectrales	49
3.4.3.1. Distancia mínima	49
3.4.3.2. Índice espectrales	49
3.4.4. Validación de los resultados.....	50
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	53
4.1. Parámetros utilizados en análisis del comportamiento espectral de los suelos degradados.....	53
4.2. Índices espectrales en relación a los valores de reflectancia de los cuatro niveles de degradación de suelos.....	56

4.3. Comparación del IDS y el NDVI en la determinación de de suelos degradados	59
4.4. Exactitud de la clasificación de los niveles de degradación usando el IDS	61
4.5. Validación del IDS en el estudio de la degradación de suelos	62
4.6. Cuantificación de las áreas degradadas usando IDS.....	64
V. CONCLUSIONES.....	67
VI. RECOMENDACIONES.....	69
VII. ABSTRACT.....	70
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
IX. ANEXOS.....	77

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadros	Páginas.
1. Principales características del CBERS-2/CCD	9
2. Calibración del CBERS-2/CCD con datos del ASTER.....	15
3. Irradiancia espectral solar fuera de la atmósfera para el satélite Landsat-5/TM.....	16
4. Interpretación de los valores de kappa	32
5. Características de los diferentes niveles de degradación de suelos.....	44
6. Datos de la imagen utilizada en la investigación.....	45
7. Diagrama de la metodología desarrollada	52
8. Valores espectrales de niveles de degradación en suelos.....	55
9. Exactitud de la medición en la clasificación con el IDS.....	62
10. Descripción estadística de las características fisicoquímicas de los diferentes niveles de degradación de suelos	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras	Páginas.
1. Sistema de teledetección	05
2. Espectro electromagnético.....	06
3. Sensores espaciales	08
4. Satélite CBERS-2	09
5. Papel de la atmósfera en la teledetección	11
6. Ángulo cenital solar.....	12
7. Posición de la Tierra con respecto al Sol.....	14
8. Firmas espectrales.....	27
9. Método de clasificación de distancia mínima	34
10. Mapa de ubicación.....	36
11. Degradación no aparente.....	41
12. Degradación leve	42
13. Degradación moderada.....	43
14. Degradación severa	44
15. Puntos de muestreo de suelos.....	51
16. Diagrama de la metodología desarrollada	52

17. Curva de reflectancia de suelos con diferentes niveles de degradación	53
18. Factor de reflectancia B1 x IDS	56
19. Factor de reflectancia B2 x IDS	57
20. Factor de reflectancia B3 x IDS	57
21. Factor de reflectancia B3 x NDVI	57
22. Factor de reflectancia B4 x NDVI	58
23. Condiciones de superficie determinadas por el IDS	59
24. Condiciones de superficie determinadas por el NDVI	59
25. Clasificación de los niveles de degradación de suelos con el IDS	61
26. Mapa de degradación de suelos de la Microcuenca del Río Delfín	65

ANEXO

	Páginas.
1. Algoritmo de corrección radiométrica	78
2. Algoritmo de corrección atmosférica	80
3. Algoritmo para la determinación del IDS	82
4. Algoritmo para la determinación del NDVI.....	83
5. Análisis de suelos	84

RESUMEN

En la Microcuenca del Río Delfín, del distrito de Pozuzo, los suelos están perdiendo fertilidad, producto de una agricultura y ganadería sin ningún sistema conservacionista que ha dado inicio a procesos degradativos en los suelos. La degradación de los suelos afecta directamente la productividad de la tierra y con ella, el margen de ganancias de los productores ganaderos y agricultores de la microcuenca. Es así que se recomienda labores específicas de recuperación de tierras degradadas; para ello, primero se debe identificar e inventariar estas tierras, lo que ocasiona elevados costos con métodos tradicionales que requieren de tiempo y mucho dinero. La teledetección es una alternativa apropiada para analizar y evaluar los riesgos de la expansión de la degradación de los suelos. En el presente estudio, se caracterizaron los niveles de degradación usando datos espaciales del sensor CCD del satélite CBERS-2. Las tres bandas del visible y uno del infrarrojo próximo fueron calibradas por las fallas del sensor, y, los efectos atmosféricos para obtener la reflectancia real de la superficie terrestre. Las mediciones de campo fueron llevadas a cabo en cuatro áreas experimentales que representaron los diferentes niveles de degradación para ser analizadas y clasificadas en base a las respuestas

espectrales, en la imagen de satélite. El estudio dirigido al desarrollo y evaluación de un índice espectral determinó y cuantificó la degradación en la microcuenca. Este índice fue llamado Índice de Degradación de Suelos (IDS) basado en los conceptos de degradación. En este estudio se demostró que IDS ha tenido mejores resultados que el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en la determinación de los niveles de degradación. Los resultados muestran que el IDS proveen una buena precisión para el monitoreo de la degradación de suelos ($\kappa=0.90$). El uso de los mapas temáticos, pendientes, altitud y análisis de los suelos (textura, pH, materia orgánica, Capacidad de Intercambio Catiónico, Fósforo, Potasio) obtenidos de las 12 muestras tomadas en campo y localizadas con un Sistema Posicionamiento Global, han sido utilizados para la fotointerpretación y la validación de nuestros resultados.

I. INTRODUCCIÓN

El término degradación tiene varias definiciones e interpretaciones, si bien generalmente se utiliza para indicar la disminución de la productividad biológica de las tierras, este fenómeno lleva a la desaparición casi irreversible de la vegetación y tiene como consecuencia la aceleración de la erosión así como la pérdida progresiva de los horizontes del suelo. Las variaciones que se producen en la productividad biológica de las tierras son función del clima, de las características de los suelos y de la actividad humana, que se manifiestan por fluctuaciones a corto plazo y tendencias a largo plazo, que pueden ser reversibles o permanentes.

Para controlar el fenómeno de la degradación y con el objetivo de proponer soluciones, se hace necesario entender la interacción que existe entre el fenómeno de degradación y los diferentes componentes del ecosistema natural. Esta evaluación pasa necesariamente por realizar el inventario de los indicadores de la degradación que son numerosos y se relacionan principalmente con el suelo, la vegetación y el agua. Por otra parte, el control y el seguimiento de la degradación exigen trabajar en espacios geográficos grandes.

La Microcuenca del Río Delfín, ubicada dentro del distrito de Pozuzo en los últimos años está experimentando cambios muy importantes en la disminución de la productividad de los suelos, producto de una agricultura y ganadería sin ningún sistema conservacionista, donde las extensas áreas de monocultivos con especies forrajeras, introducidas para pastoreo de la ganadería, vienen sufriendo un proceso degradativo en las pasturas, directamente relacionado a la pérdida de la fertilidad de los suelos, esto ha disminuido drásticamente el margen de ganancias de los sectores ganaderos, siendo esta la base económica del distrito, temiéndose llegar en el futuro a una ganadería no rentable, si no se toma en cuenta prácticas ganaderas sostenibles. Esto ha generado la necesidad de desarrollar un sistema comprensivo de pautas para determinar la degradación de los suelos por diversos procesos, que proporcione información al detalle, estratégica, con mayor rapidez y menor costo, para que muchas instituciones competentes puedan tomar planes de conservación, mitigación y recuperación.

Se plantea la siguiente hipótesis de trabajo: Los suelos están formados por horizontes de material orgánico y roca meteorizada que hacen posible el crecimiento de las plantas al suministrarles soporte, agua y nutrientes, y cualquier impacto negativo puede provocar la degradación de un territorio, estos cambios negativos que ocurren en la naturaleza pueden ser caracterizados y vigilados usando técnicas de Teledetección basados en los indicadores físicos y biológicos de la vegetación.

Objetivo general:

Determinar los suelos degradados mediante técnicas de teledetección en la Microcuenca del Río Delfín, Pozuzo.

Objetivos específicos:

- ✓ Determinar el comportamiento espectral que presentan los diferentes niveles de degradación de suelos.
- ✓ Determinar la relación de los índices espectrales que mejor represente los suelos degradados, usando las fórmulas más utilizadas: el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y los nuevos índices desarrollados para estudios de la degradación de suelos.
- ✓ Ofrecer nuevas alternativas metodológicas para monitorear la degradación de suelos por satélite, con la validación de nuestro resultado.
- ✓ Describir las variaciones experimentadas por los suelos degradados mediante mapas.

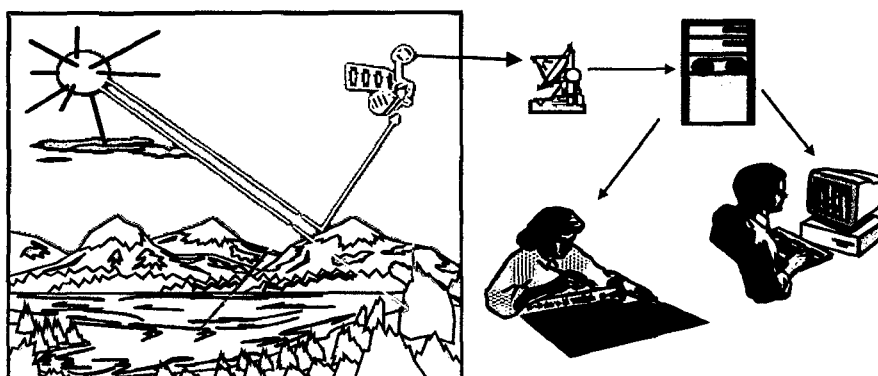


Figura 1. Sistema de teledetección

2.3. Radiación electromagnética

El principio físico de la teledetección espacial por tanto, radica, en la interacción de la radiación electromagnética con la superficie de la tierra y el sensor remoto; y es definida como aquella energía que se mueve a través del espacio armónicamente en componentes eléctrico y magnético, los mismos que se encuentran perpendiculares entre si. Si el flujo, viaja a velocidad de la luz, en forma de ondas y compuesta por una sucesión de unidades discretas de energía denominados fotones o cuantos (CHUVIECO, 1996).

2.4. Espectro electromagnético

Las características del flujo energético se describe también por sus propiedades expresadas, por su longitud de onda y frecuencia, cuyos valores identifican las diferentes radiaciones electromagnéticas que rodean nuestro medio y que agrupadas de manera continua y ordenada forma el espectro electromagnético (Figura 2) (CHUVIECO, 1996).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Teledetección

Por Teledetección entendemos, de modo genérico, cualquier procedimiento o técnica de adquisición de información sin tener contacto directo con ella. Sin embargo, de un modo más restringido, y en el ámbito de las ciencias de la tierra, la teledetección es entendida como una técnica que tiene por objeto la captura, tratamiento y análisis de imágenes digitales tomadas desde los satélites artificiales (CHUVIECO, 1996).

2.2. Mecanismo para la obtención de datos de satélite

Los elementos involucrados en la obtención de los datos satelitales son: fuente de energía, objeto y sensor. En consecuencia, la energía electromagnética es el elemento que interrelaciona al objeto y sensor, siendo la más importante, aquella producida por la reflexión (Figura 1), que se deriva directamente de la luz solar, principal fuente de energía de nuestro planeta; aunque también, existen otras energías que provienen de los propios objetos de la tierra (energía emitida) (Figura 1) o provenientes de un determinado sensor, como los sensores de radar, que emiten y recogen el flujo energético (CHUVIECO, 2002).

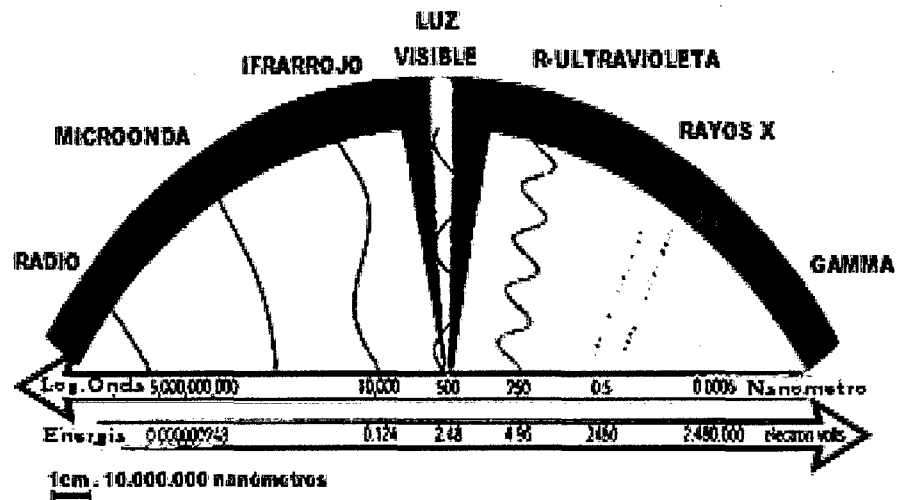


Figura 2. Espectro electromagnético

2.5. Bandas espectrales

Los diversos rangos de longitud de onda, que puede ser divididos o separados en el espectro electromagnético, reciben el nombre de región espectral o bandas espectrales, rangos que son útiles para identificar las características y propiedades físicas de cualquier tipo de material que existe en la superficie de la tierra (CHUVIECO, 1996). En la teledetección las bandas espectrales de mayor uso son:

2.5.1. Espectro visible

Comprende longitudes de onda entre los 0.4 y 0.7 μm y recibe su nombre, por ser la única radiación electromagnética perceptible por el ojo humano; dividiéndose en las tres bandas elementales: azul (0.4 - 0.5 μm), verde (0.5 - 0.6 μm) y rojo (0.6 - 0.7 μm) y acompañadas por una gama de tonalidades coloreadas (CHUVIECO, 2002).

2.5.2. El infrarrojo

Forma parte del espectro electromagnético cuyo rango oscila entre los 0.7 hasta los 14 μm , dividiéndose a la vez en: el infrarrojo próximo, el infrarrojo medio y el infrarrojo termal (CHUVIECO, 2002).

2.5.2.1. Infrarrojo próximo

Abarca longitudes de onda entre 0.7 - 1.3 μm y se lo aplica principalmente, para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.

2.5.2.2. Infrarrojo medio

Abarca longitudes de onda entre 1.3 - 8 μm y se utiliza para estimar contenido de humedad en la vegetación y detectar focos de elevada temperatura.

2.5.2.3. Infrarrojo lejano o térmico

Abarca longitudes de onda entre 8 - 14 μm , que incluye la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.

2.5.3. Microondas

Son radiaciones electromagnéticas, cuyas longitudes de onda son mayores al milímetro (mm) y resulta de gran interés por ser transparentes ante la cubierta nubosa y a las gotas de agua (CHUVIECO, 2002).

2.6. Sensores espaciales

El sensor es un elemento fundamental en el sistema de teledetección. Su misión es la de registrar la radiación electromagnética reflejada o emitida por la superficie de la tierra. Generalmente se encuentra instalados en aviones o satélites, cuyo propósito es el de obtener información sobre las propiedades del objeto, sin entrar en contacto directo con ellos (VARGAS, 1992).



Figura 3. Sensores espaciales

2.6.1. Satélite CBERS

El satélite de los recursos terrestres denominado CBERS (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres, o China-Brazil Earth Resources Satellite) es parte de la cooperación entre China-Brasil para el desarrollo de la Teledetección por satélite. La primera fase del programa fue alcanzada por el

lanzamiento de los dos satélites. CBERS-1 fue lanzado en octubre de 2001 y funcionado hasta el julio de 2003. CBERS-2 guardó la mayor parte de las características de CBERS-1, fue lanzado en octubre de 2003, y está trabajado correctamente y en una base rutinaria (EIPHANIO y FORMAGGIO, 2005).

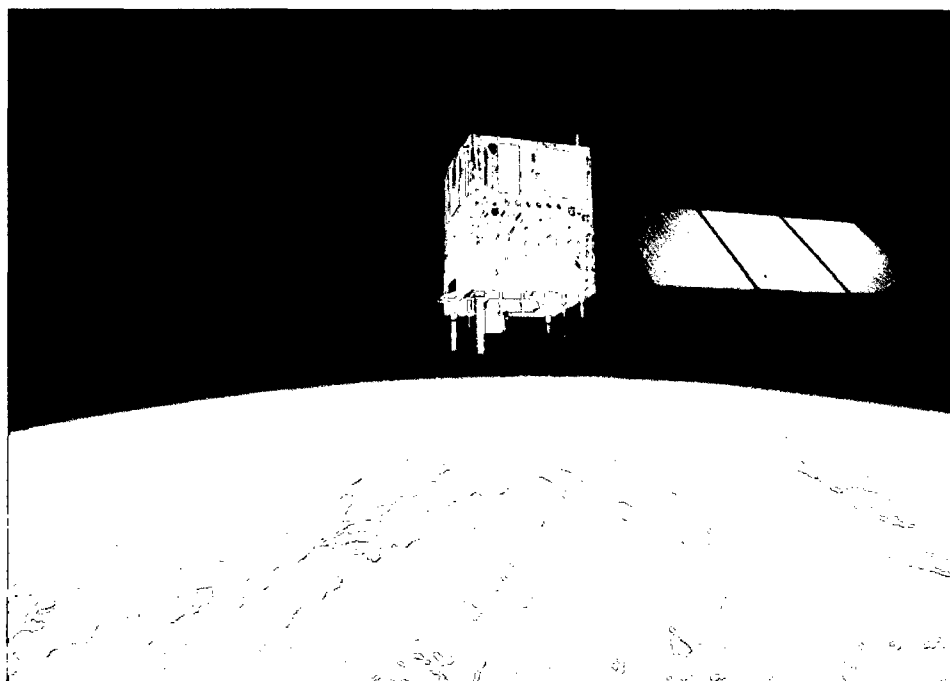


Figura 4. Satélite CBERS-2

Cuadro 1. Principales características del CBERS –2/CCD

Satélite	Periodicidad (días)	Franja de barrido (Km)	Sensor	Banda: Intervalo espectral (μm)	Resolución espacial (m)
CBERS –2	26	113	CCD	(B1) 0,45 - 0,52	19,5
				(B2) 0,52 - 0,59	19,5
				(B3) 0,63 - 0,69	19,5
				(B4) 0,77 - 0,89	19,5
				(B5) 0,51 - 0,73	19,5

Fuente: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE citada por EIPHANIO y FORMAGGIO (2005)

2.7. Teoría básica de la radiación solar y su influencia de la atmósfera en la teledetección

De acuerdo al Atlas de Radiación Solar de Colombia (1993) citada por GUZMAN (2002), la radiación solar es la energía emitida por el sol que se propaga en todas direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas, cuando se estudia la iluminación se habla de irradiancia, cuando se analiza esta radiación en el sentido tierra-sensor se denomina radiancia, y cuando se analiza el cuerpo reflector se denomina reflectancia. La radiación electromagnética se ve notablemente afectada por distintos componentes presentes en la atmósfera, ya que ellos la dispersan o absorben en las diferentes longitudes de onda lo cual crea una dificultad en la observación remota de la superficie terrestre. Es conveniente considerar que la radiancia detectada por los sensores esta en función de los ángulos polar, azimutal y de elevación solar, para un intervalo en longitud de onda, la medida que hace el sensor entonces involucra una radiación propia de la superficie terrestre, la emitancia espectral de la cubierta y una contribución por la absorción o dispersión de flujo radiante desde el sol. El flujo de radiación electromagnética sufre una serie de procesos los cuales son:

- Pérdida o escalaje de la cantidad e intensidad del flujo incidente (A).
- Dispersión del flujo incidente en dirección de la superficie (B).
- Dispersión del flujo incidente en dirección del campo de visión (C).

- Dispersión del flujo reflejado en dirección del campo de visión (D).
- Radiación emitida por otras cubiertas en dirección del campo de visión (E).

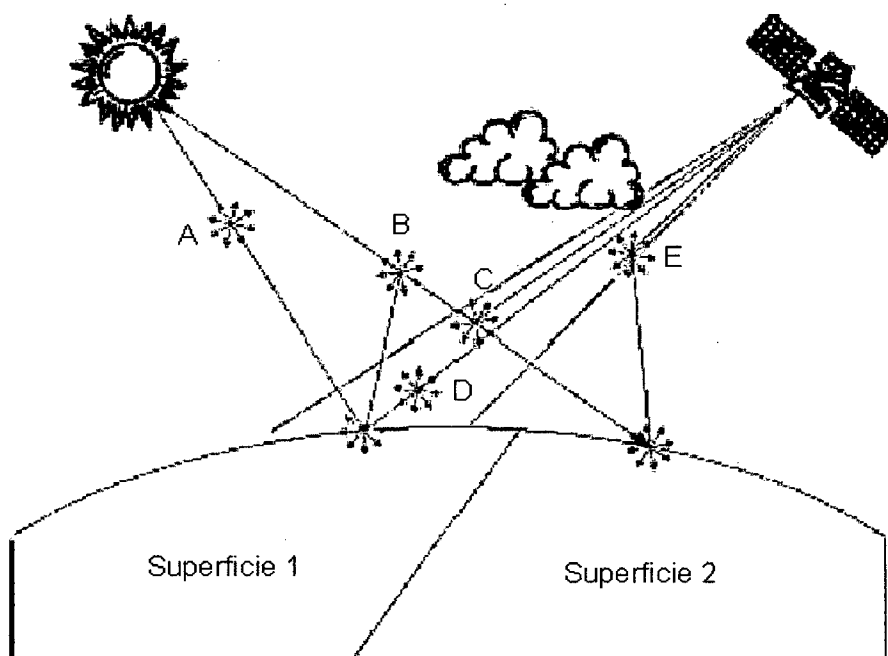


Figura 5. Papel de la atmósfera en la teledetección (SLATER, 1980)

Estos factores están relacionados mediante la siguiente expresión (CHUVIECO, 2002): ecuación (1)

$$L_s = L_{Superficie,c} E_c + L_{atm,c} \quad (1)$$

Donde L_s es la radiancia recibida por el sensor, $L_{Superficie,c}$ es la radiancia emitida por la superficie, E_c es la emisividad del suelo y $L_{atm,c}$ es la radiancia intrínseca de la atmósfera. La interacción de la atmósfera de la ecuación (1) incluye la dispersión, absorción de la radiación por gases y partículas en el medio

atmosférico, es decir esta muestra una simplificación de la cual se puede observar que la radiancia verdadera de la superficie observada está afectada por el error provocado por la presencia de la atmósfera.

2.8. Consideraciones físicas geométricas de interés para el cálculo de la reflectancia aparente

2.8.1. Ángulo cenital solar

El ángulo cenital solar y la altitud del sol o ángulos de elevación, como se define en la Figura 6, son ángulos complementarios que describen la posición del sol con la relación al cenit y al plano ortogonal al cenit, respectivamente. La posición del sol es factor en la cantidad de radiación atmosférica incidente presente, de la cantidad de irradiancia en el terreno y radiancia atmosférica tipo upwelling (efecto de adición de radiancia atmosférica) detectada por el sensor.

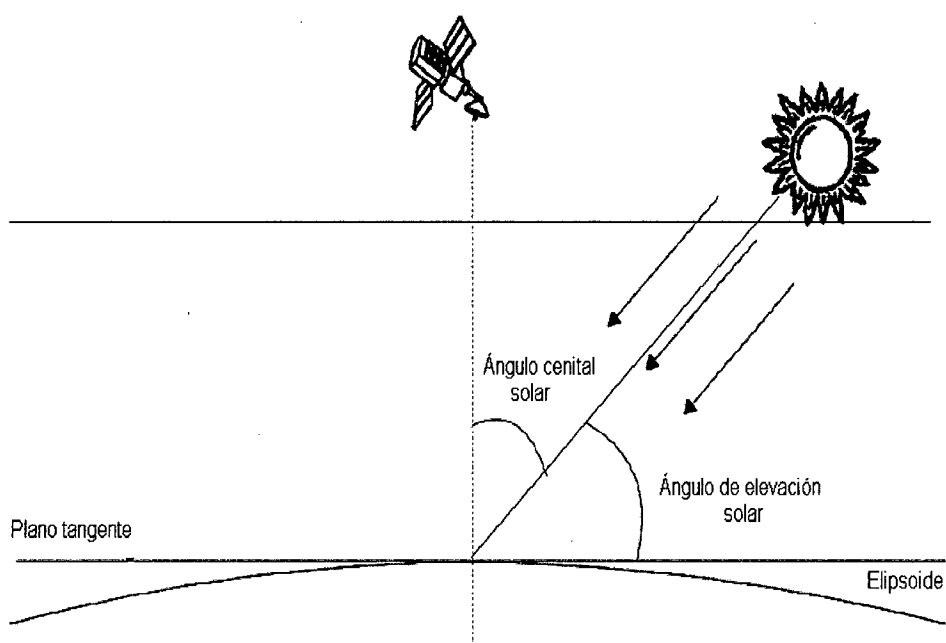


Figura 6. Ángulo cenital solar (SLATER, 1980)

2.8.2. Distancia Tierra-Sol

La distancia tierra-sol posee una magnitud que varía con la posición de la tierra en la eclíptica para un instante de tiempo. La distancia tierra – sol promedio es igual $149, 46 \times 10^6 \text{ km}$ (1 unidad astronómica) con una variación del 1.7%. La distancia Tierra – Sol puede ser calculada a través de la ecuación:

$$D = (1 + 0.01674(\text{sen}\alpha))^2 \quad (2)$$

Donde:

D = distancia tierra-sol (en unidad astronómica)

$\alpha = (2\pi(J - 93.5)/365)$

J = Día Jouliano

La Figura 7, muestra que para valores de 0° en el ángulo α la tierra se encuentra en la posición más cercana al sol llamada perihelio, cuando α es igual a 180° la tierra se encuentra en la posición más distante al sol denominada afelio.

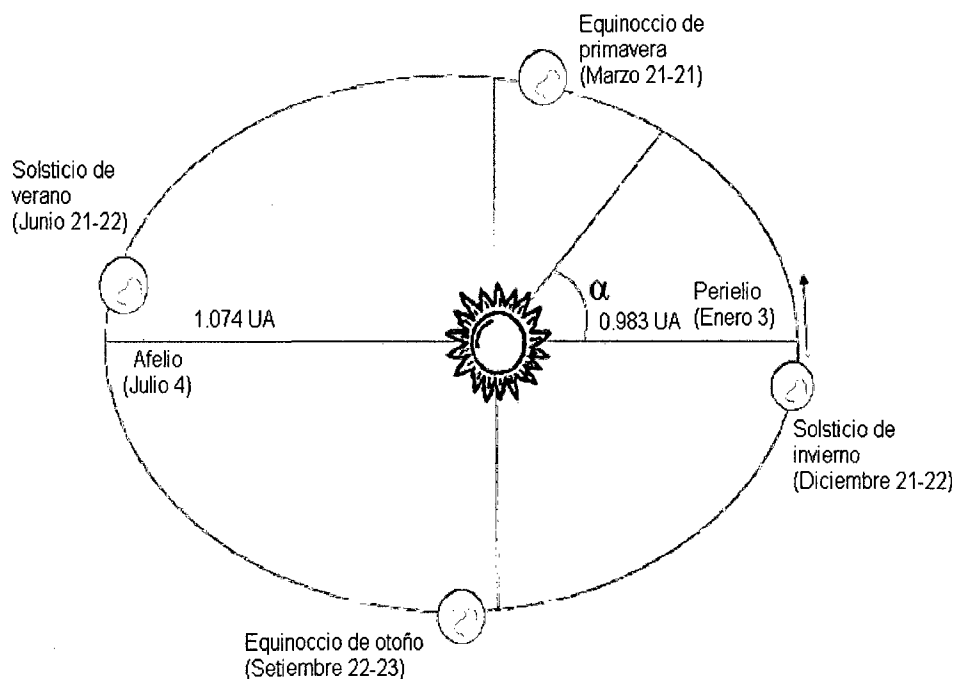


Figura 7. Posición de la Tierra con respecto al Sol (GUZMAN, 2002)

2.9. Correcciones radiométricas

Son técnicas que modifican los niveles digitales (ND) originales, con el objetivo de medir la respuesta espectral de cualquier objeto de la superficie terrestre en la imagen con una recepción ideal. La conversión de ND almacenados en una imagen original a variables físicas es un paso previo que resulta de gran utilidad en múltiples fases de la interpretación de imágenes, ya que permite trabajar con variables físicas de significado estándar, comparables en un mismo sensor a lo largo del tiempo, entre distintos sensores y entre la teledetección espacial y otros métodos de detección de energía electromagnética (CHUVIECO, 2002). Estas correcciones nos permite eliminar los problemas radiométricos derivados de un mal funcionamiento del sensor, el efecto de la inclinación del satélite o de la posición del sol, o incluso el estado de la atmósfera, de tal forma que las medidas tomadas por el satélite sean

comparables entre si, a un cuando se hayan realizado en condiciones muy diversas (SOBRINO, 2000).

2.9.1. Conversión de ND a radiancia

Las siguientes tablas se muestran los siguientes valores de radiancia espectral establecidos para cada uno de los sensores.

Cuadro 2. Calibración del CBERS-2/CCD con datos del ASTER.

Radiancia Espectral, $L_{\min k}$ y $L_{\max k}$ en $\text{mw}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$		
Datos Procesados		Julio 07, 2004
Banda	Radiancia mínima ($L_{\min k}$)	Radiancia máxima ($L_{\max k}$)
B2	0.00	13.212
B3	0.00	22.090
B4	0.00	11.989

Fuente: (ANTUNES y JUNIOR, 2005)

La radiancia espectral para el sensor CCD se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$L_{\text{senk}} = \left(\frac{L_{\max k}}{Q_{\text{Cal max}}} \right) Q_{\text{cal}} \quad (3)$$

L_{senk} = Radiancia espectral recibida por el sensor en la banda k en $\text{w}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$;

Q_{Cal} = Valor de píxel en la imagen en números digitales (DNs);

$Q_{\text{Cal max}}$ = Valor digital máximo (ND = 255) corresponde a $L_{\max k}$;

$L_{\max k}$ = Radiancia espectral que corresponde valores de $Q_{\text{Cal max}}$ en $\text{w}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$.

2.9.2. Conversión de radiancia a reflectancia

La reducción de la variabilidad media de las escenas se puede conseguir con una normalización de la irradiancia solar por conversión de la radiación espectral a reflectancia planetaria o fuera de la atmósfera (exo-atmosférica). Cuando comparamos imágenes de diferentes sensores, hay dos ventajas al usar reflectancia en lugar de radiancia. Primero, el efecto de los cosenos de los diferentes ángulos solares del cenit debido a la diferencia del tiempo entre las adquisiciones de datos puede ser quitado, y en segundo lugar, esto compensa los diferentes valores de las irradiancias solares exo-atmosférica ($E_{SUN\lambda}$) que presentan diferencias para diversas longitudes de bandas espectrales (CHANDER y MARKHAM, 2003). Las medidas del $E_{SUN\lambda}$ dependen de la banda, no solo pueden ser aplicados a bandas del sensor TM, sino también a otros sensores donde son conocidas las funciones de respuesta espectral (MARKHAM y BARKER, 1986).

Cuadro 3. Irradiancia espectral solar fuera de la atmósfera para el Satélite Landsat-5/TM.

$E_{sunk} = \text{mw}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m})$	
Banda	E_{sunk}
B1	195.7
B2	182.9
B3	155.7
B4	104.7
B5	21.93
B7	7.452

Fuente: (MARKHAM y BARKER, 1986)

Para este trabajo la ecuación utilizada para obtener la reflectancia planetaria es como sigue en la ecuación (CHANDER y MARKHAM, 2003).

$$\rho_k^* = \frac{\pi L_{senk} D}{E_{sunk} \cos \theta_i} \quad (4)$$

Donde:

ρ_k^* = Reflectancia planetaria o reflectividad aparente;

L_{senk} = Radiancia espectral recibida por el sensor en la banda k en $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$;

D = Es el factor corrector de la distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas;

E_{sunk} = Irradiancia solar media fuera de la atmósfera en $Wsr^{-1}m^{-2} \mu m^{-1}$;

θ_i = Ángulo cenit del Sol en grados (ángulo cenit = 90 – ángulo de elevación solar).

2.9.3. Corrección atmosférica

En definitiva, la radiancia que recibe el satélite no es la misma que sale del suelo (es ésta la que interesa, pues pretendemos medir la reflectividad de la cubierta, no la influida por la atmósfera). Para calcular la reflectividad de la superficie necesitamos estimar la transmisividad de la atmósfera (descendente, y ascendente), la irradiancia difusa y la irradiancia atmosférica debida a la dispersión. Los procedimientos para abordar estas correcciones con exactitud son muy laboriosos y requiere datos sobre las condiciones de la atmósfera en el momento de tomar la imagen, que no suelen estar disponibles. Además, el efecto de la atmósfera no es constante en la imagen, sino que

determinadas zonas pueden haber sido más afectadas que otra, en función de la diversa presencia de aerosoles o vapor de agua (CHUVIECO, 2002). Los métodos de corrección atmosférica pueden ser divididos en dos grupos. Los que usan métodos complejos tales como modelos numéricos de transferencia radiativa (TANRÉ *et al.*, 1990 y VERMOTE *et al.*, 1997) y aquellas que usan modelos mas simples para la eliminar la dispersión y la turbidez atmosférica a través de la sustracción del valor del píxel oscuro (CHUVIECO, 2002). Para nuestro trabajo utilizaremos el método COST de corrección atmosférica desarrollada por CHAVEZ (1996) que consiste en utilizar un “objeto oscuro” como objeto de calibración. El objeto oscuro puede ser una región de proyección de sombra o, en algunos casos, un cuerpo de agua profundo. El método supone que el objeto oscuro tiene uniformemente radiancia igual a cero para todas las bandas, y que cualquier medida diferente de cero de radiancia puede ser atribuida al efecto del dispersión atmosférico es obtenida por la simple sustracción de los valores de números digitales (ND) de todos los píxeles en la banda correspondiente, dado que la calibración de la radiancia del sensor para los ND es lineal. Este método supone una dispersión uniforme en toda la escena, el que raramente acontece. Es calculada según la siguiente ecuación:

$$\rho_k = \frac{D\pi(L_{sen,k} - L_{a,k})}{E_{sunk} \cos \theta_i \tau_{k,i}} \quad (5)$$

Donde:

ρ_k = Reflectividad de la superficie o reflectividad real;

L_{senk} = Radiancia espectral recibida por el sensor en la banda k ($Wsr^{-1}m^{-2} \mu m^{-1}$);

$L_{a,k}$ = La radiancia aportada por la dispersión atmosférica de la ecuación:

$$L_{a,k} = \left(\frac{L_{\max k} - L_{\min k}}{Q_{\text{Camalx}}} \right) Q_{\text{cal min}} + L_{\min k} \quad (6)$$

D = Es el factor corrector de la distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas;

$\tau_{k,i}$ = Valores promedio de transmisividad atmosférica que afecta al rayo incidente.

$\tau_{k,i}$ = 0.70 (b1), 0.78 (b2), 0.85 (b3), 0.91 (b4) y 1 para las bandas del SWIR (b5, b7).

2.10. Corrección geométrica

Las correcciones geométricas de la imagen incluyen cualquier cambio de posición que ocupan los píxeles que la forma. Por contraposición con las correcciones radiométricas, aquí no se modifica los ND de los píxeles de la imagen, sólo se corrige su posición, sus coordenadas. Por tanto, esta transformación puede emplearse para corregir cartográficamente una imagen. La corrección geométrica de imágenes puede abordarse de acuerdo a dos procedimientos. En el primer, denominado corrección orbital, se pretende modelar aquellas fuentes de error geométrico conocidas, a partir de aplicar transformaciones inversas a las que realiza el sensor en el momento de la adquisición. Para ello es preciso disponer, con bastante detalle, de las características orbitales de la plataforma y de las especificaciones del sensor. Gracias a ellas se pueden corregirse errores sistemáticos, como los derivados de la rotación o curvatura terrestre y de la inclinación de la órbita. El segundo enfoque resulta más empírico. Se trata de evaluar el error geométrico de la

imagen a partir de una serie de puntos con coordenadas conocidas, que se denominan puntos de control. Por su parte, el método de puntos de control resulta bastante tedioso, pues requiere una notable intervención humana para localizar adecuadamente esos puntos, pero ofrece una alta exactitud cuando se trabaja sobre zonas e imágenes en donde es clara la identificación de rasgos comunes a la cartografía básica (CHUVIECO, 2002).

2.11. Conceptos de degradación de los suelos

Según HILL *et al.* (1998) explican que la degradación es el resultado de las interacciones entre las características climáticas y las intervenciones humanas que llevan al desequilibrio ecológico. Hoy en día, las prácticas inadecuadas del uso del suelo (la extensión de los pastos, la colección de leña, quemadas incontroladas) son la fundamental causa de la fuerte degradación. Los impactos socioeconómicos son los aceleradores de los procesos de degradación por disturbios de las interacciones complejas del crecimiento de la planta, formación de los suelos y procesos de erosión. Los indicadores físicos más importantes de la degradación están relacionados a la destrucción del suelo y de la vegetación. Según MACEDO y ZIMMER (1993) explican que la degradación de suelos en pasturas como el proceso evolutivo de la pérdida del vigor de la vegetación, la productividad, la capacidad de recuperación natural para sustentar los niveles de producción y de la capacidad de superar los efectos nocivos de plagas y enfermedades.

2.11.1. Procesos de degradación de suelos

La degradación de los suelos puede ser vista en términos de sus efectos nocivos, según LAL (1998) pueden dividirse en físicos, químicos, biológicos y estos procesos incluyen: (1) erosión del suelo, (2) compactación del suelo, (3) agotamiento de nutrientes, (4) acidificación, (5) reducción de materia orgánica del suelo, y (6) salinización). La severidad de la degradación se basa normalmente en la pérdida de la productividad potencial, que puede clasificarse como (1) degradación leve con poco o nada de degradación; (2) moderada; (3) severa; y (4) muy severa, que se considera degradación económicamente irreversible (LAL, 1994). Según BARCELLOS (1986), la deficiencia del nitrógeno (N) en el suelo es el primer factor que afecta la persistencia y provoca el inicio de la degradación de pasturas mejoradas, una vez que ocurre la deficiencia de este nutriente la calidad y el vigor de las plantas comienzan a declinar como consecuencia de la reducción de la actividad biológica y la deficiencia de otros nutrientes, como fósforo y potasio.

2.11.2. Caracterización de la degradación de los suelos

BARCELLOS (1986) y ROSA (2003) clasificaron a los diferentes niveles de degradación de suelos en pasturas en: bajo, medio y alto. Considerando una pastura con niveles bajos de degradación cuando las plantas presentan pérdidas de vigor vegetativo (debilitamiento), contribuyendo para esto las condiciones edáficas y climáticas de la región donde se encuentra la pastura. Con el pasar del tiempo, después de su establecimiento, una pastura puede ir perdiendo su vigor vegetativo y consecuentemente

disminuyendo su capacidad de producción de forrajes, cobertura del suelo (que permite el apareamiento de algunas invasoras), en virtud de varios factores, dentro los cuales podemos citar: la pérdida de la fertilidad de los suelos, manejo inadecuado, sobrepastoreo y las condiciones climáticas. Una pastura bajo esas condiciones caracteriza un nivel medio de degradación. Caracteriza un nivel alto de degradación en pasturas donde hay una acentuada presencia de especies invasoras, alto porcentaje de suelo expuesto en el área, termitas (orden Isóptera), y básicamente, como consecuencia de la falta de cobertura del suelo y la erosión.

2.11.3. Indicadores de la degradación de suelos

Son muchos los indicadores y las señales de detección temprana de la degradación y la desertificación, que así mismo prestan los sensores basados en la vigilancia. Estos incluyen (1) pérdida de la cubierta vegetativa, (2) aumento de reflectancia, (3) erosión eólica y erosión hídrica, (4) salinización del suelo, (5) deterioración de la estructura del suelo y superficie del suelo, (6) menor humedad del suelo, (7) cambios en contenidos de óxidos del hierro, (8) reducción de los niveles de materia orgánica, (9) los cambios de tipo y de la especie de la cubierta de la tierra, (10) variabilidad creciente de las características del suelo, (11) actividad y movimiento de la arena, y (12) aumento del área superficial de la roca (HUETE *et al.*, 2002). La dinámica de la vegetación es uno de los indicadores más importantes para revelar la existencia de un proceso de degradación (YOUNIS *et al.*, 1999).

2.11.4. Propiedades que controlan la reflectancia del suelo

Las firmas de reflectancia espectral resultan de la presencia o ausencia así como la posición y la forma de absorción específica de estos constituyentes. La absorción es causada a veces por varios fenómenos químicos-físicos tales como las vibraciones intermoleculares y procesos electrónicos en átomos. En las regiones del visible y del infrarrojo (NIR) (0.4 A 1.3 μm) son caracterizados por amplio rango absorción espectral. Consecuentemente, la mayoría de los suelos exhiben la reflexión de aumento con longitudes de onda sobre el visible o porciones del espectro del NIR (MULDERS, 1987). Muchos de los suelos espectrales al estar tan juntos, hacen difícil distinguirlos, como resultado, solamente se ha encontrado un número limitado de formas de curvas espectrales que son discriminados con la Teledetección (HUETE *et al.*, 2002). Estudios de STONER y BAUMGARDNER (1981) indican que las firmas espectrales de los suelos son controlados en gran parte por los óxidos de hierro, moléculas orgánicas, y agua que cubre las partículas del suelo en la superficie. Según HUETE *et al.* (2002) indican que la presencia de hojarasca y otras vegetaciones no fotosintéticas sobre la superficie del suelo influyen los resultados de las firmas espectrales. Muchos estudios han investigado las propiedades químicas y ópticas de las materias orgánicas de los suelos en función de las características de las plantas. También, ADAMS *et al.* (1995) mencionan que muchas de las propiedades de los suelos pueden deducirse de las medidas de la superficie vigorosa conjuntamente con modelos, datos de campo, y el conocimiento de la forma de la tierra, los suelos contribuyen a las señales medidas del sensor y

pueden ser significativos con las actividades de conversión de la tierra que exponen la superficie del suelos, así como la tala de bosques, quemas, extensión agrícola y de pasto, y desastres naturales.

2.11.5. Interacciones óptico – geométrico en los suelos

Las longitudes de ondas cortas en su mayoría son afectadas, la rugosidad y la geometría sol-suelo alteran en la signatura espectral y las interferencias de sus propiedades básicas así como la mineralogía de los suelos. Las distribuciones de los tamaños de partículas y variaciones altas en la superficie (rugosidad) son los más importantes factores que influyen la reflectancia bidireccional de los suelos desnudos. Ellos causan una disminución en la reflectancia con el incremento del tamaño de la rugosidad de los elementos. Generalmente los suelos lisos, cortezudos, sin estructura reflejan más energía y son más brillantes. A pesar de tener distribuidas partículas de tamaños finos, los suelos arcillosos tiende a ser más oscuros que un suelo arenoso, puesto que los agregados de las arcillas se comportan grandes por sus superficies rugosas (HUETE y ESCADAFAL, 1991).

2.12. El problema de la degradación de suelos y su importancia para la investigación

ROSA (2003), la causa de esta degradación está relacionada los factores como: manera de preparar los suelos, escoger las especies forrajeras, fertilización, ataque de plagas, uso de fuego, ausencia de asociaciones, manejo

inadecuado de pastoreo, entre otros. Como consecuencia la pérdida de la calidad y el potencial de producción del suelo.

2.13. Vigilancia de la degradación de suelos con observaciones de satélite

La Teledetección basada en los satélites con su visión temporal y sinóptica, se ha utilizado con éxito como un punto de partida en la supervisión y el control de la desertificación. Las observaciones basadas desde el espacio ofrecen la oportunidad de monitorear y estimar cambios en el suelo y las características de la vegetación que asocian a la degradación de la tierra. La Teledetección proporciona una técnica cuantificable y replicable para determinar la desertificación bajo metodologías unificada en las escalas regionales y globales que pueden contribuir con los siguientes objetivos; (1) generar información para el análisis de imagen de satélite; (2) establecer métodos cuantitativos para la evaluación de la degradación con índices definidos; y (3) aplicaciones de técnicas de satélite para el mapeamiento y monitoreo (HUETE *et al.*, 2002). El desarrollo de índices espectrales y su interpretación en el contexto temático de la supervisión de la degradación de la tierra requieren un marco conceptual que permita que dibujemos conclusiones sucintas sobre las condiciones superficiales de la tierra (HILL *et al.*, 1998). Aunque estos conceptos subyacentes pudieran variar en función de característica regional del ecosistema, los resultados de diversas regiones se deben evaluar constantemente en un nivel jerárquico más alto de modo que el sistema a la fuerte degradación pueda ser medido usando datos derivados de las imágenes de satélite. Las importantes conclusiones sin embargo dependen

sobre nuestra habilidad en el análisis multitemporal de series de tiempo. Por esta razón estudios retrospectivos son importantes para el desarrollar acercamientos para el continuo monitoreo de los cambios medioambientales (GRAETZ, 1996). Y XIAO *et al.* (2005) mencionan que el tiempo y recurso para obtener mapas de degradación de suelos a escalas regionales o continentales usando métodos tradicionales es costoso. Para esto determinó un nuevo índice espectral para monitorear la degradación de la tierra usando imágenes de satélite, con las técnicas de Teledetección puede ser monitoreado los cambios medioambientales más importantes, concentrado sobre la habilidad de proveer una caracterización estandarizada de las condiciones de la superficie y de la cubierta vegetal en el tiempo. HUETE *et al.* (2002) indican que la exactitud de la Teledetección es explotar y modelar la relación de los patrones complejos de las interacciones superficiales de la energía con el fin de tratar y extraer información sobre las características biofísicas y bioquímicas de los suelos.

2.14. Firmas espectrales utilizadas para estudios de la degradación de suelos

La combinación de los distintos materiales sobre la superficie terrestre combinado por la influencia que, en ellos ejerce los factores externos y las variaciones medio ambientales, se plasma en la denominada respuesta o firma espectral (Figura 8); cuya rúbrica, representa la energía electromagnética reflejada o emitida en diferentes longitudes de onda y registrada por el sensor durante su trayecto. Datos de laboratorio, permiten diseñar las curvas ó firmas espectrales para cada uno de los materiales de la corteza terrestre en función

de su longitud de onda, las mismas, que están determinadas por sus características físicas y químicas internas, lo que permite decidir con cierto grado de certeza, las bandas ó las longitudes de onda a usarse, con el fin de tener un eficiente procesamiento de imágenes de interés particular. El análisis y evaluación de estas curvas, reflejará el comportamiento de la reflectancia de cualquier material expuesto en la superficie, de esa manera, las declinaciones observadas, así como la posición de los rangos de absorción, se constituye en los principales parámetros de diagnóstico tanto de minerales, suelos, vegetación o cualquier material sobre la superficie terrestre (CHUVIECO, 2002).

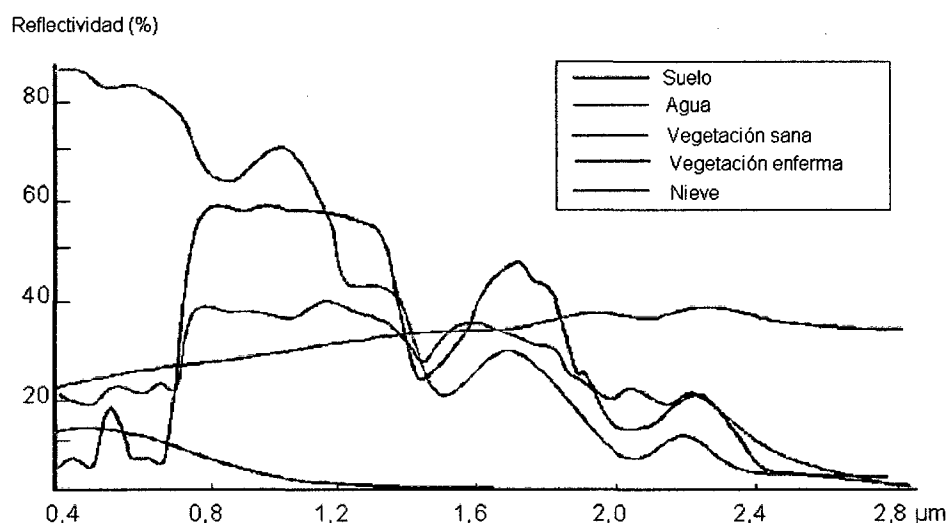


Figura 8. Firmas espectrales

A lo largo de longitudes de ondas del visible y el infrarrojo se pueden distinguir las siguientes regiones en las que las distintas variables fisiológicas controlan la reflectancia resultante de la capa vegetal (TUCKER, 1980):

De 0.35 a 0.50 μm : regiones que son caracterizadas por la fuerte absorción de los carotenoides y las clorofilas, constatándose una fuerte relación entre la reflectancia espectral y los pigmentos presentes en la planta. Es la banda 1 (B1) del sensor CCD.

De 0.50 a 0.62 μm : sólo se produce un ligero efecto de absorción por pigmentos, siendo la relación entre la reflectancia y éstos mucho menor que en la anterior. Es la banda 2 (B2) del sensor CCD.

De 0.62 a 0.70 μm : aquí se produce una fuerte absorción por la clorofila, existiendo una alta correlación entre la reflectancia y el contenido de clorofila en la vegetación. Es la banda 3 (B3) del sensor CCD.

De 0.74 a 1.30 μm : por la ausencia de absorción se da una elevada reflectancia, con una fuerte relación entre la reflectancia medida y cantidad de vegetación presente (KNIPLING, 1970). Es la banda 4 (B4) del sensor CCD.

Las firmas espectrales de los vegetales son bastante complicadas que las de otros materiales como las rocas, debido a la interacción de la radiación con la clorofila y otros pigmentos. La reflexión y la emisión desde la cutícula y la epidermis son relativamente secundarias; la clorofila absorbe la mayoría de la luz azul y roja del espectro mientras que la luz verde es fuertemente reflejada, sin embargo, la energía en la parte del infrarrojo cercano no resulta apenas afectada por la clorofila, pero sí por la estructura esponjosa

de los tejidos de mesófilo, en la parte interna de la hoja (SOBRINO, 2000). Se han efectuado experimentos semejantes con resultados igualmente satisfactorios, sobre cultivos de cereales con ejemplares sanos y enfermos, detectando en el infrarrojo cercano así como un corrimiento del pico de reflectividad en el verde hacia el rojo, a causa del amarillamiento de las plantas causadas por el deterioro de los cloroplastos en las plantas enfermas (RAO *et al.*, 1978). El estrés hídrico, es decir, el conjunto de condiciones abióticas que producen serios déficit de agua en las plantas, limitando la fotosíntesis y el crecimiento, se puede estudiar mediante la detección de la cantidad de agua contenida en las hojas, para lo que se ha sugerido que puede ser una zona del espectro donde la absorción del agua no sea demasiado fuerte que una donde si lo es (1.90 a 2.05um) (TUCKER, 1980). La reflectancia también depende de la humedad del suelo, y es menor cuando mayor es el contenido de agua. Además de estos efectos, la concentraciones de materia orgánica, óxido de hierro y la propia estructura influyen en las características espectrales de los distintos suelos, siendo todos ellos factores importantes a determinar en distintas aplicaciones (HUETE *et al.*, 2002).

2.15. Índices espectrales en la caracterización de la degradación de suelos

Según HUETE *et al.* (2002), las características de los niveles de degradación pueden ser monitoreadas con imágenes de satélite, usando índices espectrales y modelos mezclados, indica que para caracterizar la degradación de la tierra se identifica un sitio natural y zonas alteradas para

determinar el potencial hiperespectral de las imágenes de satélite para estudiar los cambios de cobertura de la tierra, la ecología, y la degradación. ROSA (2003) ha caracterizado tres niveles de degradación en pasturas que están directamente en relación a la degradación de los suelos usando el NDVI para imágenes Landsat-5/TM, obteniendo valores promedio índices espectrales para diferentes niveles de degradación: baja de 0.5217, medio de 0.6325 y alto de 0.4615. Indicando que la banda 4 (B4) del infrarrojo próximo sufre confusiones espectrales que afecta al NDVI en el momento de clasificar los niveles bajos y medio de degradación, especificando que se debe a cantidades de materia seca y también mayor sombreado, presentes en las pasturas con bajo nivel de degradación y los niveles medios poseen una cobertura verde más uniforme y un sombreado menor. XIAO *et al.* (2005) desarrollaron el índice Topsoil Grain Size Index (GSI) usando imágenes del sensor MODIS del satélite TERRA, para monitorear la degradación de la tierra en todo el continente Asiático. Clasificó cuatro niveles de degradación de suelos: no degradados, leves, moderados y severo. Se basó sobre pruebas de campo y análisis de laboratorio. Determinando que las reflectancias cambian acompañado con los cambios de distribución del tamaño granulométrico, especialmente contenido fino de las arenas y el contenido de arcillas. El contenido del tamaño granulométrico de la superficie de los suelos puede ser usado como una herramienta para medir y detectar los procesos de degradación de los suelos. El Índice es calculado de la siguiente ecuación:

$$GSI = (R - B) * (R + B + G) \quad (7)$$

Donde R corresponde a la bandas del Rojo y B a las bandas del azul y G a las bandas verdes de las regiones del visibles del espectro electromagnético. Obteniendo valores de índices altos para suelos severamente degradados, localizadas en zonas desérticas que varían en un rango (0.1-0.15) y los índices bajos que oscilan en el rango (0-0.025) indicando las áreas no degradadas.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI) fueron desarrollados por JACKSON *et al.* (1983), unos de los índices muy utilizados en trabajos de teledetección aplicados a la agricultura y al estudio de los recursos naturales, es un parámetro calculado a partir de los valores de reflectividad a distintas longitudes de onda y que pretende extraer la información relacionada con la vegetación minimizando la influencia de otros factores externos como las propiedades ópticas del suelo, la irradiancia solar. Es calculado según la siguiente ecuación:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (8)$$

2.16. Métodos estadísticos utilizados para la clasificación de la degradación

2.16.1. Exactitud total

La exactitud total es calculada sumando el número de los píxeles clasificados correctamente y dividiéndose por el número total de píxeles. La observación de terreno define la clase verdadera de los píxeles. Los píxeles clasificados correctamente se encuentran a lo largo de la diagonal de la tabla

de la matriz de confusión que enumera el número de los píxeles que fueron clasificados en la clase correcta de la verdad del terreno.

2.16.2. El coeficiente kappa (k)

El coeficiente Kappa (K) es otra medida de la exactitud de la clasificación. Es el grado de concordancia esperable por azar se puede calcular a partir del producto de los marginales de la tabla de contingencia.

Cuadro 4. Interpretación de los valores de kappa

kappa	Grado de concordancia
< 0.20	Mala
0.21 – 0.40	Ligera
0.41 - 0,60	Moderada
0.61 - 0,80	Buena
0.81 – 1.00	Excelente

Si el valor kappa es de 1 si hay un total acuerdo; si el acuerdo observado es igual al esperado, kappa vale 0, y es menor de 0 si el acuerdo observado es menor que el esperado por azar (COHEN, 1960). La kappa estadística para trabajar con datos espaciales fue calculada por CONGALTON (1991) con la siguiente ecuación:

$$k = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} x_{+i})} \quad (9)$$

Donde r es el número de filas en la matriz, x_{ij} el número de observaciones en la fila i y columna j , x_{i+} y x_{+i} son el total marginal de filas i y columna i , respectivamente, y N es el número total de observaciones.

2.16.3. Exactitud producida

Es una medida que indica la probabilidad que el clasificador ha etiquetado un píxel de la imagen en la clase A dado que la observación de terreno es la clase A.

2.16.4. Exactitud usada

Es una medida que indica la probabilidad que un píxel es la clase A dado que el clasificador ha etiquetado el píxel en la clase A.

2.16.5. Distancia mínima

También llamada distancia espectral, calcula la distancia espectral de cada píxel con la media de cada firma. Cada píxel es asignado a la clase cuya media espectral es más cercana al valor del píxel. Las ventajas son que no quedan píxeles sin clasificar y que es un método rápido. Las desventajas, que píxeles espectralmente lejos de cualquier firma son asignados de todas formas a alguna clase.

El centroide de una clase es un vector, cuyas componentes son las medias aritméticas de los valores de muestra de los píxeles de esa clase en cada banda. Se emplea la distancia euclidiana:

$$d_{ai} = \sqrt{\sum_{k=0}^n (x_{ak} - \bar{x}_{ki})^2} \quad (10)$$

Donde:

d_{ai} es la distancia del píxel 'a' a la clase 'i'

x_{ak} es la componente 'k' del píxel 'a'

\bar{x}_{ki} es la componente k de la media de los píxeles de la clase i

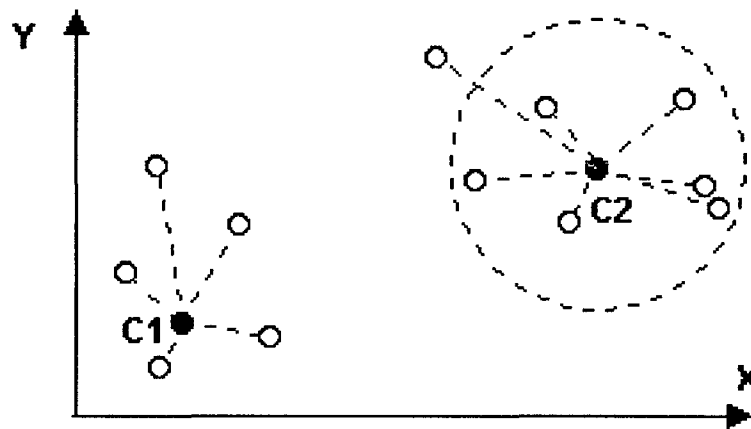


Figura 9. Método de clasificación de distancia mínima (ENVI 3.5, 2001)

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación de la zona de estudio

La Microcuenca del Río Delfín se encuentra ubicada en el distrito de Pozuzo, provincia de Oxapampa, departamento de Pasco. Geográficamente se sitúa entre los paralelos de 10°04'00" y 10°07'00" de latitud sur y los meridianos 75°03'00" y 75°52'00" de longitud oeste.

El distrito de Pozuzo abarca una superficie de aproximadamente 130,000 Ha, distribuidas en la vertiente oriental de la cordillera en la región denominada de Selva Central. La microcuenca en estudio (Figura 10), presenta una extensión aproximadamente de 4393 Ha y una altitud que va desde los 800 hasta los 3100 m.s.n.m. Su ubicación le confiere una fisiografía principalmente montañosa, con valles que generan paisajes de mosaicos muy vistosos por los contrastes entre la vegetación natural de los bosques y las pasturas artificiales (pastizales).

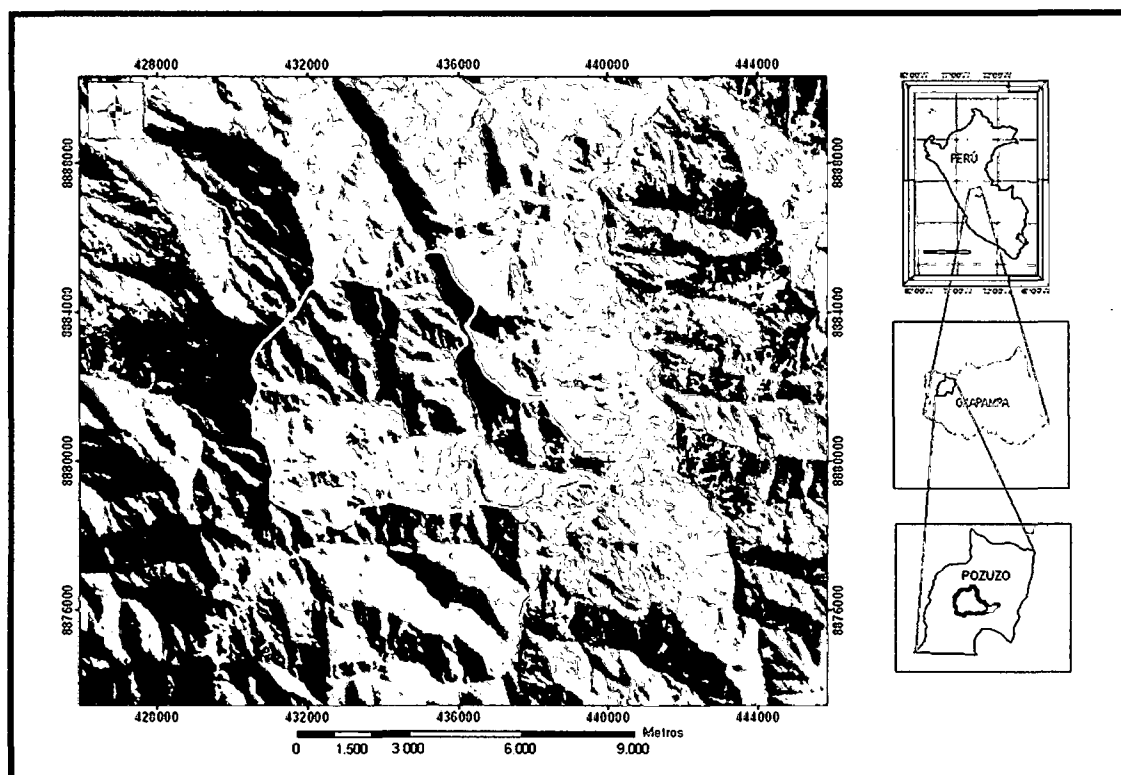


Figura 10. Mapa de ubicación

3.2. Características del área de estudio

3.2.1. Clima

La precipitación total media anual es de 2379 mm, presentando: épocas de lluvias (noviembre a abril), denominada estación húmeda, lluviosa o “invierno” y épocas de estiaje (mayo a octubre), denominada estación seca o “verano”.

3.2.2. Humedad

La humedad relativa media anual es de 84%.

3.2.3. Temperatura

La temperatura media anual en Pozuzo es de 22°C siendo julio y agosto los meses más fríos (17.0°C) y setiembre y octubre los más calientes (28°C).

3.2.4. Característica ecológicas

De acuerdo a la clasificación de la ONERN (1976) citada en la tesis de RIVAS (1995), Pozuzo pertenece a un bosque húmedo subtropical (bh-ST), en toda su extensión, bajando de Huancabamba al Codo de Pozuzo, se encuentran una gama de zonas de transición, como el bosque húmedo premontano tropical y a bosque húmedo subtropical.

3.2.5. Suelos

Los suelos por lo general son profundos y ácidos, con pH promedio varía de 5.5 a 6.0. Según el informe GTZ-ANDESTUDIO (1993) citada en la tesis de RIVAS (1995), son suelos mayormente de arcilla de naturaleza caolinita, de coloraciones rojas a amarillas, perteneciente a los acrisoles principalmente. De igual manera se encuentran los luvisoles y algunos podsoles y pocos cambisoles. A lo largo del río y su afluentes se encuentran los fluvisoles, los que son más fértiles y de interés agrícola.

3.2.6. Fisiografía

El relieve topográfico es colinoso y montañoso, predominantemente. Las áreas planas o de pendientes bajas se distribuyen en las cercanías de la

riberas a los del río de Pozuzo y sus afluentes, y a modo de mesetas y terrenos ondulados en algunos sectores más alejados del río, con elevaciones hasta 700 m sobre el nivel del río y con pendientes de hasta 70% con una formación vegetal sobre las llanuras elevadas de precordilleras hasta formaciones de transición a selva baja (pie de monte andino oriental con una alta diversidad florística).

3.2.7. Hidrografía

La microcuenca presenta como afluentes una serie de quebradas que forman el río principal que lleva el nombre del Río Delfín y esto confluye en el Río Huancabamba y que su conjunto forman la cuenca del Río Huancabamba.

3.2.8. Vegetación

Las zonas boscosas en su mayoría se encuentran en laderas empinadas (>80% de pendiente) conformadas por una composición florística muy diversa, que no han sido ocupadas por la ganadería. El grado de deforestación fue muy intenso en las primeras etapas de ocupación de suelos, reduciéndose los bosques primarios a cultivos predominantes de pastos en toda la microcuenca. Dentro de la especie de pastos, la más difundida es la gramínea bachiaria (*Brachiaria decumbens*), pasto elefante (*Pennisetum purpureum*) de excelente adaptación al clima y tipos de suelos predominantes de Pozuzo (RIVAS, 1995).

- Cámara Digital
- Libreta de campo
- Útiles de escritorio en general
- Brújula Brunton

3.4. Metodología

La metodología propuesta en este trabajo se puede esquematizar en una serie de pasos descritos a continuación:

3.4.1. Trabajos de campo

3.4.1.1. Localización y caracterización del área experimental

La localización y caracterización de las áreas experimentales se llevaron a cabo entre trabajos de campo y laboratorio. Se identificaron 4 áreas experimentales con ciertos niveles de degradación de dimensiones de (100 x 100 m) por cada unidad muestral, que fueron las más representativas y fácilmente visualizadas en la imagen satelital; su localización fue mediante la georreferenciación con un Sistema de Posicionamiento Global (GPS). También se realizó la identificación de los tipos de suelos y pendientes existentes en el área que ayudaron a completar la información.

3.4.1.2. Caracterización de los niveles de degradación de suelos

Los diferentes niveles de degradación fueron caracterizados considerando aspectos físicos y biológicos de la vegetación (BARCELLOS,

3.3. Materiales

Se utilizaron los siguientes materiales disponibles, los cuales se describen a continuación:

3.3.1. Material cartográfica

- Carta Nacional a Escala 1:100,000, elaboradas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

3.3.2. Material satelital

- Imagen de Satélite LANDSAT-5/TM. Fecha: 14 julio de 1994.
Sector: POZUZO.
- Imagen de Satélite CBERS-2/CCD Fecha: 04 julio de 2006.
Sector: POZUZO.

3.3.3. Hardware y software

- 01 Computadora PC. Pentium IV.
- 01 Impresora Canon. Color Bubble Jet Printer. BJC-620
- Software Raster: ENVI + IDL ver. 3.5
- Software vectorial ARCGIS ver. 9.0
- Otros: Windows XP; Office 2000 (Words, Excel), etc.

3.3.4. Equipos y/o materiales complementarios

- Internet
- GPS (Sistema de Posicionamiento Global) marca Garmin 12XL

1986; YOUNIS *et al.*, 1999; HUETE *et al.*, 2002; LAL, 1994 y LAL, 1998).

Basados en las observaciones de campo, se lograron identificar 4 niveles de degradación:

3.4.1.2.1. Degradación no aparente

Parte de la superficie del suelo es caracterizada por presentar una vigorosidad de color verde oscuro, que está conformada por bosques primarios y secundarios. Estos suelos han sido utilizados en la agricultura y actualmente están en un proceso de descanso.

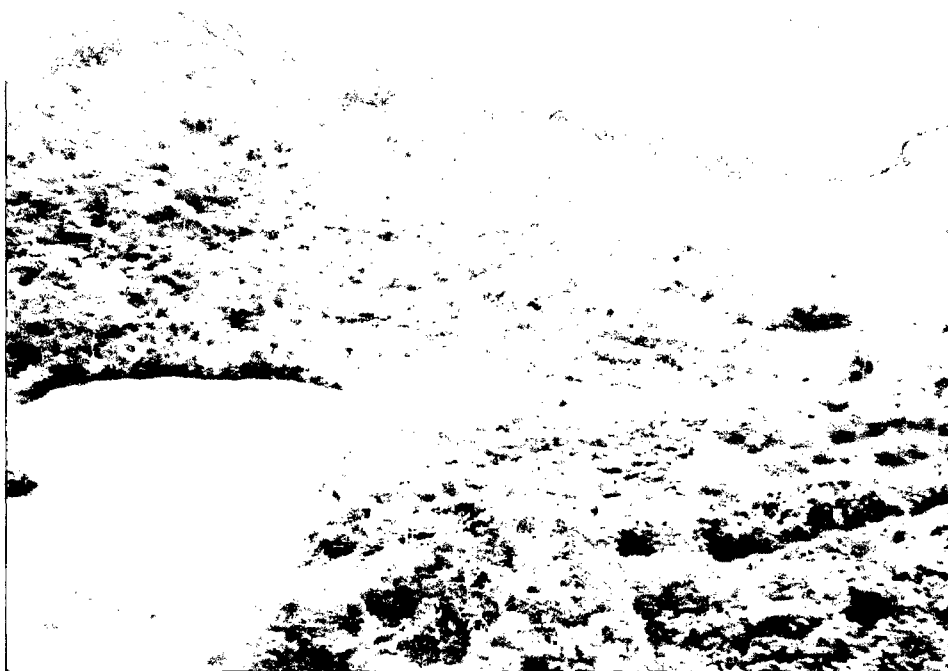


Figura 11. Degradación no aparente

3.4.1.2.2. Degradación leve

Estos niveles están afectados por prácticas ganaderas, la mayor parte de la superficie del suelo tiene una dominancia de tierras con pasturas, la vegetación existente presenta una vigorosidad de color verde claro en toda el área, existe compactación y un porcentaje bajo de suelos desnudos.



Figura 12. Degradación leve

3.4.1.2.3. Degradación moderada

Gran parte de la superficie del suelo presenta una vegetación de color verde amarillento, su apariencia fenológica no es saludable, está afectada por el sobrepastoreo de la ganadería, alta compactación de los suelos, existe presencia de malezas, escasa vegetación sana, poseen gran cantidad de materia seca.



Figura 13. Degradación moderada

3.4.1.2.4. Degradación severa

Los suelos se manifiestan en su mayoría con superficies afectadas por erosión, extremada presencia de malezas como rabo de zorro (*Andropogon sp*), shapumba (*Pteridium sp*) y cortaderas (*Axonopus sp*), vegetación con colores de hojas amarillas, deterioro físico extremo de los suelos causados por la actividad ganadera (compactación) y la actividad antrópica intensa con técnicas culturales inadecuadas y laboreo de suelos en zonas de pendiente.



Figura 14. Degradación severa

Cuadro 5. Características de los diferentes niveles de degradación de suelos

Niveles de degradación	Nº.Parcela	Altitud (m.s.n.m)	Pendiente (%)	Color
No aparente	1	915-930	30	verde oscuro
	2	922-960	40	
	3	1141-1210	65	
Leve	1	1330-1350	40	verde claro
	2	1210-1230	50	
	3	1820-1820	22,5	
Moderado	1	922-910	45	verde amarillo
	2	1716-1758	35	
	3	1790-1821	42,50	
Severo	1	960-1027	65	Amarillo
	2	1306-1348	50	
	3	1443-1450	45	

3.4.2. Preprocesamiento digital de imágenes CBERS-2

3.4.2.1. Adquisición de la imagen

La solicitud y adquisición de imágenes del satélite Brasileiro CBERS-2/CCD con resolución espacial de 19.5 m del INPE (2006).

3.4.2.2. Corrección geométrica

Consistió en cambiar la posición de los píxeles de tal forma que estos tengan coordenadas reales. Las correcciones de las imágenes de satélite se hicieron mediante imágenes corregidas, se identificó los puntos de control y se adicionó las coordenadas para su rectificación, para este caso se usó la imagen Landsat-5/TM del año 1994 que ha sido corregida geométricamente, con sistema de referencia que corresponde a una proyección cartográfica UTM, zona 18 Sur, con Datum WGS84.

3.4.2.3. Corrección radiométrica

Cuadro 6. Datos de la imagen utilizada en la investigación

DATOS	CBERS-2/CCD
Fecha	2006-07-04
Hora GMT	15:06:43
Azimut Solar	40,6369
Elevación del sol	46,6094

a) Determinación de la radiancia espectral recibida por el sensor

Para imágenes CBERS-2/CCD de la ecuación (3):

$$L_{senk} = \left(\frac{L_{max}}{Q_{Cal\ max}} \right) Q_{cal}$$

L_{senk} = Radiancia espectral recibida por el sensor en la banda k en $mw/(cm^2.sr.\mu m)$;

Q_{Cal} = Valor de píxel en la imagen en números digitales (DNs);

$Q_{Cal\ max}$ = Valor digital máximo (ND = 255) corresponde a $L_{max\ k}$;

$L_{max\ k}$ = Radiancia espectral máximo que corresponde valores de $Q_{Cal\ max}$ en $mw/(cm^2.sr.\mu m)$ (Cuadro 2).

Para aplicar estas ecuaciones matemáticas, que convierten los Niveles Digitales (ND) de la imagen de satélite a radiancia espectral recibida por los sensores, se desarrolló un algoritmo en un lenguaje de programación de IDL (ANEXO 1).

b) Determinación del factor corrector de la distancia Tierra - Sol

De la ecuación (2).

$$D = (1 + 0.01674(\text{sen}\alpha))^2$$

Donde:

$$\alpha = (2\pi(J - 93.5)/365)$$

Para el 04 de julio de 2006 el día jouliano (J) es:

$$J = 277$$

$$\alpha = (2\pi(277 - 93.5)/365)$$

$$\alpha = 3.15880686$$

$$D = 1.001846$$

c) Determinación de la reflectancia aparente (ρ^*_k)

De la ecuación (4):

$$\rho^*_k = \frac{\pi L_{senk} D}{E_{sunk} \cos \theta_i}$$

Donde:

ρ^*_k = Reflectancia planetaria o reflectividad aparente;

L_{senk} = Radiancia espectral recibida por el sensor en la banda k en $\text{mw}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$;

D = Es el factor corrector de la distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas;

E_{sunk} = Irradiancia solar media fuera de la atmósfera en $\text{mWsr}^{-1}\text{cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$

(Cuadro 3)

θ_i = Ángulo cenit del Sol en grados (ángulo cenit = $90 - \text{ángulo de elevación solar}$ (Cuadro 6).

Ángulo cenit para el sensor CCD.

$$\theta_i = (90 - 46.6094) = 43.3906$$

Para obtener la reflectancia aparente (ρ^*_k) se ha corregido la dispersión que ocurre en la superficie en función a sus propiedades de reflexión (CHUVIECO, 2002) aplicando las ecuaciones establecidas, se desarrolló un algoritmo en un lenguaje de programación de IDL (ANEXO1).

d) Determinación de la reflectancia real de la superficie terrestre

Cálculo de la radiancia aportada por la dispersión atmosférica:

Para imágenes CBERS-2/CCD de la ecuación (6):

$$L_{a,k} = \left(\frac{L_{\max k}}{Q_{\text{Cal max}}} \right) Q_{\text{Cal min}}$$

$L_{\max k}$ = Radiancia espectral máximo en $\text{mW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ (Cuadro 2)

$Q_{\text{Cal min}}$ = Valor digital mínimo corresponde a 1;

$Q_{\text{Cal max}}$ = Valor digital máximo corresponde a 255;

Corrección Atmosférica: de la ecuación (5).

$$\rho_k = \frac{D\pi(L_{\text{senk}} - L_{a,k})}{E_{\text{sunK}} \cos \theta_i \tau_{ki}}$$

Donde:

ρ_k = Reflectancia de la superficie terrestre o reflectancia real;

L_{senk} = Radiancia espectral recibida por el sensor en la banda k en $\text{mWsr}^{-1}\text{cm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$;

$L_{a,k}$ = La radiancia aportada por la dispersión atmosférica.

D = Es el factor corrector de la distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas;

$\tau_{k,i}$ = Valores promedio de transmisividad atmosférica que afecta al rayo

incidente: 0.70 (b1), 0.78 (b2), 0.85 (b3), 0.91 (b4) del Cuadro 1.

Para obtener la reflectancia real de la superficie terrestre (ρ_k) se le ha corregido a la reflectancia aparente con valores promedios de transmisividad y cálculos de dispersión atmosférica en cada uno de las bandas con un modelo matemático establecido por CHAVEZ (1996). Para esto se ha desarrollado un algoritmo en un lenguaje de programación de IDL (ANEXO 2).

3.4.3. Métodos de clasificación y determinación de índices espectrales

Existen varios métodos de clasificación que han sido desarrollados para trabajar con datos espaciales. Para el presente trabajo se ha utilizado el método de distancia mínima por su buena aproximación en la clasificación.

3.4.3.1. Distancia mínima

Este es un método estadístico de clasificación integrado para un espacio espectral de n-dimensiones y disponible en el ENVI un software de análisis de imágenes satélite, que consiste en agrupar píxeles homogéneos y clasificarlos en una sola clase.

3.4.3.2. Índices espectrales

La determinación de estos índices espectrales está basada en el comportamiento espectral de los diferentes niveles de degradación de los suelos en cada una de las bandas del espectro electromagnético. Siendo necesaria la calibración de las imágenes para producir la reflectancia espectral una vez corregidos los efectos atmosféricos y instrumentales (CHUVIECO, 2002 y SOBRINO, 2000).

El Índice de Degradación de Suelos (IDS) está definido en un espacio bidimensional de 3 bandas del visible, que fue desarrollado bajo las mismas metodologías establecidas por XIAO *et al.* (2005) para imágenes

MODIS, y esto fue adaptado para imágenes del satélite CBERS-2, en base a los trabajos de campo y análisis de laboratorio, se obtiene la ecuación (11):

$$IDS = (B1 - B2) * (B1 + B2 + B3) \quad (11)$$

La determinación del Índice Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) desarrollada por JACKSON *et al.* (1983), uno de los índices muy utilizados en trabajos de teledetección que está definido por 2 bandas espectrales, uno en el visible y otro en el infrarrojo próximo, de la ecuación (8):

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (8)$$

Para las aplicaciones de estas ecuaciones se ha desarrollado un algoritmo en un lenguaje de programación de IDL (ANEXO 3 y 4).

3.4.4. Validación de los resultados

Los resultados obtenidos del procesamiento de imágenes de satélite utilizando el Software ENVI+IDL fueron integrados a un Sistema de Información Geográfica (SIG). El análisis fisicoquímico de las muestras adquiridas en terreno se enfocó sobre el contenido total de materia orgánica, pH, tamaño granulométrico, capacidades de intercambio catiónico (CIC) y cantidades de macroelementos (P, K₂O) en el suelo para el análisis de la variabilidad espacial de estos datos. Todas las muestras tomadas de la superficie del suelo fueron realizadas a una profundidad de 25-30 cm; la Figura 15, muestran la localización de los puntos de muestreo. Los factores responsables de la diferencia espacial en la degradación tal como la pendiente,

la vegetación y las propiedades de los suelos fueron usados para el análisis de la distribución de los diferentes niveles de degradación en relación a estos factores.

Los mapas fueron generados a una escala (1/50000) usando el software ARCGIS, las pendientes de las áreas muestreadas fueron medidas usando una brújula. En total se seleccionaron 12 puntos de muestreo, donde 4 corresponden a las áreas experimentales determinadas para la clasificación, y los otros 8 puntos han sido seleccionados al azar, en los mapas temáticos productos de la clasificación, determinando así la precisión de la evaluación. El error de la matriz producida al calcular la exactitud global y el coeficiente estadístico kappa (K) fue obtenido usando el ENVI, calculado por CONGALTON (1991) en la ecuación (8)

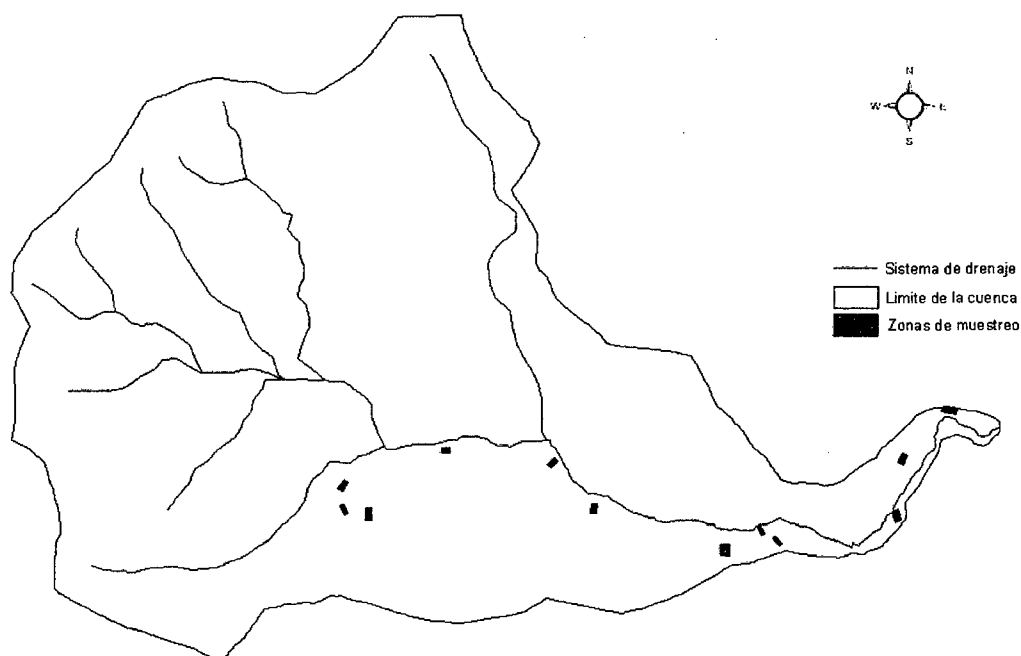


Figura 15. Puntos de muestreos de suelos

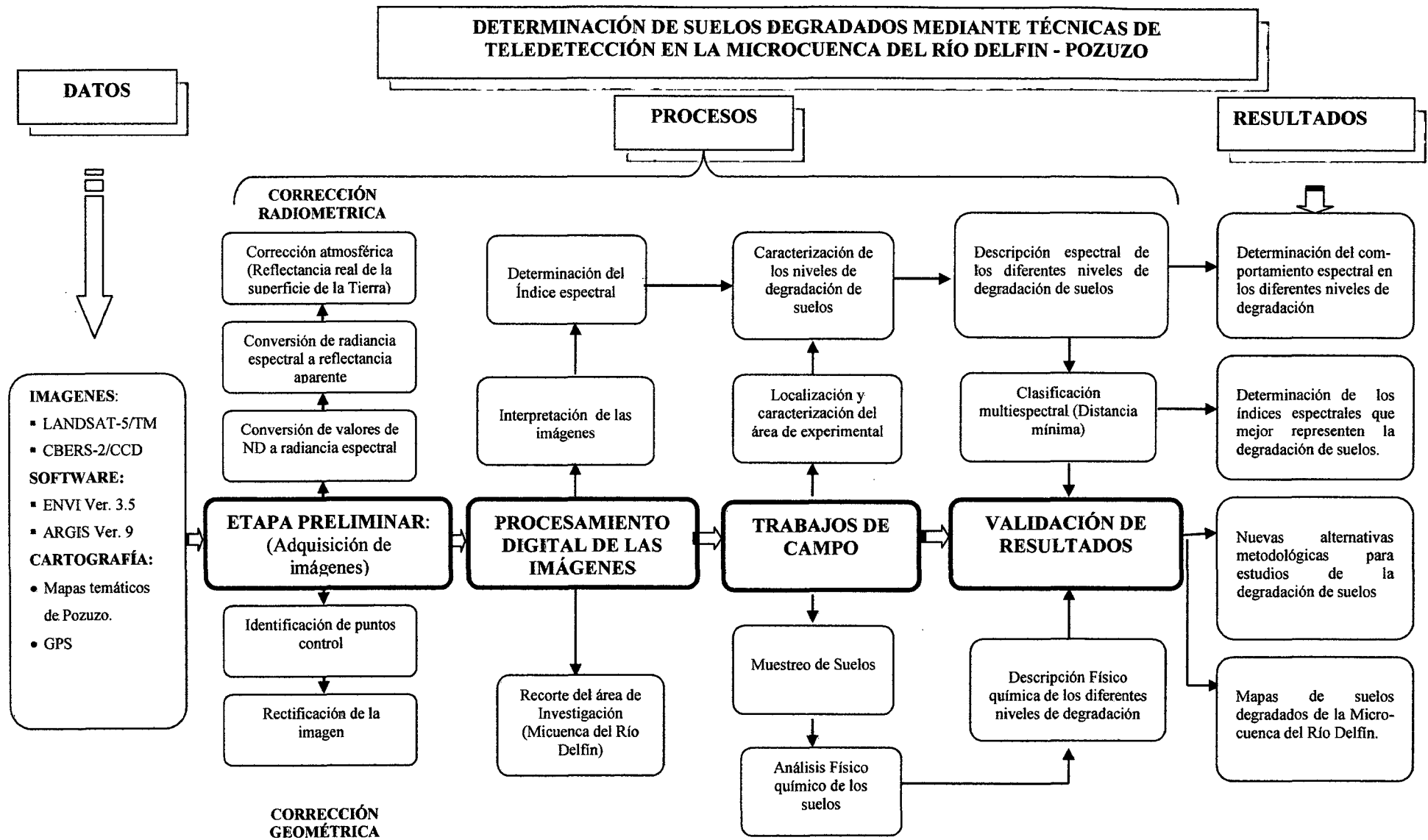


Figura 16. Diagrama de la metodología desarrollada

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Parámetros utilizados en análisis del comportamiento espectral de los suelos degradados

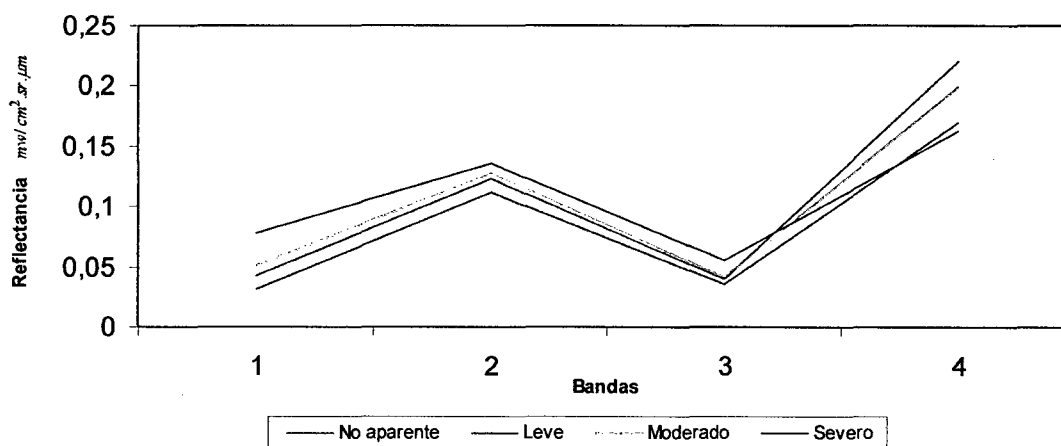


Figura 17. Curva de reflectancia de suelos con diferentes niveles de degradación

En la Figura 17, se observan las curvas de reflectancia de los suelos en una fila de bandas del sensor, con distintos rasgos espectrales en sus longitudes de ondas del visible y del infrarrojo próximo. Las curvas de reflectancia presentan pequeñas variaciones de absorción de energía, caracterizando diferentes niveles de degradación y éstos controladas por distintas propiedades de los suelos según STONER y BAUMGARNER (1981). Se puede observar que los suelos no degradados presentan mayor absorción

de energía en el azul (B1) y en el rojo (B3); con una elevada reflectancia en el verde (B2) y en el infrarrojo próximo (B4). Estas características espectrales ayudaron a caracterizar los diferentes niveles de degradación, esto se explica por las condiciones de la superficie terrestre en el momento de la toma de la escena satelital, las vegetaciones más densas presentan una baja reflectancia, por la alta absorción de la energía que ocurre; al igual que los suelos oscuros y con contenidos altos de humedad según menciona HUETE *et al.* (2002). En el caso de la vegetación se ve afectada por concentraciones de clorofila y los carotenoides según menciona SOBRINO (2000) y TUCKER (1980).

Las reflectancias altas determinan superficies degradadas con baja absorción espectral en las bandas del visible por perturbaciones existentes en el suelo; ellas causan una disminución de reflectancia con el incremento del tamaño de la rugosidad de los elementos según HUETE *et al.* (1991). Las reflectancias en niveles leves y medios han caracterizado suelos en proceso evolutivo de degradación, las curvas espectrales de los suelos son afectadas por varios fenómenos físicos y químicos según MULDER (1987) y BENDOR y BANNIN (1999).

En las bandas del rojo y del infrarrojo se distinguen estos efectos; con confusiones de los niveles de degradación, a causa de la pérdida de vigorosidad vegetal (amarillamiento); tal efecto es causado por el deterioro de los cloroplastos según menciona RAO *et al.* (1978); también estas variaciones

de reflectancia se ven directamente afectadas por el déficit en agua en las plantas, concentraciones de materia orgánica, limitando la fotosíntesis y crecimiento según TUCKER (1980) y HUETE *et al.* (2002).

Cuadro 7. Valores espectrales de niveles de degradación en suelos

Nivel de degradación	Media de Reflectancia				IDS	NDVI
	B1= azul	B2= verde	B3= rojo	B4= infrarrojo		
No aparente	0.0308	0.1117	0.0353	0,1696	0.0144	0,6523
Leve	0.0422	0.1226	0.0402	0,2206	0.0165	0,6918
Moderado	0.0509	0.1278	0.0411	0,1988	0.0171	0,6357
Severo	0.0774	0.1357	0.0552	0,1627	0.0188	0,4915

En el Cuadro 7, se observan que los valores altos de reflectancia en las 3 bandas del visible indican un IDS alto, que identifican a suelos con degradación severa, notándose también IDS bajos para niveles de degradación no aparente.

Los valores de IDS son obtenidas de la combinación de las 3 bandas del visible; cuyos índices altos y bajos están relacionados a su reflectancia espectral.

Los resultados del NDVI; están expresados en función de los valores de las reflectancias de las bandas del visible (B3) y del infrarrojo próximo (B4), también se observa que la reflectancia en la B4; sufre confusión al identificar niveles de degradación. Según ROSA (2003), cuando clasificó los

niveles de degradación también encontró confusiones en la B4, que afectan la respuesta espectral del NDVI, fundamentando esto en las cantidades de materia seca y mayor sombreado existente en el área; comparado con los valores promedios del NDVI del Cuadro 7. Los niveles de degradación presentan una cercana similitud en los valores altos y medios de degradación obtenidos por ROSA (2003) en Brasil; y XIAO *et al.* (2005) desarrollaron un índice espectral al que denomina GIS, para monitorear la degradación de suelos a escalas continentales con imágenes de baja resolución espacial del sensor MODIS, estableciendo cuatro niveles de degradación; bajo las mismas metodologías desarrolladas en el GIS se adaptó, el IDS; para imágenes de alta resolución espacial, obteniéndose el Índice de Degradación de Suelos (IDS) para la Microcuenca del Río Delfín.

4.2. Índices espectrales en relación a los valores de reflectancia de los cuatro niveles de degradación de suelos

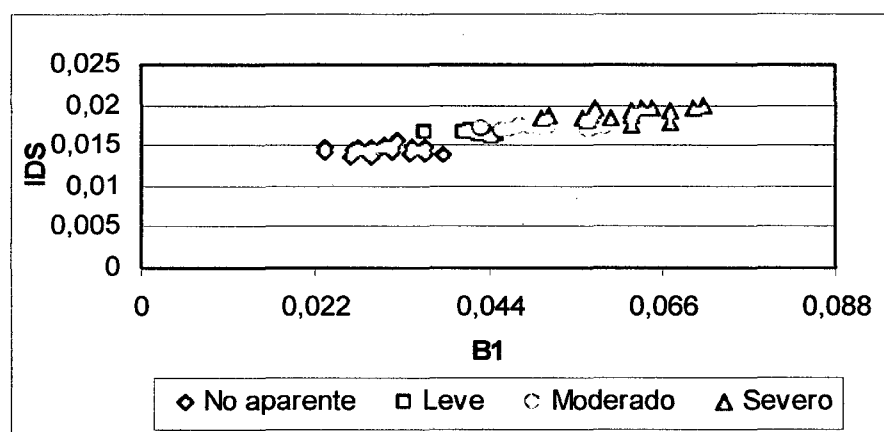


Figura 18. Factor de reflectancia B1 x IDS

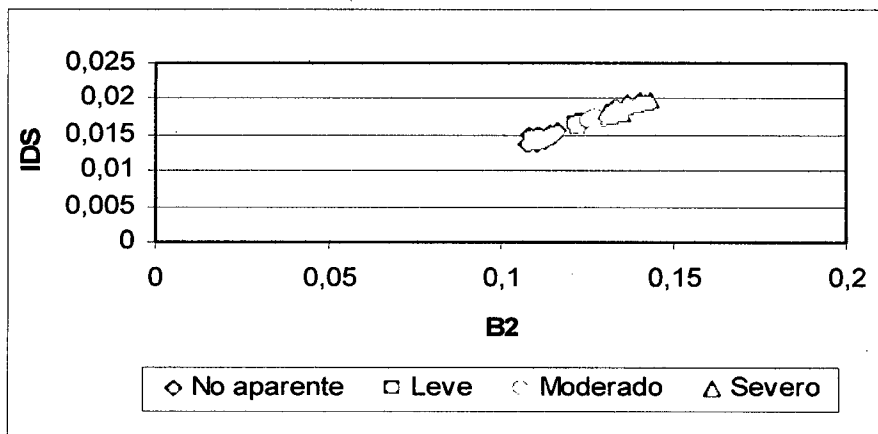


Figura 19. Factor de reflectancia B2 x IDS

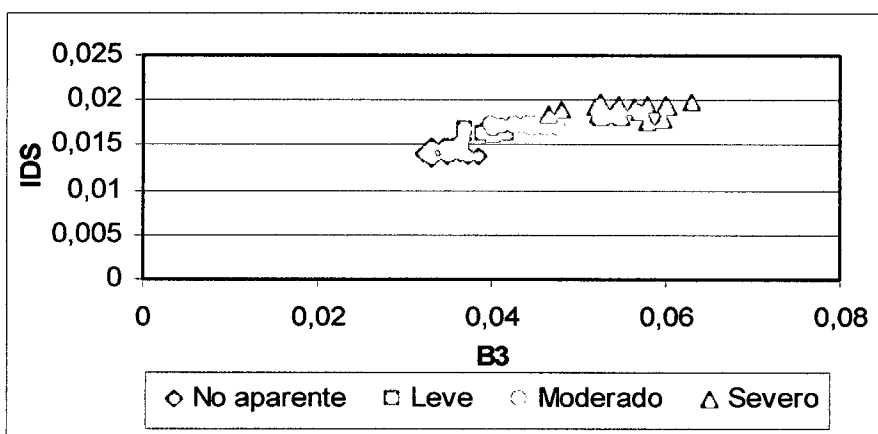


Figura 20. Factor de reflectancia B3 x IDS

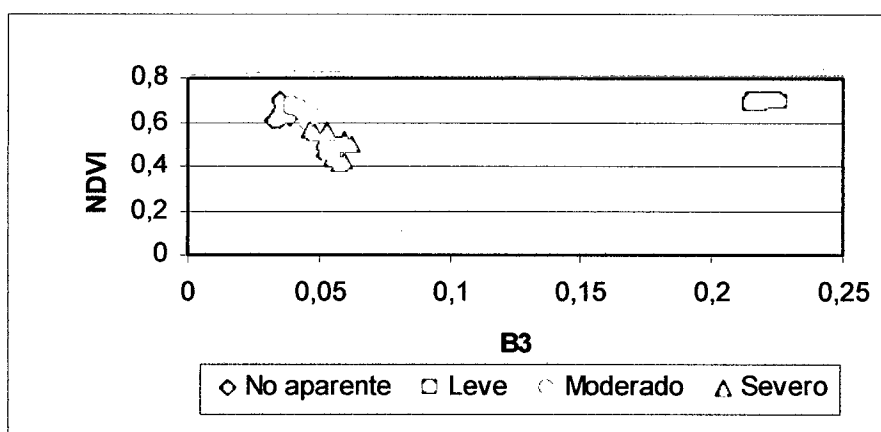


Figura 21. Factor de reflectancia B3 x NDVI

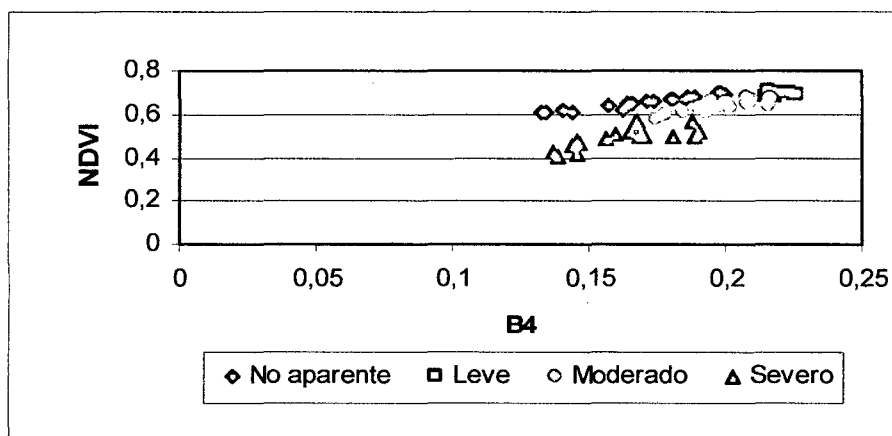


Figura 22. Factor de reflectancia B4 x NDVI

Se observan en las Figuras 18, 19 y 20, el comportamiento espectral del IDS; en relación a los valores de reflectancia en las bandas espectrales B1, B2 y B3; que existe relación significativa en cada uno de los niveles de degradación sin presencia de confusiones.

En las Figuras 21 y 22, usando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI), en relación a los valores de reflectancia en las bandas B3 del visible y la B4 del infrarrojo próximo, se nota que existe una gran confusión entre los diferentes niveles de degradación en concordancia con ROSA (2003) a diferencia del IDS.

4.3. Comparación del IDS y el NDVI en la determinación de suelos degradados

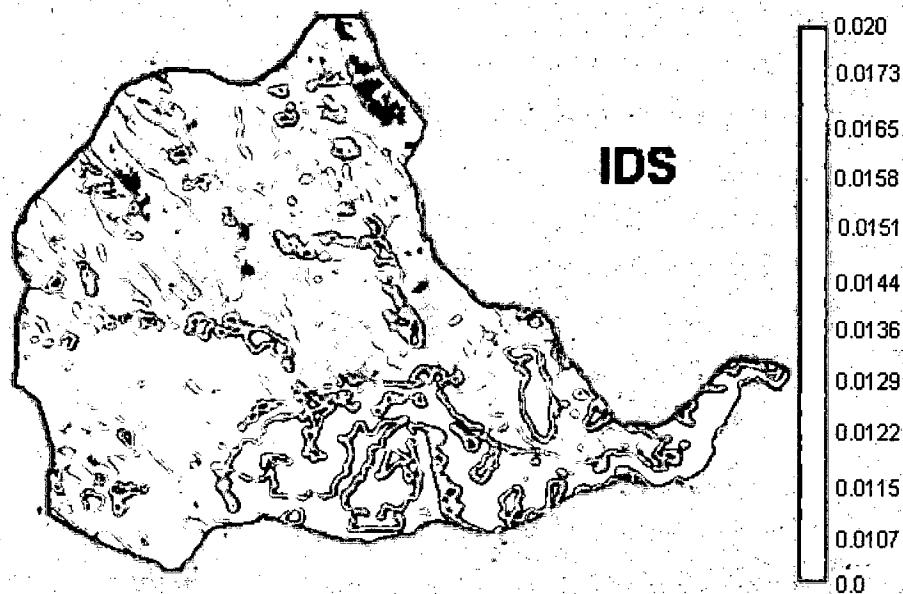


Figura 23. Condiciones de superficie determinadas por el IDS

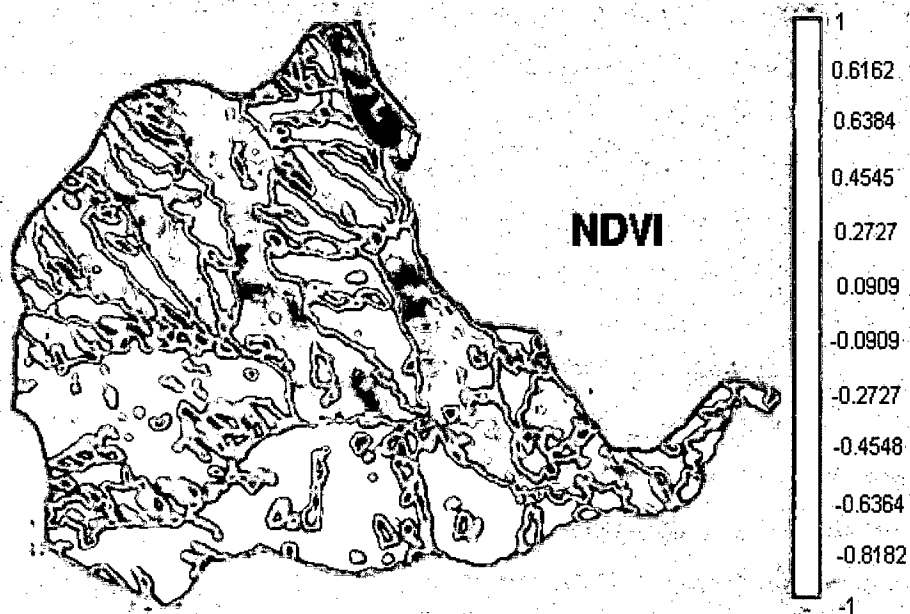


Figura 24. Condiciones de superficie determinadas por el NDVI

En las Figuras 23 y 24, se muestran los resultados obtenidos del IDS y el NDVI a partir de imágenes de satélite CBERS-2/CCD con la implementación de nuestro algoritmo (ANEXOS 1, 2, 3 y 4) para extraer la información de los datos espaciales. Se observa que el IDS ha sido clasificado en 12 clases espectrales al igual que el NDVI, los valores IDS se encuentran en rangos de 0 a 0.02, donde los colores rojos están indicando la presencia de ciertos niveles de degradación haciendo más severo cuando se aproximan a 0.02, y, los otros colores señalan la presencia de suelos no degradados con valores bajos acercándose al cero.

El NDVI tiene valores en el rango de -1 a 1, los valores que se aproximan a 1 indican suelos que tienen una densa vegetación, y, los valores que se acerquen a -1 señalan la presencia de superficies alteradas o degradadas según ADAMS *et al.* (1995). El uso del NDVI no es factible para estudios de la degradación de suelos, porque existe mucha confusión en las respuestas espectrales de la vegetación y los suelos, sin poder diferenciarlo los niveles, las confusiones de las respuestas espectrales es producto de las pendientes altas en algunos sectores de la microcuenca, que afectan bruscamente al NDVI, distorsionando los valores de los objetos reflejados, caso que no ocurre en las zonas planas.

4.4. Exactitud de la clasificación de los niveles de degradación usando el IDS

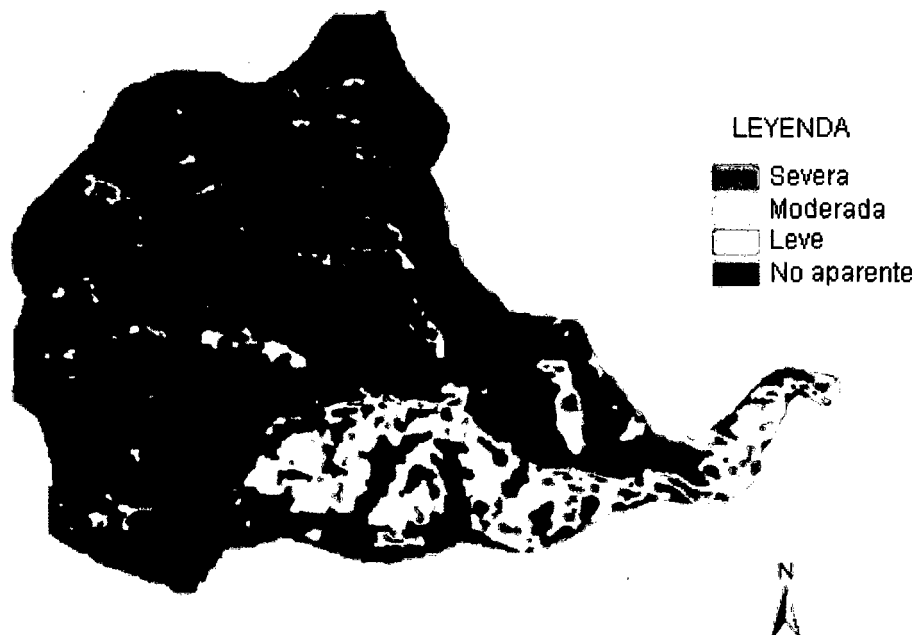


Figura 25. Clasificación de los niveles de degradación de suelos con el IDS

Se muestran en la Figura 25, los resultados de la utilización del IDS en la clasificación de los diferentes niveles de degradación de suelos. El IDS permite generar cuatro clases distintas que corresponden a diferentes niveles de degradación de suelos, para esto se ha aplicado el filtrado de 3 x 3 ventanas para obtener clases homogéneas y reducir la presencia de píxeles aislados; la identificación de las 4 áreas experimentales ayudaron a analizar las respuestas espectrales. El IDS clasifica los diferentes niveles de degradación, con rangos espectrales que varían según los niveles en: no aparentes desde (0.0-0.016), leve (0.0161-0.0168), moderadas (0.0169-0.0175), severa (0.0176-0.02). La calidad de la clasificación de nuestros resultados se pueden ver en el Cuadro 8, donde el IDS; es un índice que ayuda a proveer precisión para estudiar la

degradación de suelos, con una exactitud total de 0.93 y un coeficiente kappa de 0.90 que indica un grado de concordancia excelente; según la teoría estadística establecida por COHEN (1960) y CONGALTON (1991).

Cuadro 8. Exactitud de la medición en la clasificación con el IDS

Niveles de degradación	Imágenes CBERS-2/CCD	
	Exactitud Producida	Exactitud usada
No aparente	0,95	1,00
Leve	1,00	0,73
Moderado	0,98	0,79
Severo	0,86	1,00
Exactitud total	0,93	
Coeficiente Kappa ($\hat{\kappa}$)	0,90	

4.5. Validación del IDS en el estudio de la degradación de suelos

El uso de los mapas temáticos, pendientes, altitud y análisis de los suelos (textura, pH, M.O, CIC, P, K₂O) han sido básico para la fotointerpretación y validación de los resultados obtenidos. Según la descripción estadística de las características fisicoquímicas de los niveles de degradación del Cuadro 9, son los resultados de las 12 muestras tomadas en campo y localizadas con un Sistema de Posicionamiento Global (GPS), que muestran el estado actual de los suelos, donde las clases texturales dominantes en toda el área son: Franco, Franco Limoso y Franco Arcilloso; suelos con pH fuertemente ácidos, con fósforos en niveles bajos y contenidos de potasio que varían entre niveles medios y altos, y una capacidad de intercambio catiónico (CIC) de niveles medios. Analizando los Cuadros 5 y 9, se muestra que existe una correlación entre las zonas de muestreo, que presentan altas pendientes y degradaciones severas; estas se ven asociadas al

tipo de suelo y a las prácticas agrícolas y ganaderas más intensas en el área afectada, que fueron distinguidas con altas reflectancias y IDS, producto de la heterogeneidad del terreno; todas estas características son los principales indicadores que revelan la degradación, según YOUNIS *et al.* (1999), HUETE *et al.* (2002) y HILL *et al.* (1998).

En el Cuadro 9, se muestran los resultados del análisis de los suelos, con buena correlación en el contenido promedio de materia orgánica (M.O); donde los suelos con degradaciones severas presentan niveles bajos, las moderadas corresponde a un nivel medio, las degradaciones leves y los no aparentes un nivel alto. Para estimar niveles de degradación es evidente deducirlos de las condiciones de las superficies vigorosas de la vegetación como lo mencionan ADAMS *et al.* (1995), YOUNIS *et al.* (1999) y HUETE *et al.* (2002). Los suelos con niveles altos de M.O presentan vegetaciones con hojas de color de verde oscuros (alta vigorosidad) debido a la mejor conservación de los suelos, pero pueden llegar ser significativas cuando estos suelos se exponen a la superficie disminuyendo dicho contenido, y, el cambio de la vigorosidad indica la degradación según MACEDO y ZIMMER (1993) ya que esto es causado por la deficiencia de nutrientes en los suelos, principalmente la del nitrógeno, que va a provocar el inicio de la degradación por la reducción de la actividad biológica, según menciona BARCELLOS (1986).

El desarrollo del IDS juega un papel importante para los trabajos de teledetección relacionados al estudio de degradación de suelos, pues permite

una rápida evaluación de las áreas degradadas usando imágenes de satélite, todo esto depende de la habilidad de nuestra interpretación, según menciona HILL *et al.* (1998) y XIAO *et al.* (2005). Su eficiencia a niveles de exactitud supremas de los índices espectrales puede ser encontrada mediante los estudios multitemporales, que permiten tener acercamientos más continuos para estudiar cambios ambientales según menciona GRAETZ (1996).

4.6. Cuantificación de las áreas degradadas usando IDS

Usando el IDS, producto de la validación, se ha cuantificado los diferentes niveles de degradación, incorporando los resultados encontrados por un Sistema de Información Geográfica (SIG). Las técnicas de Teledetección se han utilizado con mucho éxito para caracterizar la degradación de suelos. Según HUETE *et al.* (2002) es una de las técnicas más cuantificable y replicable que ayuda a la supervisión y control de la desertificación; esto ha permitido obtener mapas de degradación de suelos a escalas locales (Figura 26). Los niveles de degradación que se cuantificaron en la Microcuenca del Río Delfín corresponden con las siguientes áreas: suelos no degradados que abarca un área total de 3499.90 Ha, la degradación leve con 541.28 Ha, la degradación moderada con 262.52 Ha y la severa con un 89.99 Ha.

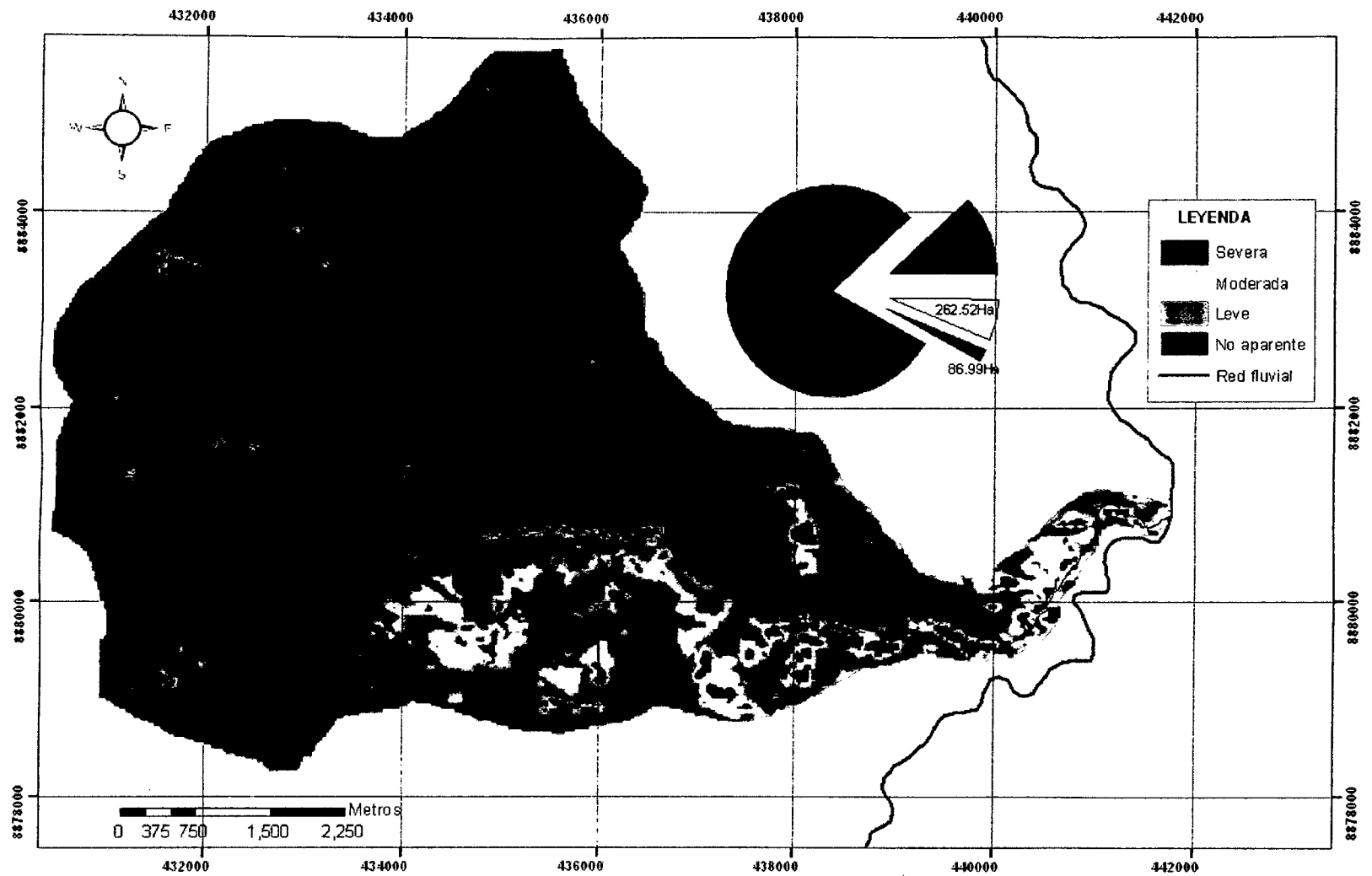


Figura 26. Mapa de degradación de suelos de la Microcuenca del Río Delfin

Cuadro 9. Descripción estadística de las características fisicoquímicas de los diferentes niveles de degradación de suelos

Niveles de degradación	Arena (%)			Limo (%)			Arcilla (%)			pH			M.O (%)			CIC			P(ppm)			K2O(ppm)		
	\bar{X}	D.E	CV	\bar{X}	D.E	CV	\bar{X}	D.E	C.V	\bar{X}	D.E	C.V	\bar{X}	D.E	C.V	\bar{X}	D.E	C.V	\bar{X}	D.E	C.V	\bar{X}	D.E	C.V
No aparente	32,00	10,39	32,47	49,33	10,06	20,39	18,67	13,61	72,91	4,90	0,78	15,92	3,23	0,65	20,10	5,28	1,97	37,31	7,43	1,91	25,70	243,3	40,25	16,54
Leve	44,67	21,01	47,04	40,00	19,08	47,70	15,33	3,05	19,89	4,77	0,31	6,50	3,37	1,08	32,08	4,83	1,00	20,69	8,00	1,49	18,63	324,3	40,15	12,38
Moderado	34,67	8,08	23,31	42,00	3,46	8,24	23,33	5,03	21,56	4,87	0,28	5,75	2,80	0,36	12,86	6,23	1,78	28,52	7,73	2,54	32,84	274,7	49,39	17,98
Severo	32,67	14,74	45,12	36,67	4,16	11,35	30,67	11,55	37,66	4,97	0,38	7,65	2,10	1,15	54,76	5,93	0,23	3,88	6,83	2,49	36,44	307,0	50,27	16,37

M.O: Materia orgánica; CIC: Capacidad de intercambio catiónico; P: Fósforo; K2O: Potasio \bar{X} : Promedio de la muestra; D.E: Desviación Estándar; CV: Coeficiente de variación.

V. CONCLUSIONES

1. El comportamiento espectral de los suelos se ve fuertemente afectado por las condiciones de la superficie de los suelos; se presentarán altas reflectancias cuando los suelos estén totalmente degradados y serán bajas cuando no existe degradación.
2. El IDS tiene una buena exactitud para monitorear la degradación de suelos con un coeficiente estadístico de kappa de 0.90, que representa un grado de concordancia excelente. La validación y evaluación del IDS están basados en datos de campo y en la fotointerpretación. Con la utilización del IDS se representa la realidad del terreno con suficiente precisión y puede ayudar a tomar decisiones en planes de conservación y recuperación de suelos.
3. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), que es muy utilizado en trabajos de datos espaciales, sufre mucha confusión en la clasificación de niveles de degradaciones de suelos en zonas que están afectadas por fuertes pendientes produciéndose la sombra por efecto de la iluminación solar, la banda del infrarrojo es la que se ve fuertemente afectada por la topografía del terreno e influye directamente en los valores del NDVI.

4. Las técnicas de Teledetección hoy disponibles, pueden ayudar a vigilar los diferentes niveles de degradación de suelos, a través de la interpretación de imágenes de satélite asociadas a los levantamientos de campo. Usando estas técnicas se ha podido cuantificar que el 79.71% de las áreas de la Microcuenca del Río Delfín no presentan degradación de suelos, y, el 20.29% están afectados por ciertos niveles de degradación.

VI. RECOMENDACIONES

1. Para la determinación de los índices espectrales es importante que las imágenes se encuentren corregidas por las fallas de los sensores, los efectos atmosféricos y su geometría.
2. Es importante considerar los períodos de cultivos, las estaciones del año y las condiciones fenológicas de la vegetación, en el momento de la adquisición de datos, porque estos van a influir en la respuesta espectral de los suelos.
3. Para futuros estudios relacionados a la degradación de suelos, el IDS puede ser adaptado para muchos sensores, y podría mejorarse si se trabajará con sensores hiperespectrales.

VII. ABSTRACT

In the Delfín Watershed in the district of Pozuzo district, the soils are losing fertility, product of an agriculture and cattle raising without any conservation system that has given beginning to degradation processes in the soils. The degradation of the soils directly affects the productivity of the land; and with it, the margin of earnings of the cattle dealer and farmers of the watershed. It's so, recommended specific labors of recuperation of degraded lands; for it, first it is necessary identify and inventory these lands, which causes high costs with traditional methods that much time and money is required. The remote sensing is an appropriate alternative for analyze and evaluate the risks of the expansion of soils degradation. In the present study, the levels of degradation were characterized using spatial information of the sensor CCD of the satellite CBERS-2. Three bands of the visible and the near-infrared were calibrated by the faults of the sensor and the atmospheric effects to obtain the real reflectance of the terrestrial surface. The field measurements were carried out in four experimental areas that represented the different levels of degradation to be analyzed and classified on the basis of their spectral responses in the image of satellite. The study directed to the development and evaluation of a spectral index, determined and quantified the degradation in the watershed. This index was called Index of Degradation of Soils (IDS) based on the concepts of degradation. In this study there we demonstrated that the IDS

has had better results than the Index of Vegetation of Normalized Difference (NDVI) in the determination of the levels of degradation. The results show that the IDS provides a good precision for the monitoring of the degradation of soils ($\kappa=0.90$). The use of the thematic maps, slopes gradient, altitude and analysis of the soils (texture, pH, organic matter, cation exchange capacity, Phosphorus, Potassium) obtained from the 12 samples taken in the field and located with a Global Positioning System were used for the photointerpretation and the validation of our results.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, J.B., SABOL, D.E., KAPOS, V., ALMEIDA FILHO, R., ROBERTS, D.A., SMITH, M.O., GILLESPIE, A.R. 1995. Classification of multispectral images based on fractions of endmembers: Applications to land-cover change in the Brazilian Amazon, *Remote Sensing of Environment*, 52: 137-154.
- ANTUNES, M.A.H., JÚNIOR, J.B.T. 2005. Calibração do sensor CCD-CBERS II com dados do ASTER. In: *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoramento Remoto*, Goiânia, Brasil, INPE. 775-781
- BARCELLOS, A. 1986. Recuperação de pastagens degradadas. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA-CPAC). 38 p.
- COHEN, J., 1960. A coefficient of agreement for nominal scales. *Edu. Psychol. Meas.*20(1), 37-46.
- CONGALTON, R.G., 1991. A review assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Rem. Sens. Environ.* 37, 35-46.
- CHANDER, G., MARKHAM, B.I. 2003. Revised Landsat-5 TM Radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 41(11): 2674-2677.

- CHAVEZ, P.S. 1996. Image-based atmospheric corrections: revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 62(9): 1025-1036.
- CHUVIECO, E. 1996. *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Universidad de Alcalá. Madrid, España. Edición RIALP. S.A 568 p.
- CHUVIECO, E. 2002. *Teledetección ambiental*. Ed. Ariel Ciencia. Madrid, España. 558 p.
- EPIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO. 2005. CBERS-Satélite SINO-BRASILEIRO de recursos Terrestres. In: *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoramento Remoto*. INPE. Goiania, Brasil. p 915-922.
- GRAETZ, R.D. 1996. *The Use of Remote Sensing for Land Degradation and Desertification Monitoring in the Mediterranean*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. 233 p.
- GUZMAN, O. 2002. *Aproximación metodológica a la implementación de algoritmos de correcciones atmosféricas para barredores multiespectrales, aplicadas a imágenes Landsat TM*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Colombia. 25 p.
- HILL, J., HOSTERT, P., TSIOURLIS, G., KASAPIDIS, P., UDELHOVEN, Th., DIEMER, C. 1998. Monitoring 20 years of increased grazing impact on the Greek island of Crete with earth observation satellites. *Journal of Arid Environments*. 39(ae980392): 165-178.
- ENVI 3.5. 2001. Research Systems Inc. [En línea] (<http://www.RSInc.com>, documentos, 12 Dic. 2006).

- HUETE, A.R., ESCADAFAL, R. 1991. Assessment of biophysical soil properties through spectral decomposition techniques, *Remote Sensing of Environment*, 35:149-159.
- HUETE, A.R., GAO, X., KIM, H.J., MIURA, T., BORGHI, C., OJEDA, R. 2002. Characterization of land degradation in central Argentina with hyperspectral AVIRIS and EO-1 data. Publication, No. 987. Thailand.
- INPE-INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. 2006. [En línea]: INPE, (<http://www.dgi.inpe.br>, imágenes de satélite CBERS-2. 5 JUL. 2006).
- JACKSON, R.D. 1983. Spectral indices in n-space, *Remote Sensing of Environment*. 13: 409-421.
- KNIPLING, E.B. 1970. Physiological Basis for the Reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing Environ.*, vol. 1no.3, Summer, pp. 155-159.
- LAL, R. 1998. Soil quality and sustainability, In: R. Lal, W.H. Blum, C. Valentine, B.A. Stewart eds., *Methods for Assessment of Soil Degradation, Advances in Soil Science*, CRC Press, Boca Raton, Florida. p. 17-30.
- LAL, R. 1994. Global overview of erosion, In: *Soil and Water Science: Key to Understanding Our Global Environment*, Soil Science Society of America Special Publication, No. 41, Madison, Wisconsin.
- MACEDO, M.C.M., ZIMMER, A.H. 1993. Sistema pasto-lavoura e seus efeitos na produtividade agropecuária. In: *Anais do II Simposio Sobre Ecosistema De Pastagens*. Jaboticabal: FUNESP, UNESP, SP, p. 216-245.

- MARKHAM, B.L., BARKER, J.L. 1986. Landsat MSS and TM post calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures. Earth Observation Satellite Co., Lanham, MD, Landsat Tech. Note 1. p. 3-7.
- MULDERS, M.A. 1987. Remote Sensing in Soil Science, Amsterdam (Elsevier). 379 p.
- RAO, V.R., BRACH, E.J., MACK, A.R. 1978. Crop discriminability in the visible and near infrared regions. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 44(9), 1179-1184.
- RIVAS, R.M., Diagnóstico ecológico silvicultural de las especies arbóreas de uso agroforestal en Pozuzo, Tesis, UNALM, Perú. 257p.
- ROSA, R. 2003. Metodología de coleta de dados radiométricos em pastagens do gênero "Brachiaria" com diferentes estágios de degradação. XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Belo Horizonte, Brasil, INPE, p. 2483-2491.
- SLATER, P. N. 1980. Remote sensing Optics and optical systems. Reading. EUA: Addison-Wesley. 575 p.
- SOBRINO, J. 2000. Teledetección. Servicio de publicaciones de la Universidad de Valencia. Madrid, España. 467 p.
- STONER, E.R y BAUMGARDNER, M.F. 1981. Characteristic variation in reflectance of surface soils. Soil Sci. Soc. Am. J.45. p 1-44.
- TANRÉ, D.; DEROO, C.; DUHAUT, P.; HERMAN, M.; MORCCRETTE, J.J. 1990. Description of a computer code to simulate the satellite signal in the

- solar spectrum: the 5S code. *International Journal of Remote Sensing*, 2(4): 659-668.
- TUCKER, C.J. 1980. Radiometric resolution for monitoring vegetation: How many bits are needed. *International Journal of Remote Sensing*. 1(3), 241-254.
- VARGAS, E. 1992. La fotografía aérea y su aplicación a estudios geológicos y Geomorfológicos. La Paz. Tomo I; 438 p.
- VERMOTE, E.F.; TANRÉ, D., DEUZÉ, J. L., HERMAN, M., MORCRETE, J.J. 1997. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 35(3): 675– 686
- XIAO, J. Y., SHEN, Y.J., TATEISHI, R. 2005. Development of topsoil grain size index for monitoring desertification in arid land using remote sensing. *International Journal of remote sensing*. Japan. p. 1-4.
- YOUNIS, M.T., GILABERT, M.A., MELIÁ, J. 1999. La dinámica de la vegetación como indicador de la desertificación en la cuenca del Guadalentín, SE España. *Revista de Teledetección*. Valencia, España. p 1-4.

ANEXO

ANEXO 1.

ALGORITMO DE CORRECCIÓN RADIOMETRICA

pro IDS_CBERS

```

.*****
,
.*****//*****
,
.***** Algoritmo para la corrección Radiometrica de imágenes *****
,
.***** CBERS_2/CCD (Escena del 04-07-2006) *****
,
.***** Desarrollado por: Tulio Chávez Espiritu (RNR-UNAS) *****
.***** Lima - 20-11-2006 - Perú *****
,
.*****//*****
,
.***** Lectura de la imagen *****
,

B1 = READ_TIFF ('F:\TULIO\IMG_SATELITES\CBERS_POZ\CCD_20060704\
CBERS_2_CCD1XS_20060704_187_111_BAND1.tif, CHANNELS=[0],
geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)

B2 = READ_TIFF ('F:\TULIO\IMG_SATELITES\CBERS_POZ\CCD_20060704\
CBERS_2_CCD1XS_20060704_187_111_BAND2.tif, CHANNELS=[0],
geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)

B3 = READ_TIFF ('F:\TULIO\IMG_SATELITES\CBERS_POZ\CCD_20060704\
CBERS_2_CCD1XS_20060704_187_111_BAND3.tif, CHANNELS=[0],
geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)

.***** CORRECCION RADIOMETRICA *****
,

L1 = fltarr (6806,6377)
L2 = fltarr (6806,6377)
L3 = fltarr (6806,6377)

reflectancia_ccd1 = fltarr (6806,6377)
reflectancia_ccd2 = fltarr (6806,6377)
reflectancia_ccd3 = fltarr (6806,6377)

.***** Datos de calibración de las bandas *****
,
L2max = 13.212
L3max = 22.09
isolarL1= 195.7
isolarL2= 182.9
isolarL3= 155.7
pi= 3.141516
d= 1.001846
cossz= 0.7573

.***** Radiancia espectral *****
,

L1= B1
L2 = (L2max/255)*B2
L3 = (L3max/255)*B3

```

```

;***** ** Reflectancia aparente *****
FOR i = 0, 6805 DO FOR j = 0, 6376 DO BEGIN
    reflectancia_ccd1 (i, j) = (pi*L1(i, j)*d/isolarL1*cosz) + 0.06844
    IF (reflectancia_ccd1 (i, j) LE 1.0) AND (reflectancia_ccd1 (i, j) GT -0.2) THEN BEGIN
        reflectancia_ccd1 (i, j) = reflectancia_ccd1 (i, j)
    ENDIF ELSE BEGIN
        reflectancia_ccd1 (i, j) = -0.2
    ENDIF
    FOR i = 0, 6805 DO FOR j = 0, 6376 DO BEGIN
        reflectancia_ccd2 (i, j) = pi*L2(i, j)*d/isolarL2*cosz
        IF (reflectancia_ccd2 (i, j) LE 1.0) AND (reflectancia_ccd2 (i, j) GT -0.2) THEN BEGIN
            reflectancia_ccd2 (i, j) = reflectancia_ccd2 (i, j)
        ENDIF ELSE BEGIN
            reflectancia_nn2 (i, j) = -0.2
        ENDIF
        FOR i = 0, 6805 DO FOR j = 0, 6376 DO BEGIN
            reflectancia_ccd3 (i, j) = pi*L3(i, j)*d/isolarL3*cosz
            IF (reflectancia_ccd3 (i, j) LE 1.0) AND (reflectancia_ccd3 (i, j) GT -0.2) THEN BEGIN
                reflectancia_ccd3 (i, j) = reflectancia_ccd3 (i, j)
            ENDIF ELSE BEGIN
                reflectancia_ccd3 (i, j) = -0.2
            ENDIF
        ENDFOR
    ENDIF
    WRITE_TIFF, 'F:\TULIO\IMG_SATELITES\CBERS_POZ \reflectancia_ccd1.tif'
    , reflectancia_ccd1, geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY, /FLOAT
    WRITE_TIFF, 'F:\TULIO\IMG_SATELITES\CBERS_POZ \reflectancia_ccd2.tif'
    , reflectancia_ccd2, geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY, /FLOAT
    WRITE_TIFF, 'F:\TULIO\IMG_SATELITES\CBERS_POZ \reflectancia_ccd3.tif'
    , reflectancia_nn3, geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY, /FLOAT
END

```


ANEXO 2.

ALGORITMO DE CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA

pro IDS_CBERS

```

*****
*****///////////////////////////////////////////////////*****
***** Algoritmo para la corrección atmosférica de imágenes *****
***** CBERS_2/CCD (Escena del 04-07-2006) *****
***** Desarrollado por: Tulio Chávez Espíritu (RNR-UNAS) *****
***** Lima - 20-11-2006 - Perú *****
*****///////////////////////////////////////////////////*****
*****

```

```

***** Lectura de la imagen *****

```

```

B1 = READ_TIFF('F:\TULIO\IMG_SATELITES\CBERS_POZ\reflectancia_ccd1.tif,
CHANNELS=[0],geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)

```

```

B2 = READ_TIFF('F:\TULIO\IMG_SATELITES\CBERS_POZ\reflectancia_ccd2.tif,
CHANNELS=[0],geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)

```

```

B3 = READ_TIFF('F:\TULIO\IMG_SATELITES\CBERS_POZ\reflectancia_ccd3.tif,
CHANNELS=[0],geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)

```

```

***** CORRECCION ATMOSFÉRICA *****

```

```

Lka1 = fltarr (6806,6377)
Lka2 = fltarr (6806,6377)
Lka3 = fltarr (6806,6377)

```

```

rreal_ccd1 = fltarr (6806,6377)
rreal_ccd2 = fltarr (6806,6377)
rreal_ccd3 = fltarr (6806,6377)

```

```

***** Datos de calibración de las bandas *****

```

```

L2max = 13.212
L3max = 22.09
isolarL2= 182.9
isolarL3= 155.7
tk2= 0.78
tk3= 0.85
pi= 3.141516
d= 1.001846
cossz= 0.7573

```

```

***** Radiancia espectral aporta por la dispersión atmosférica *****

```

```

Lak1 = L1

```

```

Lak2 = (L2max / 255)

```

```

Lak3 = (L3max / 255)

```

```

;***** Reflectancia real de la superficie terrestre *****
FOR i = 0, 6805 DO FOR j = 0, 6376 DO BEGIN

    rreal_ccd1 (i, j) = Lak1

    IF (rreal_ccd1 (i, j) LE 1.0) AND (rreal_ccd1 (i, j) GT -0.2) THEN BEGIN
        rreal_ccd1 (i, j) = rreal_ccd1 (i, j)
    ENDIF ELSE BEGIN
        rreal_ccd1 (i, j) = -0.2
    ENDIF

    FOR i = 0, 6805 DO FOR j = 0, 6373 DO BEGIN

        rreal_ccd2 (i, j) = (isolarL2*cosz*B2(i, j))-(pi*d*Lak2)/ (isolarL2*cosz*tk2)

        IF (rreal_ccd2 (i, j) LE 1.0) AND (rreal_ccd2 (i, j) GT -0.2) THEN BEGIN
            rreal_ccd2 (i, j) = rreal_ccd2 (i, j)
        ENDIF ELSE BEGIN
            rreal_ccd2 (i, j) = -0.2
        ENDIF

        FOR i = 0, 6805 DO FOR j = 0, 6373 DO BEGIN

            rreal_ccd3 (i, j) = (isolarL3*cosz*B3(i, j))-(pi*d*Lak3)/ (isolarL3*cosz*tk3)

            IF (rreal_ccd3 (i, j) LE 1.0) AND (rreal_ccd3 (i, j) GT -0.2) THEN BEGIN
                rreal_ccd3 (i, j) = rreal_ccd3 (i, j)
            ENDIF ELSE BEGIN
                rreal_ccd3 (i, j) = -0.2
            ENDIF ELSE
            ENDELSE
            ENDFOR
            WRITE_TIFF, 'F:\TULIO\IMG_SATELITES\CBERS_POZ \rreal_ccd1.tif'
            , rreal_ccd1, geotiff=GTMODELTYPEPEGEOKEY, /FLOAT
            WRITE_TIFF, 'F:\TULIO\IMG_SATELITES\CBERS_POZ \rreal_ccd2.tif'
            , rreal_ccd2, geotiff=GTMODELTYPEPEGEOKEY, /FLOAT
            WRITE_TIFF, 'F:\TULIO\IMG_SATELITES\CBERS_POZ \rreal_cdd3.tif'
            , rreal_ccd3, geotiff=GTMODELTYPEPEGEOKEY, /FLOAT

        END
    END
END

```

ANEXO 3.

ALGORITMO PARA LA DETERMINACIÓN DEL IDS

pro IDS_CBERS

```

.*****
;
.***** ////////////////////////////////////////*****
;
.***** Algoritmo para la determinación del IDS para imágenes *****
;
.***** CBERS_2/CCD (Escena del 04-07-2006) *****
;
.***** Desarrollado por: Tulio Chávez Espiritu (RNR-UNAS) *****
;
.***** Lima - 20-11-2006 - Perú *****
;
.***** ////////////////////////////////////////*****
;
.*****

.*****          Lectura de la imagen          *****
;

B1 = READ_TIFF('F:\TULIO\IMG_SATELITES\CBERS_POZ\rreal_ccd1.tif,
CHANNELS=[0],geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)

B2 = READ_TIFF('F:\TULIO\IMG_SATELITES\CBERS_POZ\rreal_ccd2.tif,
CHANNELS=[0],geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)

B3 = READ_TIFF('F:\TULIO\IMG_SATELITES\CBERS_POZ\rreal_ccd3.tif,
CHANNELS=[0],geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)

;***** ÍNDICE DE DEGRADACIÓN DE SUELOS (IDS)*****
ids = ftarr (6806,6377)

FOR i = 0, 6805 DO FOR j = 0, 6376 DO BEGIN

    ids (i, j) = (B1-B2)*(B1+B2+B3)

IF (ids (i, j) LE 1.0) AND (ids (i, j) GT -0.2) THEN BEGIN
    ids (i, j)= ids (i, j)
ENDIF ELSE BEGIN
    ids (i, j) = -0.2

ENDELSE
ENDFOR
WRITE_TIFF, 'F:\TULIO\IMG_SATELITES\CBERS_POZ\ids.tif', ids,
geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY, /FLOAT

END

```

ANEXO 4.

ALGORITMO PARA LA DETERMINACIÓN DEL NDVI

pro IDS_CBERS

```

*****
;
; *****////////////////////////////////////////////////////*****
; ***** Algoritmo para la determinación de NDVI para imágenes *****
; ***** CBERS_2/CCD (Escena del 04-07-2006) *****
; ***** Desarrollado por: Tulio Chávez Espíritu (RNR-UNAS) *****
; ***** Lima - 20-11-2006 - Perú *****
; *****////////////////////////////////////////////////////*****
;
; ***** Lectura de la imagen *****
;
B3 = READ_TIFF ('F:\TULIO\IMG_SATELITES\CBERS_POZ\CCD_20060704\
CBERS_2_CCD1XS_20060704_187_111_BAND3.tif, CHANNELS=[0],
geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)

B4 = READ_TIFF ('F:\TULIO\IMG_SATELITES\CBERS_POZ\CCD_20060704\
CBERS_2_CCD1XS_20060704_187_111_BAND4.tif, CHANNELS=[0],
geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)

; ***** Lectura de la imagen *****

L4 = fltarr (6806,6377)
L3 = fltarr (6806,6377)

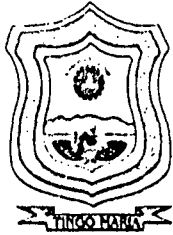
ndvi = fltarr (6806,6377)

; ***** y calibración de las bandas 4 y 3 *****
; FOR i = 0, 6805 DO FOR j = 0, 6376 DO BEGIN
L3(i, j) = B3(i, j)/1.154
L4(i, j) = B4(i, j)/2.127
; *****ÍNDICE DE VEGETACIÓN NORMALIZADOS (NDVI) *****
;
; ndvi(i,j)=(155.7*L4(i,j)-104.7*L3(i,j))/(155.7*L4(i,j)+104.7*L3(i,j))
;
; *****
;
IF (ndvi (i, j) LE 1.0) AND (ndvi (i, j) GT -0.2) THEN BEGIN
ndvi (i, j)= ndvi (i, j)
ENDIF ELSE BEGIN
ndvi (i, j) = -0.2

ENDELSE
ENDFOR
WRITE_TIFF, 'F:\TULIO\IMG_SATELITES\CBERS_POZ \ndvi.tif, ndvi,
geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY, /FLOAT

END

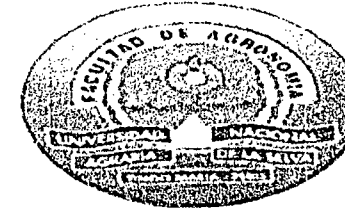
```



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Tingo Maria

Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos
 Av. Universitaria s/n Telef. (064) 562342 Anexo 283 Fax (064) 561156 Aptdo. 156



ANALISIS DE SUELOS

Procedencia: Oxapampa Pozuzo

Solicitante: Tesis RNR-CSA

Número de Muestra	ANALISIS MECANICO	pH	M.O.	N	P	K ₂ O	CAMBIABLES meq/100g	ppm												%				
								Arena %	Limo %	Arcilla %	Textura	1:1	%	%	ppm	kg/ha	CIC	Ca	Mg		K	Na	Fe	Cu
M76-07	no aparente p1	26.0	60.0	14.0	Fo.Lo.	5.4	3.9	0.18	9.00	213		3.00	1.00			66	1.0	1.9	3.1	2.50	1.0	7.50	46.67	53.33
M77-07	no aparente p2	26.0	40.0	34.0	Fo.Ar.	4.0	2.6	0.12	5.30	228		1.80	0.50			71	2.0	3.1	2.5	1.30	1.0	4.60	50.00	50.00
M78-07	no aparente p3	44.0	48.0	8.0	Franco	5.3	3.2	0.14	8.00	289		2.69	0.55			65	3.1	5.1	2.8	0.50		3.74	13.37	86.63
M79-07	leve p4	44.0	38.0	18.0	Franco	4.7	2.9	0.13	7.40	316		2.50	0.80			69	1.8	1.9	2.8	1.50	1.0	5.80	43.10	56.90
M80-07	leve p5	66.0	22.0	12.0	Fo.Ao.	4.5	4.6	0.21	9.70	289		1.00	0.40			72	1.6	3.0	2.2	1.90	0.5	3.80	63.16	36.84
M81-07	leve p6	24.0	60.0	16.0	Fo.Lo.	5.1	2.6	0.12	6.90	368		3.00	0.60			55	1.2	2.8	2.6	1.00	0.3	4.90	26.53	73.47
M82-07	moderada p7	26.0	46.0	28.0	Fo.Ar.	5.2	2.9	0.13	9.30	330		3.50	0.60			58	2.4	2.8	4.2	2.00	0.9	7.00	41.43	58.57
M83-07	moderada p8	42.0	40.0	18.0	Franco	4.7	2.4	0.11	9.10	235		3.20	0.80			71	1.6	2.4	3.0	2.50	1.0	7.50	46.67	53.33
M84-07	moderada p9	36.0	40.0	24.0	Franco	4.7	3.1	0.14	4.80	259		2.00	0.50			68	1.4	3.1	2.8	1.30	0.4	4.20	40.48	59.52
M85-07	severa p10	38.0	38.0	24.0	Franco	5.4	3.3	0.15	9.70	326		3.50	0.80			64	1.9	1.8	3.6	1.30	0.2	5.80	25.86	74.14
M86-07	severa p11	44.0	32.0	24.0	Franco	4.7	2.0	0.09	5.20	345		1.80	0.70			77	2.1	2.0	3.0	3.00	0.7	6.20	59.68	40.32
M87-07	severa p12	16.0	40.0	44.0	Fo.Lo.	4.8	1.0	0.05	5.60	250		3.30	0.90			74	2.0	2.3	2.6	1.20	0.4	5.80	27.59	72.41

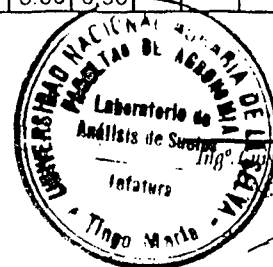
% Bases Cambiables = $\frac{Ca+Mg+K+Na}{CIC} \times 100$

% Acides Cambiable = $\frac{Ca+Mg+Al+H}{CIC} \times 100$

Para: Fe,Cu,Zn,Mn = ppm

Observaciones : Muestras proporcionadas por el interesado

Fecha : Tingo Maria, 8 de Marzo del 2007.



G. Mansilla Minaya
 Ing.
 Jefe de Laboratorio