

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

(Universidad del Perú, Decana de América)

Escuela de Posgrado

Facultad de Ciencias Físicas

Unidad de Posgrado



Identificación de Tierras Degradadas por Salinidad del Suelo en los Cultivos de Caña de Azúcar en Pomalca usando Imágenes de Satélite.

Tesis

Para optar el Grado Académico de Magíster en Física con mención en Geofísica

Presentado por

Br. Renato Soca Flores

Asesor: Dr. Joel Rojas Acuña

Co-Asesor: Dr. Bram Leo Willems

Lima - Perú

2015

Dedicatoria

*A Dios por guiarme en la travesía
de la vida y darme las fuerzas para
salir adelante en momentos difíciles.*

*A la memoria de Ulises,
a quién siempre extraña la familia.*

Agradecimientos

A los integrantes del Laboratorio de Teledetección (LABTEL) de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM) por el apoyo durante el desarrollo del presente trabajo.

Al Dr. Joel Rojas Acuña asesor y gestor del presente trabajo por su orientación y enseñanza en todo momento.

Al Dr. Leonidas Ceferino Ocola Aquisé y al Dr. Bram Leo Willems por sus enseñanzas y sugerencias.

A la Empresa Agroindustrial Pomalca S.A.A en especial al Ing. Ranulfo Fernández Vílchez y José Carlos Pérez Dávila por haberme proporcionado la información de campo requerido.

Al Proyecto Cátedra CONCYTEC: “Teledetección en Desertificación y Sequía” (R.P.N° 328-2011-P) por la subvención de una beca para el estudio de maestría y desarrollo de la tesis.

Resumen

El objetivo del presente trabajo es identificar suelos degradados por salinidad, empleando imágenes de satélite de alta resolución espacial en cultivos de caña de azúcar de la Empresa Agroindustrial Pomalca; ubicada entre las coordenadas geográficas longitud oeste $79^{\circ}26'$ - $79^{\circ}55'$ y latitud sur $6^{\circ}40'$ - $6^{\circ}51'$. Se utilizó datos de imágenes del sensor HRG-2, TM y ETM+ que corresponden a los satélites Spot-5, Landsat-5 y Landsat-7, respectivamente; y datos de campo de conductividad eléctrica (CE) del suelo proporcionados por la Empresa Agroindustrial Pomalca. Se estimó la reflectancia de la superficie del suelo, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) e Índice de Salinidad (IndSal) a partir de las imágenes, con la aplicación del software de procesamiento de imágenes ENVI 4.5 y el lenguaje de programación IDL. Para lograr los objetivos, se determinó el máximo valor compuesto del NDVI e IndSal del periodo 2007 - 2010 de las imágenes TM y ETM+, logrando diferenciar suelos con baja calidad agrícola y suelos sin problemas de salinidad. A partir del máximo valor compuesto del IndSal, se generó un vector de las “tierras” no cultivadas, para superponer a la imagen HRG-2 (resolución $10\text{ m} \times 10\text{ m}$) y observar con mayor detalle y además realizar el análisis de variación del NDVI en el tiempo (periodo 1999-2012) en suelos normales y con problemas de salinidad. Se hizo un análisis de regresión lineal múltiple entre los datos de campo de CE (dS/m), frente a los valores de reflectancia de superficie de las bandas B1, B2 y B3 del sensor TM del día 4 de abril 2008, obteniéndose un coeficiente de correlación de 0.73. A través de la ecuación de regresión, se generó la distribución espacial de la salinidad del suelo, la cual fue dividida en 5 clases. Como resultado, se obtuvo 1631.16 ha como suelos no salinos, 2179.71 ha suelos ligeramente salinos, 1341.9 ha suelos moderadamente salinos, 730.17 ha suelos fuertemente salinos y 26.91 ha con suelos extremadamente salinos.

Palabra Clave: Salinidad, imágenes de satélite, Spot-5, Landsat (TM y ETM+)

Acrónimos

6S	Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum-Vector
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
BIL	Band Interleaved By Line
BIP	Band Interleaved By Pixel
BSQ	Band Sequential
CE	Conductividad Eléctrica
DEM	Modelo de Elevación Digital
DIMAP	Digital Image Map xml metadata documentation
GIOVANNI	Geospatial Interactive Online Visualization ANd aNalysis Infrastructure
GPS	Global Positioning System
ENVI	Environment for Visualizing Images
ETM+	Enhanced Thematic Mapper
FAO	Food and Agriculture Organization
FLAASH	Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes
FOV	Field of View
GDEM	Global Digital Elevation Model
ha	Hectárea
HRG	High Resolution Geometric
IDL	Interactive Data Language
IFOV	Instantaneous Field of View
INDSAL	Índice de Salinidad
LPGS	Level 1 Product Generation System
MODIS	Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
MODTRAN	MODerate Resolution Atmospheric TRANsmission
MSS	Multispectral Scanning System
MVC	Máximo Valor Compuesto
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NIR	Infrarrojo Cercano

ND	Números Digitales
NDSI	Índice de Salinidad de Diferencia Normalizada
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NLAPS	National Landsat Archive Production System
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OMI	Ozone Monitoring Instrument
QA	Quality Assessment
RGB	Red, Green and Blue
RSR	Relative Spectral Response
UTM	Universal Transverse Mercator
USDA	United States Department of Agriculture
USSLS	United States Salinity Laboratory Staff
SLC	Scan Line Corrector
SMAC	Método Simplificado para la Corrección Atmosférica
SPOT	Système <i>Pour</i> l'Observation de la Terre
TM	Thematic Mapper
TOA	Top of the Atmosphere
WGS-84	World Geodetic Survey 1984

Índice

Resumen	iii
Acrónimos	iv
Índice	vi
Lista de Tablas	x
Lista de Figuras	xii

Capítulo 1. Introducción

1.1. Antecedentes	2
1.1.1. Proceso de salinización	4
1.1.2. Características de los suelos salinos	4
1.1.3. Causas de salinización	5
1.1.4. Efecto de la salinización en la agricultura	6
1.1.5. Clasificación de la salinidad de los suelos con fines agrícolas	6
1.1.6. Fenómenos de salinización a nivel mundial	7
1.1.7. Fenómeno de salinización a nivel nacional	8
1.1.8. Medida de la salinidad del suelo	9
1.1.8.1 Conductividad eléctrica del suelo	9
1.2. Objetivos	11

Capítulo 2. Fundamento Teórico de la Teledetección por Satélite

2.1. Interacción de la radiación electromagnética con la atmósfera	12
2.2. Efecto atmosférico en las observaciones por satélites	13
2.3. Corrección atmosférica	18
2.3.1. Corrección atmosférica método SMAC	19
2.3.1.1. Resumen del código 6S	19
2.3.1.2. Descripción de las funciones analíticas para el algoritmo SMAC	22
2.3.2. Corrección atmosférica modelo FLAASH	26
2.4. La imagen de satélite	27
2.4.1. Formatos digitales de imágenes multiespectrales	28
2.5. Fuentes de distorsión geométrica en imágenes	30
2.6. Corrección geométrica	31
2.6.1. Uso de funciones para la corrección	32

2.6.2. Polinomios y puntos de control en tierra.....	33
2.6.3. La ortorectificación.....	34
2.6.4. Interpolación.	34

Capítulo 3. Descripción del Área de Estudio y los Datos Utilizados

3.1. Área de Estudio	36
3.1.1. Ubicación.....	36
3.1.2. Superficie.....	37
3.1.3. Clima.....	37
3.1.4. Relieve.....	37
3.1.5. Hidrografía.....	37
3.1.6. Actividad.....	37
3.1.7. Vientos.....	38
3.2. Datos Imágenes.....	38
3.2.1. Imágenes TM Landsat-5 y ETM+ Landsat-7.....	38
3.2.2. Imagen HRG-2 de satélite SPOT-5	41
3.2.3. Imágenes GDEM ASTER Versión 2.	42
3.2.3.1. GDEM ASTER generados a partir de imágenes del sensor ASTER.....	43
3.2.4. Software web GIOVANNI.....	45
3.2.4.1. Resoluciones de los datos de GIOVANNI.....	46
3.2.4.2. Niveles de procesamiento de los datos GIOVANNI	46
3.2.4.3. Datos productos de GIOVANNI utilizado.	46
3.3. Datos de campo.....	47
3.3.1. Datos de conductividad eléctrica del suelo.....	47

Capítulo 4. Pre-Procesamiento de Imágenes

4.1. Imagen HRG-2 del satélite SPOT-5..	50
4.1.1. Corrección geométrica	50
4.1.1.1. Modelo de elevación digital (DEM).	50
4.1.1.2. Ortorrectificación de la imagen HRG-2 del satélite SPOT-5.	52
4.1.2. Corrección radiométrica.	53
4.1.2.1. Conversión de números digitales (ND) a radiancia espectral ...	54
4.1.2.2. Conversión de radiancia espectral a reflectividad en el techo	

de la atmosfera, Top Of the Atmosphere (TOA).....	57
4.1.2.3. Corrección atmosférica usando SMAC.	58
4.1.2.3.1. Ángulos para el algoritmo SMAC	59
4.1.2.3.2. Condiciones atmosféricas para el algoritmo SMAC ...	60
4.1.3 Estadística de la imagen HRG-2 del satélite SPOT-5.....	62
4.2. Imágenes TM Landsat-5 y ETM+ Landsat-7	63
4.2.1 Corrección geométrica	63
4.2.2 Corrección radiométrica	63
4.2.2.1 Conversión de números digitales (ND) a radiancia espectral ...	63
4.2.2.2 Corrección atmosférica modelo FLAASH	65
4.2.2.2.1 Librería espectral del módulo FLAASH.	65
4.2.2.2.2 Parámetros que requiere el módulo FLAASH.	67
4.3. Correlación del SMAC vs FLAASH de la imagen HRG-2 del satélite SPOT-5.....	69
4.4 Índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI).....	70
4.5. Índice de salinidad (IndSal) del suelo.....	72
4.6. Máximo valor compuesto y mínimo valor compuesto de imágenes	73
4.7. Software utilizado.	73

Capítulo 5. Resultados

5.1. Comportamiento espectral de diferentes superficies del suelo	74
5.1.1. Firma espectral obtenida de HRG-2 / SPOT-5	74
5.1.1.1. Comportamiento espectral de la caña de azúcar según su estado de salud.....	75
5.1.1.2. Comportamiento espectral del suelo según el grado de salinidad	77
5.1.2 Firma espectral obtenida de TM / Landsat-5.....	77
5.2. Identificación de tierras degradadas por la salinidad del suelo	79
5.2.1. Dinámica del cultivo de la caña de azúcar mediante el NDVI, durante el periodo 2007 a 2010 para la zona “A”	79
5.2.2. Máximo valor compuesto de 15 imágenes de NDVI 2007 a 2010 de la zona “A”	82
5.2.3. Máximo valor compuesto de 15 imágenes de IndSal, 2007 a 2010 de la zona “A”	83

5.2.4. Variación del NDVI en el tiempo para la zona “A”	87
5.2.5. Máximo valor compuesto de 15 imágenes de NDVI 2007 a 2010 para la zona “B”	91
5.2.6. Máximo valor compuesto de 15 imágenes de IndSal 2007 a 2010 para la zona “B”	91
5.2.7. Variación del NDVI en el tiempo para la zona “B”	93
5.3. Histograma de frecuencia de la conductividad eléctrica del suelo	96
5.4. Estimación de la salinidad a partir de los valores de reflectancia espectral de las bandas B1, B2, B3 y B4 de la imagen del sensor TM del satélite Landsat-5 de fecha 20/04/2008.	97
5.5. Análisis del mapa temático de la distribución de la salinidad mediante la variación del NDVI en el tiempo	105

Capítulo 6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones.....	110
6.2. Recomendaciones.....	112
Referencia.....	113
Anexo A.....	119
A.1. Magnitudes Radiométricas Básicas.....	119
A.2. Características Radiativas de la Materia	120
A.3. Reflectividad	122
Anexo B.....	127
Anexo C	133

Lista de Tablas

Tabla 1.1	Rango de tolerancia de las plantas a la salinidad de suelos.	6
Tabla 1.2	Distribución global de los suelos afectados por la sal (datos en millones de <i>ha</i>).	7
Tabla 3.1	Características de las imágenes Landsat utilizadas.	40
Tabla 3.2	Características de Landsat-5 y Landsat-7.	40
Tabla 3.3	Características de la imagen HRG-2/SPOT-5.	41
Tabla 3.4	Información de la imagen HRG-2/SPOT-5.	41
Tabla 3.5	Características del GDEM ASTER versión-2.	43
Tabla 3.6	Número de muestras de campo tomadas por mes.	47
Tabla 4.1	Valores de Bias y Gain para HRG-2/SPOT-5.	55
Tabla 4.2	Valores de la irradiancia solar exoatmosférica para HRG-2.	57
Tabla 4.3	Estadística de la reflectancia TOA para las 4 bandas de HRG-2.	58
Tabla 4.4	Detalle de los ángulos de la imagen HRG-2.	59
Tabla 4.5	Condiciones atmosféricas para el algoritmo SMAC.	60
Tabla 4.6	Estadística de las 4 bandas de la imagen HRG-2, corregida atmosféricamente mediante el algoritmo SMAC.	62
Tabla 5.1	Coordenadas UTM de los puntos en la zona “A”.	88
Tabla 5.2	Coordenadas UTM de los puntos del sector “B1”.	94
Tabla 5.3	Representación porcentual de los datos de CE del suelo.	97
Tabla 5.4	Modelos de regresión lineal entre la reflectancia de las bandas 1, 2, 3, y 4 del sensor TM - Landsat-5 en relación a los datos de CE del suelo, mediante el método de mínimos cuadrados.	101
Tabla 5.5	Modelos de regresión lineal múltiple para estimar la conductividad eléctrica del suelo (<i>dS/m</i>), a partir de la imagen de reflectancia del suelo (B1, B2, B3 y B4 del sensor TM - Landsat-5) y datos de campo de CE.	103

Tabla A.1	Coeficientes del cálculo de la distancia Tierra – Sol y el ángulo de declinación.	125
Tabla C.1	Muestras in-situ tomadas del cultivo de caña de azúcar en diferentes condiciones agroecológicas.	133
Tabla C.2	Extracción de los valores de reflectancia para las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 de la imagen TM.	134

Lista de Figuras

Figura 1.1	Definición básica de la resistividad a través de un bloque homogéneo de longitud de lado L con una corriente I aplicada y caída de potencia V entre las caras opuestas.	10
Figura 2.1	Efectos atmosféricos en la señal captada por el sensor.	12
Figura 2.2	Radiación solar exoatmosférica y en la superficie.	14
Figura 2.3	Efectos atmosféricos en la iluminación de la superficie y reflectancias medidas en el satélite.	18
Figura 2.4	Geometría del problema: θ_s ángulo cenit del Sol, θ_v ángulo cenit de visión, $\Delta\phi$ acimut relativo y $\vec{n}$ la normal de la superficie.	21
Figura 2.5	Imagen multiespectral representada en tres dimensiones.	28
Figura 2.6	Representación esquemática del formato BSQ.	29
Figura 2.7	Representación esquemática del formato BIL.	29
Figura 2.8	Representación esquemática del formato BIP.	30
Figura 2.9	Sistema de coordenadas definidos para la imagen y el mapa.	32
Figura 3.1	Ubicación del área de estudio, color verde, el marco rojo representa límite externo y división interna de los terrenos de la E. Agroindustrial Pomalca.	36
Figura 3.2	Composición de color RGB-432 de la imagen HRG-2 de nivel 1A.	42
Figura 3.3	Esquema de medición de la elevación (Δh), base (B) = x_1 , Dt : representa por $(x_1 - x_2) = \Delta p$.	44
Figura 3.4	Imagen GDEM ASTER, perteneciente a la escena S07W080.	45
Figura 3.5	Ubicación de las muestras de suelo tomadas en los años 2008 y 2009.	49
Figura 4.1	Modelo de elevación digital de los terrenos de la Empresa Agroindustrial Pomalca a partir de GEDEM ASTER (resolución espacial de $30m \times 30m$). Proyección UTM, zona 17S, Datum WGS84.	51
Figura 4.2	Ventana del ENVI para el proceso de ortorectificación de la imagen HRG-2.	52

Figura 4.3	Composición de color RGB-432, a) Imagen original y b) imagen ortorectificada.	53
Figura 4.4	Representación gráfica de L_λ vs ND en SPOT-5.	55
Figura 4.5	Radiancia espectral (L_λ) registrada por el sensor HRG-2, para las cuatro bandas; L_λ esta expresada en ($W/(m^2sr\ \mu m)$). Proyección UTM coordenadas en metros.	56
Figura 4.6	Reflectancia en la cima de la atmosfera (ρ_{TOA}), para las 4 bandas de la imagen HRG-2. Con unidad adimensional.	58
Figura 4.7	Reflectancia de la superficie (ρ_{suelo}) de las Imágenes HRG-2 usando el algoritmo SMAC. Con unidad adimensional.	61
Figura 4.8a	Histograma de frecuencias para las bandas 1 y 2 de HRG-2 corregido atmosféricamente mediante el algoritmo SMAC.	62
Figura 4.8b	Histograma de frecuencias para las bandas 3 y 4 de HRG-2 corregido atmosféricamente mediante el algoritmo SMAC.	63
Figura 4.9	Funciones de RSR del sensor HRG-2, para las bandas 1, 2, 3 y 4.	66
Figura 4.10	Función de RSR del sensor TM, para las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7.	66
Figura 4.11	Funciones de RSR del sensor ETM+, para las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7.	67
Figura 4.12	Ventana del módulo FLAASH en ENVI v-4.5.	69
Figura 4.13	Grafica de correlación de las bandas 1, 2, 3 y 4 usando SMAC vs FLAASH.	70
Figura 4.14	Comportamiento espectral de la vegetación.	71
Figura 4.15	Calculo del NDVI de la imagen HRG-2 del satélite SPOT-5, a partir de la reflectancia de las bandas 2 y 3.	72
Figura 4.16	Ejemplo del máximo valor compuesto y mínimo valor compuesto.	73
Figura 5.1	Reflectancia en diferentes coberturas del suelo (Extraídas de la imagen HRG-2 - 20/02/2009).	75

Figura 5.2	Comportamiento espectral en diferentes estados de salud de la caña de azúcar (Imagen HRG-2 - 20/02/2009).	76
Figura 5.3	Comportamiento espectral del suelo desnudo según el grado de salinidad (Imagen HRG-2 - 20/02/2009).	77
Figura 5.4	Reflectancia en diferentes coberturas del suelo (TM Landsat-5 - 20/04/2008).	78
Figura 5.5	Límite externo y división interna de los terrenos de cultivo de la Empresa Agroindustrial Pomalca. Proyección UTM, coordenadas en metros.	79
Figura 5.6a	Variación del INDVI para 6 fechas (zona "A"). Proyección UTM, coordenadas en metros.	80
Figura 5.6b	Variación del INDVI para 6 fechas (zona "A"). Proyección UTM, coordenadas en metros.	81
Figura 5.6c	Variación del NDVI para 3 fechas (zona "A"). Proyección UTM, coordenadas en metros.	82
Figura 5.7	Máximo valor compuesto de NDVI periodo 2007-2010 (zona "A"). Proyección UTM, coordenadas en metros.	83
Figura 5.8	Máximo valor compuesto de 15 imágenes de IndSal (zona "A") periodo 2007 a 2010. Proyección UTM, coordenadas en metros.	84
Figura 5.9	Detección de las áreas salinas, cerros y ciudades a un rango de 0 a 0.25 (zona "A") del MVC del IndSal. Proyección UTM, coordenadas en metros.	85
Figura 5.10	Vector (<i>Shapefile</i>) generado a un rango de 0 a 0.25 del MVC de IndSal, periodo 2007-2010 (Zona "A"). Proyección UTM, coordenadas en metros.	86
Figura 5.11	Imagen RGB=432 del sensor HRG-2 superpuesto con el vector generado del MVC IndSal (zona "A"). Proyección UTM, coordenadas en metros.	87
Figura 5.12	Ubicación de puntos en suelos salinos y no salinos en la imagen HRG-2 detectados por el MVC del IndSal (zona "A"). Proyección UTM, coordenadas en metros.	88
Figura 5.13	Variación mensual del NDVI (1999 - 2013) de los puntos A , B y C de la Figura 5.12. La línea roja, ubicada a 0.35 NDVI. Valores superiores a la línea roja, son cultivos de caña de azúcar en buen estado y valores inferiores son cultivos en mal estado o suelos en descanso para la fecha (zona "A").	89

Figura 5.14	Variación mensual del NDVI (1999 - 2013) de los puntos D, E y F de la Figura 5.12. La línea roja, ubicada a 0.35 NDVI. Valores inferiores a la línea roja, carecen de cultivos de caña de azúcar a causa de la salinidad del suelo (zona “A”).	90
Figura 5.15	Variación del NDVI en el tiempo del puntos G de la Figura 5.12, que corresponde a un cuerpo de agua, toma valores negativos.	90
Figura 5.16	Máximo valor compuesto del INDVI periodo 2007-2010 (zona “B”). Proyección UTM, coordenadas en metros.	91
Figura 5.17	Máximo valor compuesto de IndSal periodo 2007 - 2010 (zona “B”). Proyección UTM, coordenadas en metros.	92
Figura 5.18	Detección de las áreas salinas, cerros y ciudades a un rango de 0 a 0.25 del MVC de IndSal (zona “B”). Proyección UTM, coordenadas en metros.	92
Figura 5.19	Imagen RGB=432 del sensor HRG-2 superpuesto con el vector generado del MVC de IndSal (sector “B1”, Figura 5.5). Proyección UTM, coordenadas en metros.	93
Figura 5.20	Ubicación de los puntos en áreas salinas y no salinas en la imagen HRG-2 detectado por el MVC del IndSal (sector “B1”, Figura 5.5). Proyección UTM, coordenadas en metros.	94
Figura 5.21	Variación mensual del NDVI (1999 - 2013) de los puntos A, B, C y D de la Figura 5.20. La línea roja, ubicada a 0.35 NDVI indica valores inferiores a ella, no hay cultivos de caña de azúcar o cultivos de caña de azúcar en mal estado a causa de la salinidad del suelo (sector “B1”, Figura 5.5).	95
Figura 5.22	Variación mensual del NDVI (1999 - 2013) de los puntos E, F, G y H de la Figura 5.20. La línea roja, ubicada a 0.35 NDVI indica valores superiores a ella son cultivos de caña de azúcar en buen estado e inferior cultivos en mal estado a causa de la salinidad del suelo (sector “B1”, Figura 5.5).	96
Figura 5.23	Histograma de las 1108 muestras de CE del suelo analizadas en laboratorio de suelos.	97
Figura 5.24	Ubicación de los puntos de muestreo del suelo (rojo) extraídas para el análisis de la CE del suelo en el laboratorio para la zona “A”, en Imagen RGB=321 del sensor TM de fecha 20/04/2008. Proyección UTM, coordenadas en metros.	98

Figura 5.25	a), b), c) y d) Imágenes de reflectancia de la superficie para las banda 1, 2, 3 y 4 del sensor TM del satélite Landsat-5 de fecha 20/04/2008 con sus respectivas histogramas de frecuencia. Proyección UTM coordenadas en metros (zona “A”).	100
Figura 5.26	a), b), c) y d) Gráficas de dispersión entre la reflectancia de las bandas 1, 2, 3, y 4 del sensor TM del satélite Landsat-5 (20/04/2008) y la conductividad eléctrica del suelo (zona A).	102
Figura 5.27	Mapa temático de la distribución de la salinidad del suelo para la zona “A”. Proyección UTM, coordenadas en metros.	104
Figura 5.28	Ubicación de un área extremadamente salina de coordenadas (E=631305.00 m – N=9247405.00 m).	105
Figura 5.29	Ubicación de un área fuertemente salina de coordenadas (E=639855.00 m - N=9250645.00 m).	106
Figura 5.30	Ubicación de un área moderadamente salina de coordenadas (E=632145.00 m - N=9245245.00 m).	107
Figura 5.31	Ubicación de un área Ligeramente salina de coordenadas (E=636075.00 m - N=9249055.00 m).	108
Figura 5.32	Ubicación de un área No salina con coordenadas (E=634155.00 m – N=9252175.00 m).	109
Figura A.1	Flujos en la incidencia.	121
Figura A.2	Ilustración de un ángulo solido diferencial y su representación en coordenadas polares.	122
Figura A.3	Definición del ángulo sólido Ω , donde σ denota el área y r es la distancia.	123
Figura A.4	Esquema gráfico de la posición del sol con respecto a una superficie horizontal.	126

Introducción

Actualmente la degradación de tierras constituye uno de los principales problemas mundiales que afectan las bases económicas, sociales y ambientales de muchos países en el mundo. La desertificación varía mucho de un lugar a otro, pudiendo ser originado por el sobrepastoreo continuo y prolongado, la sobre explotación agrícola, deforestación, sequia, irrigación mal concebida y salinización (*Sobrino, 2000*).

En el Perú, la desertificación se presenta en las tres regiones geográficas. En la sierra se debe fundamentalmente a los procesos de erosión de suelos a causa del uso ineficiente del agua, mientras que en la selva es causado por la deforestación. Por su parte, la degradación de tierras en la costa se debe principalmente a la salinidad del suelo, lo cual afecta el 40% de la superficie cultivada siendo el más afectados la costa norte (Piura, Tumbes, Lambayeque) que son áreas importantes para la producción agrícola de exportación (*La desertificación en el Perú, 2011*).

Los terrenos de la Empresa Agroindustrial Pomalca S.A, ubicada en la provincia de Chiclayo de la región de Lambayeque, presentan problemas de salinidad del suelo en sus áreas de cultivo de caña de azúcar, lo que limitan la buena calidad de producción de azúcar. Tradicionalmente en nuestro país los estudios de salinidad son realizados a través de la medición de muestras de suelo, localizadas mediante una cuadrícula de 1 ó 2 km de longitud en el área de interés. Esta labor representa mucho tiempo y costo, factores que limitan su actualización. Debido a la dinámica de la salinidad y su distribución en los terrenos, se requiere de métodos que proporcionen información a corto plazo sobre la ubicación de las áreas afectadas y que ayuden a dar seguimiento a la efectividad de las medidas aplicadas para la rehabilitación de suelos ensalitrados (*Wiegand et al., 1994*).

Por esta razón, es necesario contar con un sistema de evaluación y vigilancia de la degradación de los suelos, para facilitar el manejo de información, que sirvan para seleccionar las áreas más afectadas, para luego determinar las acciones de combate más permitente (*Abraham and Torres, 2007*).

Para responder a esta dificultad, la técnica de sensoramiento remoto constituye una alternativa adecuada para el monitoreo de la salinidad, y así contar con información actualizada del estado de los suelos para luego tomar decisiones de solución para su rehabilitación.

1.1. Antecedentes

La salinización es un proceso edafológico que afecta, con frecuencia, a los suelos de las regiones áridas y semiáridas, lo cual limita el número de especies cultivadas que puedan desarrollarse en estos suelos. Esta condición se ve también inducida por el uso de agua de riego de baja calidad, y más aún si al sistema de riego no se le diseña un sistema de drenaje capaz de evacuar los excesos que recargan el nivel freático (*Richards*, 1954).

En México (DR 076 Valle de Carrizo, 041 Río Yaqui y 038 Río Mayo) se realizaron estudios para identificar la salinidad del suelo, adaptando la metodología descrita por *Wiegand* (1994) para ello, utilizaron como indicadores de la salinidad al trigo, algodón y sorgo que son sembrados extensivamente. Fueron empleadas imágenes TM para generar modelos estadísticos, estimar la salinidad y el rendimiento de las parcelas sembradas con estos cultivos y para generar mapas de salinidad y rendimiento (*Pulido et al.*, 1995; *Pulido et al.*, 1997; *Pulido et al.*, 1999).

En el año 2002, se verificó el uso de la teledetección como una herramienta de apoyo para el manejo de la salinidad del suelo en cultivos, en particular un método para enmascarar la salinidad del suelo mediante mapas de salinidad, que es un factor causante del estrés en el crecimiento de la caña de azúcar (*Lau et al.*, 2003).

El 2003, se exploró las bandas de las imágenes ASTER y ETM+ para el mapeo de la salinidad de acuerdo con la relación temporal entre la sal del suelo antes de la siembra y durante el crecimiento del cultivo, para calcular el índice de salinidad en el caso del ASTER se usó las bandas 4 y 5, y para el ETM+ las bandas 5 y 7 (*Al-Khaier*, 2003).

Lau et al. (2005) realizaron trabajos que consistió en generar una ecuación de correlación entre el nivel digital del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada con la conductividad eléctrica del suelo cuyo coeficiente de

correlación fue de 0.66, lo que se consideró aceptable por las limitaciones del tipo de imagen utilizado y el desfase en el tiempo de dichos datos.

Eldeiry and García (2008) implementó una metodología para la detección de suelos salinos en campos de alfalfa en el río Arkansas con datos de imágenes Ikonos (resolución 4 m) y Landsat (resolución 30 m) y datos de conductividad eléctrica del suelo in situ. Utilizó tres modelos estadísticos para estimar la salinidad, los mínimos cuadrados ordinarios, modelos espaciales autorregresivos y modelos modificado kriging residual y la mejor correlación fue la combinación entre el modelo de mínimos cuadrados ordinario y el modelo de kriging residual para generar mapas de salinidad.

En la Universidad Nacional Agraria la Molina (Facultad de Ciencias) se realizó estudios en el sistema hidrográfico del Lago Titicaca – Río Desaguadero – Lago Poopó y Salar Coipasa, se estimó la salinidad de los suelos; mediante un Índice de Salinidad calculado a partir de imágenes del sensor MODIS de 500 m de resolución espacial. Asimismo, se realizó la validación del Índice de Salinidad mediante mediciones de campo usando el equipo de Inducción Electromagnético EM38. Se encontró una correlación exponencial decreciente ($R^2 = 0.93$) entre la conductividad eléctrica medida con el equipo EM38 y el Índice de Salinidad a pesar de la diferencia de escalas de medición (*Heidinger*, 2008).

El trabajo realizado en Etiopía sobre el análisis y la cartografía de los niveles de salinidad del suelo en cultivos de caña de azúcar con imágenes TM; se mostró que la interpretación visual, las clasificaciones supervisadas y no supervisadas son buenos indicadores en la detección de la salinidad del suelo. Además, mediante el Índice de Salinidad de Diferencia Normalizada (NDSI) se mostró que el 6% de la superficie total representa suelos altamente afectados por la salinidad del suelo. El análisis de regresión entre los valores de la CE del suelo tomadas en los cultivos de caña de azúcar y los valores de la imagen de NDSI tuvo una relación polinómica de segundo orden con R^2 de 0.77, a partir de la regresión se obtuvo un mapa de salinidad y se estimó los niveles de la CE del suelo (*Mekeberiaaw*, 2009).

Por otra parte se realizó en la región de Lambayeque sobre la relación de la conductividad eléctrica de los suelos con la reflectancia de imágenes de satélite, se pudo concluir con una metodología que permitió estimar la salinidad

del suelo haciendo uso de la reflectancia de las bandas 1 a 7 del sensor ETM+ transportado por el satélite Landsat-7, la reflectancia correlacionó bien con los datos de la conductividad eléctrica del suelo in-situ, siendo la banda 3, la de mayor relación con la CE (*Rojas and Rufasto, 2011*).

En el Laboratorio de Teledetección (LABTEL) de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos se ha realizado estudio sobre la “Detección de la Salinidad en los suelos de Cultivos de Algodón usando Imágenes de Satélite en la Costa Norte del Perú” a partir de las imágenes de ASTER y ETM+. La correlación de los datos de C.E estimada y la C.E in situ presentaron una alta correlación con modelos de regresión lineal múltiple (NDVI, IndSal y la reflectancia) (*Badaracco, 2012*).

1.1.1. Proceso de salinización

La salinización es un fenómeno que consiste principalmente en la acumulación en el suelo de sales solubles en agua, tales como sales de potasio (K^+), magnesio (Mg^{2+}), calcio (Ca^{2+}), cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}), carbonato (CO_3^{2-}) y bicarbonato (HCO_3^-). Estas sales tienen efectos negativos en las propiedades químicas y físicas de los suelos, así también, como en las raíces de las plantas, lo cual afecta su crecimiento, desarrollo y productividad (*García, 2002*).

1.1.2. Características de los suelos salinos

El término salino se aplica a suelos cuya conductividad del extracto de saturación es mayor de 4 dS/m a 25°C y presenta un pH mayor a 8.5 (*Richards, 1954*).

Una característica física de los suelos salinos es la presencia de costras blancas de sales en su superficie. Dichos suelos se encuentran principalmente en climas áridos o semiáridos. Esto ocurre debido a que hay menor precipitación para lavar y transportar las sales, y por la elevada evaporación que tiende a concentrar las sales en los suelos y en el agua superficial (*Alva et al., 1976*).

Uno de los factores relacionados al proceso de salinización es el sistema de drenaje compuesto por una red de canales que recogen y conducen el agua hacia otras zonas, además de controlar la acumulación de sales en el suelo. Por lo tanto, un drenaje restringido contribuye a la salinización de los suelos, ya

que puede llevar consigo la presencia de una capa freática poco profunda o una baja permeabilidad del suelo. Este último puede deberse a la textura o presencia de capas endurecidas que pueden estar constituidas por arcilla (*Alva et al.*, 1976).

Es importante resaltar que, después de todo proyecto de irrigación, el mal uso del agua provoca el aumento del nivel de la napa freática produciendo la salinización.

1.1.3. Causas de salinización

El desarrollo de los suelos salinos es debido a una acumulación de sales solubles originadas, en un principio, por la intemperización de los minerales; sin embargo, es una causa de acumulación de sales poco dañina. Para la formación de suelos salinos las sales tienen que ser transportadas y concentradas siendo los agentes principales el agua y el viento (*Alarcón*, 1982).

Los suelos salinos se originan a causa de (*Caro*, 1966):

- Sales del agua subterránea. Esta es una de las importantes fuentes de acumulación de sales en regiones áridas y semiáridas, ya que al momento en el que el agua subterránea se encuentra a pocos metros de la superficie, hay tendencia a que el agua con contenido de sales ascienda a la superficie por capilaridad, lo que genera la acumulación de sales en la superficie.
- Sales del agua de riego. Toda irrigación trae consigo la recarga del agua subterránea, debido a que las parcelas al inundarse generan el aumento de esta aguas, con la consecuente acumulación de sales en las áreas de cultivo.
- Sales del agua de mar. Son una causa importante de la salinización del suelo en zonas costeras donde el área es inundada con agua del mar o donde partículas de sal son depositadas en las áreas de cultivo por acción del viento.
- Sales por factores antrópicos. Es uno de los factores que influyen en la concentración de sales en los suelos debido a que generan la elevación de la capa freática por filtración de canales y depósitos sin revestir. También ocurre por la distribución desigual del agua de riego, inadecuados métodos

de regadío y drenaje. Y por hacer uno de fertilización y otros insumos, especialmente en zonas de agricultura intensiva.

1.1.4. Efectos de la salinidad en la agricultura

La salinidad de los suelos reduce el crecimiento de los cultivos, afectando la productividad y la calidad de los cultivos. El efecto más común de la salinidad sobre los cultivos es la reducción del desarrollo debido a: una disminución del potencial osmótico del medio; una toxicidad específicamente, normalmente asociada con la absorción excesiva de iones sódico y cloro; y un desequilibrio nutricional debido a la interferencia de los iones salinos con los nutrientes esenciales (*Richards, 1954*).

1.1.5. Clasificación de la salinidad de los suelos con fines agrícolas

La salinidad de los suelos es considerada uno de los procesos que afecta a la mayoría de los países, se plantea una clasificación de los suelos afectados por sales tomando en cuenta la tolerancia de los cultivos (Tabla 1.1). Está basado en la escala de salinidad señalada por el USSLS-USDA (1954) respecto a la tolerancia de los cultivos a las sales, en base a la clasificación de suelos con contenido salino en extracto de pasta saturada (*Richards, 1954*).

Categorías	Conductividad eléctrica	Características
	(<i>dS/m</i>)	
No salino	< 2	Suelos normales
Ligeramente salino	2 - 4	Son afectados los rendimientos de los cultivos muy sensibles.
Moderadamente salino	4 - 8	Son afectados los rendimientos de la mayoría de los cultivos.
Fuertemente salino	8 - 16	Sólo las plantas tolerantes a sales crecen satisfactoriamente.
Extremadamente salino	> 16	Muy pocos cultivos dan rendimientos aceptables

Tabla 1.1 Rango de tolerancia de las plantas a la salinidad de suelos (*Richards, 1954*).

1.1.6. Fenómeno de salinización a nivel mundial

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 1987), la salinización es uno de los procesos de degradación del suelo más extendido en todo el planeta. En Europa, hay tierras salobres en Hungría, Rumanía, Grecia, Italia y la Península Ibérica. En los países nórdicos, los tratamientos antihielo a base de sal ocasionan la salinización. Se estima que en la Unión Europea la salinización del suelo afecta aproximadamente a 7 millones de hectáreas. Australia y Asia cuentan con mayor área afectadas por la salinidad como se muestra en la Tabla 1.2.

La salinización se considera una causa importante de la desertificación y constituye, por lo tanto, la forma más grave de degradación del suelo. Con el aumento de las temperaturas y el descenso de las precipitaciones que se están registrando en los últimos años, el problema de la salinización en el mundo es cada vez más grave.

Área	Datos en millones de <i>ha</i>			Total (%)	La salinización Inducido por el hombre (%)
	Suelos salinos	Suelos sódicos	Total		
Australia	17.6	340.0	357.6	38.4	1.2
Asia	194.7	121.9	316.5	33.9	68.8
América	77.6	69.3	146.9	15.8	5.7
África	53.5	26.9	80.4	8.6	19.3
Europa	7.8	22.9	30.8	3.3	5.0
Mundial	351.2	581.0	932.2	100	100

Tabla 1.2. Distribución global de los suelos afectados por la sal (datos en millones de *ha*) (*Carrow and Duncan, 2012*).

Se estima que existen aproximadamente 1 500 millones de hectáreas cultivadas a nivel mundial. Existen alrededor de 230 millones de hectáreas regadas en el mundo, de las cuales aproximadamente 114 millones sufren de salinización. Se ha determinado que se pierde anualmente 1.5 millones de hectáreas por salinización (FAO, 1987), siendo Estados Unidos (28%), China (23%), Paquistán (21%), India (11%) y México (10%), los países con mayor porcentaje de áreas regadas que sufren de dicho problema.

Hoy en día, aproximadamente el 20 % del total de áreas de cultivo en el mundo cuenta con irrigación. Pero gran parte de estas tierras se encuentran en las regiones áridas y semiáridas, con lo que corren peligro de saturarse de sal, lo que reduce las cosechas y puede dañar las tierras e impedir la recuperación de las mismas (*Carrow and Duncan, 2012*).

1.1.7. Fenómeno de salinización a nivel nacional

El Perú posee una superficie de 128.5 millones de hectáreas (12% costa, 28% sierra y 60% selva), de las cuales solo 5.4 millones de hectáreas son áreas cultivadas, mientras que 2.2 millones de hectáreas que no están siendo usadas tienen potencial para ser áreas de cultivo. Por lo tanto, el total de áreas con capacidad a ser áreas cultivables es de 7.6 millones de hectáreas, de las cuales 28% se encuentra en la costa, 48% en la sierra y 24% en la selva (*Ministerio de Agricultura, 2010*).

Se considera que las mejores tierras de cultivos del Perú se encuentran en la Costa donde la agricultura es intensiva y practicada en los fondos de los valles, ya que cuenta con orientación técnica, tecnología e inversiones de grandes capitales; es por ello que son tierras de alta productividad. No obstante, por la escasez de agua existente, en la Costa se obtiene, por lo general, sólo una cosecha al año; pero en aquellos casos en que se han realizado obras de riego se obtiene hasta dos cosechas, aumentando al mismo tiempo la producción agrícola. Sin embargo, se ha determinado que en las zonas costeras hay aproximadamente unas 300 mil hectáreas que registran problemas de salinización, especialmente en las áreas donde se cultiva arroz (*Barrena et al., 2010*).

Estos problemas de salinización pueden darse de forma natural, especialmente en suelos bajos y planos que periódicamente son inundados por ríos o cuando el nivel de las aguas subterráneas es poco profundo y este asciende a la superficie por capilaridad. También puede darse la salinización por procesos antrópicos, asociados al sistema de riego. Ambos procesos se dan en la costa peruana, donde al encontrarse cercano al litoral, la brisa marina e intrusión de agua salina al acuífero generan el fenómeno de salinización, el cual también es influenciado por los factores antrópicos como el uso excesivo de fertilizantes e inadecuados manejos de regadío (*Eguren, 2003*).

1.1.8. Medida de la salinidad del suelo

La salinidad de un suelo viene determinada por el conjunto de todas las sales solubles contenido en el suelo (esencialmente Na^+ , Mg^{++} , Ca^{++} , K^+ , Cl^- , SO_4^{--} , HCO_3^- , NO_3^- y CO_3^{--}) y puede ser estimada por la medición de la conductividad eléctrica (CE) de una solución extraída del suelo. Son comúnmente evaluados mediante pruebas de laboratorio. La sal es un compuesto químico formado por iones con carga negativa enlazados a iones con carga positiva (*Rhoades et al.*, 1999).

1.1.8.1. Conductividad eléctrica del suelo

Cuando se habla de conductividad eléctrica (CE) de un suelo, usualmente se hace referencia a la conductividad Eléctrica de su extracto de saturación. Y la conductividad eléctrica, como tal, es determinada en un medio líquido. La conductividad eléctrica es una expresión numérica y hace referencia a la capacidad que tiene una solución para conducir la corriente eléctrica. Se usa comúnmente para indicar la concentración total de componentes ionizados en las distintas soluciones y es proporcional al contenido de sales disueltas. Está íntimamente relacionado con la suma de cationes o aniones que se determinen químicamente y en general tiene correlación estrecha con los sólidos totales disueltos (*Andrades*, 2012).

La medida variará dependiendo de la temperatura, por lo que se estandariza a $25^{\circ}C$. Generalmente es medida en unidades de:

$$\frac{1dS}{m} = \frac{1mS}{cm} = \frac{1mmhos}{cm}$$

La determinación de la conductividad eléctrica implica la medida física de la resistencia eléctrica de los materiales (R), que se expresa en ohmios (Ω) (*Rhoades et al.*, 1999). La resistencia de un material conductor (tal como una solución salina) es inversamente proporcional a su área de sección transversal (A) y directamente proporcional a su longitud (L), Figura 1.1. (*Reynolds*, 1997).

$$R \propto \frac{L}{A} \quad (1.1)$$

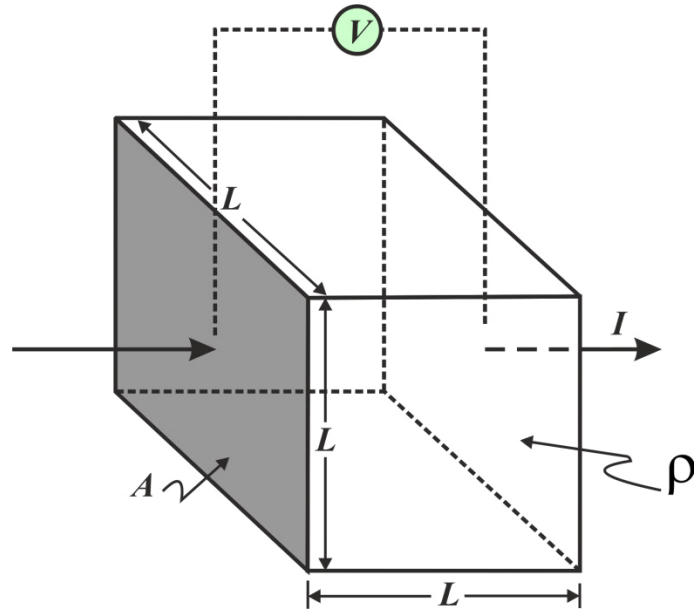


Figura 1.1. Definición básica de la resistividad a través de un bloque homogéneo de longitud de lado L con una corriente I aplicada y caída de potencial V entre las caras opuestas (*Reynolds, 1997*).

La constante de proporcionalidad de la ecuación (1.1) es la resistividad (ρ).

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1.2)$$

De acuerdo a la ley de Ohm y de la ecuación (1.2) la resistividad también puede ser expresada como

$$\rho = \frac{VA}{IL} \left(\frac{\Omega}{m} \right) \quad (1.3)$$

La inversa de la resistividad es la conductividad eléctrica ($CE = \sigma$)

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (1.4)$$

Que tiene unidades de siemens/metros (S/m) que es equivalente a ($\Omega^{-1}m^{-1}$).

Los principales tipos de extractos de saturación o sistemas que se utilizan para medir la conductividad eléctrica del suelo son los siguientes (*Corwin and Lesch, 2005*):

Extracto 1:1 (1 de suelo: 1 de agua), consiste en disolver en un recipiente: N gramos de muestra de suelo con N mililitros de agua destilada.

Extracto 1:2 (1 de suelo: 2 de agua), consiste en disolver en un recipiente: N gramos de muestra de suelo con 2N mililitros de agua destilada.

Extracto 1:5 (1 de suelo: 5 de agua), consiste en disolver en un recipiente: N gramos de muestra de suelo con 5N mililitros de agua destilada.

En cada uno de estos extractos se obtienen un valor diferente. Algunos de estos valores son parecidos entre sí y otros son diferentes. La interpretación de estos guarismos debe realizarse cuidadosamente, teniendo en cuenta el significado de cada uno de ellos.

Independientemente del método de extracción, la Conductividad Eléctrica hasta aquí mencionada se lee siempre en un medio líquido, por medio de un electrodo apropiado. El valor obtenido suele ser menor a medida que se incrementa el nivel de dilución.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Identificar el grado y extensión de las tierras degradadas por salinidad del suelo en los cultivo de caña de azúcar de la Empresa Agroindustrial Pomalca (Lambayeque).

1.2.2. Objetivos específicos

- Implementar metodologías para la estimación de la conductividad eléctrica del suelo empleando imágenes de satélite Spot-5, Landsat-5 y Landsat-7, y datos in-situ de conductividad eléctrica del suelo.
- Generar modelos estadísticos basados en la regresión lineal simple y múltiple usando los datos in-situ de conductividad eléctrica del suelo y los parámetros físicos (reflectancia, NDVI, InSal) obtenidos de las imágenes de satélite Spot-5 y Landsat-5 y 7.
- Generar mapas temáticos de la distribución espacial de las tierras degradadas por la salinidad empleando los parámetros físicos como la reflectancia, índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) e índice de salinidad (IndSal) extraídas de las imágenes Spot-5 y Landsat-5 y 7.

Fundamento Teórico de la Teledetección por Satélite

2.1. Interacción de la radiación electromagnética con la atmósfera

El estudio de la atmósfera es importante, ya que influye en el paso de la radiación electromagnética en dos etapas (fuente-objeto y objeto-sensor). Los sensores ubicados en satélite captan la radiación del espectro solar que reflejan la atmosfera y de los objetos sobre la superficie de la Tierra. Esta señal depende de las características ópticas de la superficie, pero también se ve afectado por dos procesos atmosféricos, la absorción gaseosa y scattering (dispersión) por moléculas y aerosoles. En la Figura 2.1. se presenta de manera esquemática, la interacción de la energía radiante proveniente del Sol, su paso por la atmósfera, su reflejo en la superficie terrestre y las captaciones de la energía resultante de estas interacciones por un sensor ubicado en un satélite (*Vermote et al., 2006*).

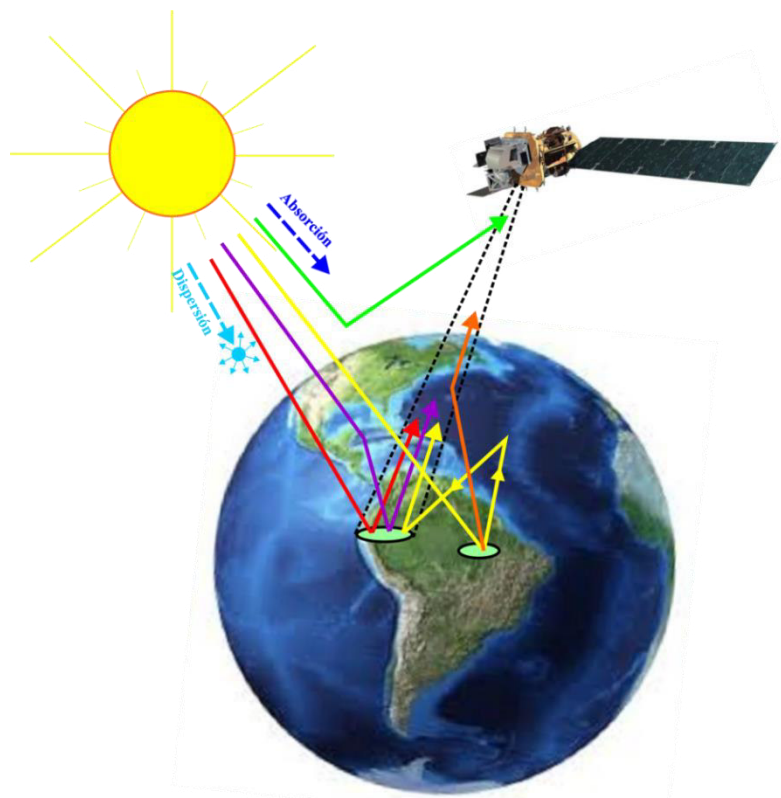


Figura 2.1. Efectos atmosféricos en la señal captada por el sensor (Adaptado de *Vermote et al., 2006*).

La **absorción** es el proceso mediante el cual la energía radiante incidente, es transformada a otro tipo de energía, o a energía de otra frecuencia, por las moléculas gaseosas y partículas suspendidas en el aire. Por otro lado, **scattering** es el proceso mediante el cual la energía incidente reaparece en otras direcciones como radiación dispersa, por la interacción con moléculas y partículas de la atmósfera (*Chandrasekhar, 1960*).

Parte de la radiación electromagnética incidente, sólo interactúa con la atmósfera, en la cual disminuye por efecto de la absorción y scattering en todas las direcciones. Este fenómeno es la causa de que la atmósfera tenga un color azul la mayor parte del día y sea de tonos rojizos al amanecer y atardecer, dependiendo de la masa de atmósfera y sus componentes que atraviesa la radiación emitida por el Sol. La señal de esta radiación dispersa que capta el sensor, se denomina radiancia de trayectoria y sólo lleva consigo información de los componentes atmosféricos.

También algunos fotones que interactúan con la superficie terrestre en las cercanías de la zona de interés, son desviados por los componentes atmosféricos y se detectan por el sensor del satélite. Este tipo de radiación se denomina radiancia ambiental y lleva consigo información de objetos de la superficie terrestre cercanos a la zona de interés.

Finalmente, los fotones que atraviesan la atmósfera, son reflejados por la superficie de interés y se captan en el sensor, se denomina radiancia directa. Ese tipo de radiación es la que interesa al analista, ya que lleva consigo información de los objetos terrestres de interés.

2.2. Efectos atmosféricos en las observaciones por satélite

En el manual del 6S por *Vermote et al. (2006)* define los efectos atmosféricos como el cambio en la intensidad de radiación electromagnética en una determinada longitud de onda, por efectos de la absorción y scattering por las moléculas y aerosoles presentes en la atmósfera. La absorción por los gases atmosféricos en el espectro solar se debe principalmente a:

- Oxígeno (O_2)
- Ozono (O_3)

- Vapor de agua (H_2O)
- Bióxido de carbono (CO_2)
- Metano (CH_4)
- Óxido nitroso (N_2O)

El O_2 , CO_2 , CH_4 , N_2O se pueden considerar constantes y uniformemente mezclados en la atmósfera, la concentración de H_2O y O_3 , dependen de la ubicación y el tiempo. Los gases absorben la radiación mediante cambios en los estados rotacionales, vibratorios o en el nivel de energía de los electrones. La energía de rotación es débil y corresponde a la emisión o absorción de fotones de frecuencia amplia, que se ubica en la porción de microondas e infrarrojo lejano del espectro electromagnético. La transición vibratoria es más fuerte que la rotación y extiende su rango de absorción hacia el infrarrojo cercano. Finalmente la transición de los estados de energía de los electrones es muy fuerte lo que provoca bandas de absorción en la porción ultravioleta y visible del espectro electromagnético. Dado que las transiciones en los niveles de energía ocurren en valores discretos (saltos cuánticos), los coeficientes de absorción varían rápidamente con la frecuencia y presentan una estructura compleja, se muestran como líneas de absorción del espectro electromagnético.

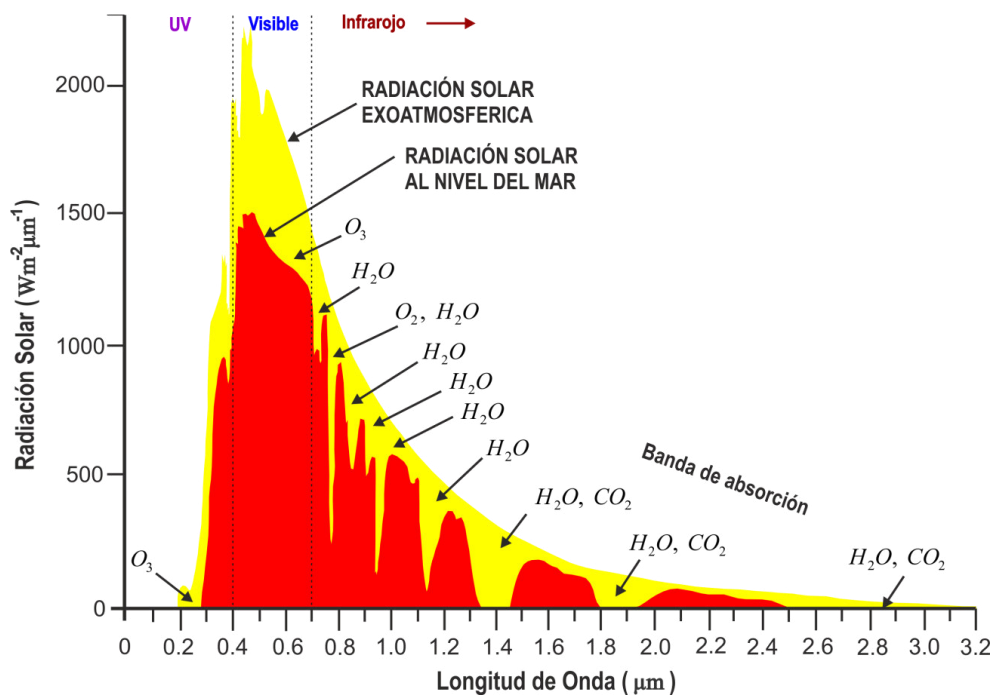


Figura 2.2. Radiación solar exoatmosférica y en la superficie (Adaptado de Liou, 2002).

La Figura 2.2. muestra las bandas de absorción de los principales gases atmosféricos. Sin embargo no se aprecia el N_2O que presenta dos bandas de absorción alrededor de 2.9 y 3.9 μm . Una vez determinadas la posición, forma e intensidad de cada línea en las bandas de absorción, el valor del factor de absorción puede calcularse exactamente mediante una integración, línea por línea (*Vermote et al.*, 2006).

Para la descripción del efecto de scattering, se supone que la superficie tiene la propiedad de reflectancia lambertiana, esto es, que la reflectancia es uniforme en todas las direcciones. También se supone que la atmósfera es homogénea en el plano horizontal y varía verticalmente en capas paralelas. Los valores medidos en el satélite se expresarán en términos de la reflectancia equivalente ρ_b^* que es justificado detalladamente en el Anexo A.3, la cual se define de la siguiente forma:

$$\rho_b^* = \frac{\pi d^2 L_b}{E_s^b \mu_s} \quad (2.1)$$

dónde, L_b es la radiancia medida en el satélite integrado en la banda espectral b (Wm^{-2}), E_s es la irradiancia exoatmosférica solar en la parte alta de la atmósfera integrado en la banda espectral b (Wm^{-2}), d es la distancia de la Tierra al Sol en unidades astronómicas, $\mu_s = \cos \theta_s$ es el coseno del ángulo cenit del sol y θ_s es el ángulo cenit del Sol.

La dirección de visión se describirá con el ángulo cenit de visión θ_v y el ángulo acimut de visión ϕ_v , y los ángulos del Sol como el ángulo cenit del Sol θ_s y el ángulo acimut del Sol ϕ_s , (Figura 2.4).

A continuación, se traduce y resume de manera breve las diferentes interacciones de la radiación proveniente del Sol con la atmosfera y la superficie terrestre según el manual de 6S (*Vermote et al.*, 2006). Con el fin de simplificar las ecuaciones no se considera el subíndice de banda espectral, pero no se debe olvidar la dependencia de estas interacciones con el intervalo de longitud de onda de la banda de muestreo.

Para la iluminación de la superficie se tiene en magnitudes decrecientes:

1. La atenuación del flujo de radiación hacia abajo por la atmósfera terrestre E_{sol}^{dir} .

$$E_{sol}^{dir} = \mu_s E_s e^{\frac{-\tau}{\mu_s}} \quad (2.2)$$

donde τ representa el espesor óptico atmosférico, que como se puede apreciar en la ecuación (2.2), es un coeficiente de atenuación de la intensidad de radiación. El término $e^{\frac{-\tau}{\mu_s}}$ se le denomina transmitancia directa y resulta de la normalización de la iluminación directa.

2. El flujo de radiación difusa hacia abajo E_{sol}^{dif} ; el cual es independiente de las condiciones de la superficie y será descrita por el factor de transmitancia difusa $t_d(\theta_s)$ definido como:

$$t_d(\theta_s) = \frac{E_{sol}^{dif}(\theta_s)}{\mu_s E_s} \quad (2.3)$$

3. Un segundo flujo de radiación difusa resultante de un efecto de trampa (referencia); depende del ambiente que rodea al objetivo y corresponde a múltiples reflejos y scattering entre la atmósfera y la superficie. Si el albedo esférico de la atmósfera se representa por S , y la reflectancia del objetivo como ρ_o , este término se puede escribir como:

$$\left[e^{\frac{-\tau}{\mu_s}} + t_d(\theta_s) \right] [\rho_o S + \rho_o^2 S^2 + \dots] \quad (2.4)$$

La serie infinita de la expresión (2.4) se puede simplificar utilizando una serie geométrica, por lo que se puede escribir de la siguiente manera:

$$[\rho_o S + \rho_o^2 S^2 + \dots] = \frac{1}{1 - \rho_o S} - 1 \quad (2.5)$$

Si se define la transmitancia total como:

$$T(\theta_s) = e^{\frac{-\tau}{\mu_s}} + t_d(\theta_s) \quad (2.6)$$

y se suman los tres términos, la iluminación total normalizada a nivel superficial se puede escribir como:

$$\frac{T(\theta_s)}{1 - \rho_o S} \quad (2.7)$$

A nivel satélite, la radiancia detectada resulta de:

1. La contribución de la radiación solar total (directa + difusa), reflejada por la superficie y transmitida directamente al satélite, expresada como transmitancia directa:

$$e^{\frac{-\tau}{\mu_v}}, \quad \text{donde } \mu_v = \cos \theta_v \quad (2.8)$$

2. La radiancia intrínseca atmosférica, expresada en función de reflectancia, denominada reflectancia de trayectoria:

$$\rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) \quad (2.9)$$

3. La contribución ambiental que refleja el flujo total (directo + difuso) hacia abajo, los fotones llegan al sensor mediante dispersión por la atmosfera, la cual se expresa como:

$$t'_d(\theta_v) \quad (2.10)$$

Si los términos $t_d(\theta_s)$ y $t'_d(\theta_v)$ se consideran idénticas por el principio de reciprocidad, la reflectancia aparente a nivel del satélite se puede expresar como:

$$\rho^*(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) = \rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) + T(\theta_s)T(\theta_v) \frac{\rho_o}{1 - \rho_o S} \quad (2.11)$$

con

$$T(\theta_v) = e^{\frac{-\tau}{\mu_v}} + t_d(\theta_v) \quad (2.12)$$

En la Figura 2.3. se presenta de manera esquemática las interacciones de los fotones con la atmósfera y la superficie terrestre. En la parte superior se encuentran las tres componentes de la iluminación de la superficie, mientras que en la parte inferior se muestran los componentes de reflectancia medidos por el sensor del satélite.

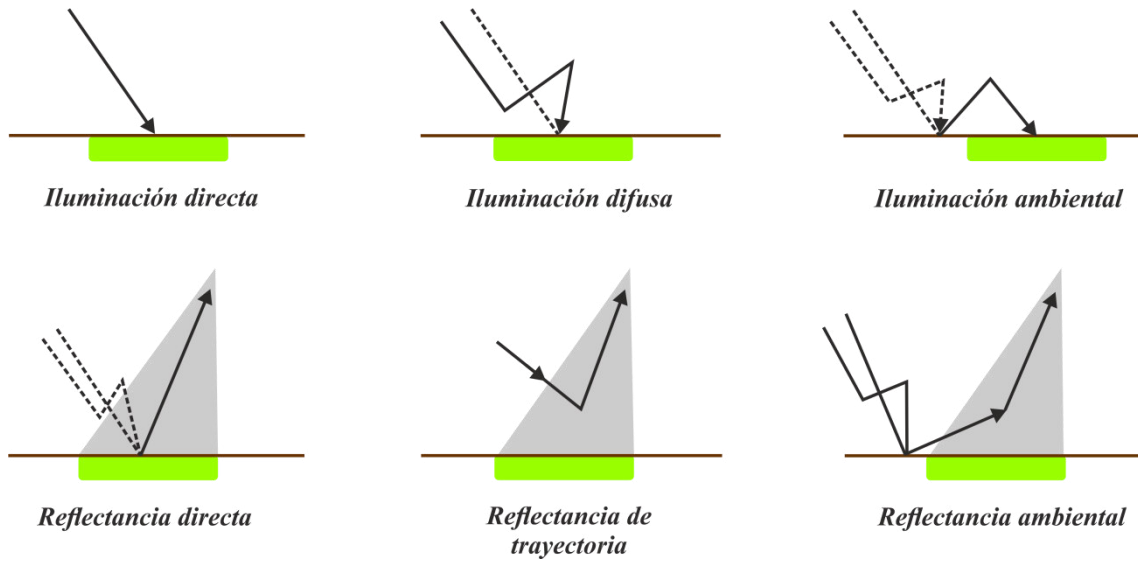


Figura 2.3. Efectos atmosféricos en la iluminación de la superficie y reflectancias medidas en el satélite (Adaptado de Vermote et al., 2006).

Supongamos que la reflectancia de la superficie no es uniforme. En primer lugar, consideramos un pequeño objeto M de reflectancia $\rho_c(M)$ con un entorno uniforme de reflectancia ambiental $\rho_e(M)$. En este caso la ecuación (2.11) se puede escribir como:

$$\rho^*(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) = \rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) + \frac{T(\theta_s)}{1 - \rho_e S} \left[\rho_c(M) e^{\frac{-\tau}{\mu_s}} + \rho_e(M) t_d(\theta_v) \right] \quad (2.13)$$

Si se agrega el efecto de la absorción gaseosa al introducir la transmisividad de los gases, la ecuación (2.13) se convierte en:

$$\begin{aligned} \rho^*(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) &= t_g(\theta_s, \theta_v) \left\{ \rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) \right. \\ &\quad \left. + \frac{T(\theta_s)}{1 - \rho_e S} \left[\rho_c(M) e^{\frac{-\tau}{\mu_v}} + \rho_e(M) t_d(\theta_v) \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Al despejar (ρ_c) de la ecuación (2.14) se obtiene la reflectancia en la superficie terrestre del objeto de interés.

2.3. Corrección atmosférica

Las imágenes de la superficie terrestre, adquiridas en el espectro solar y que son tomadas por satélite de observación, se encuentran contaminadas por la

luz solar dispersada hacia el sensor por las moléculas atmosféricas, los aerosoles y las nubes en suspensión. Además, la energía solar que es reflejado desde la Tierra se encuentra atenuada por los efectos atmosféricos. Estos efectos atmosféricos son dependientes de la longitud de onda, siendo variables en tiempo y espacio, así mismo de la reflectividad de la superficie y su variación espacial. La corrección de estos efectos atmosféricos puede producir señales de teledetección que se encuentran mejor correlacionadas con las características de la superficie (*Borengasser et al.*, 2008).

2.3.1. Corrección atmosférica método SMAC

Este método SMAC (método simplificado para las correcciones atmosféricas) toma el código “6S” como modelo de referencia para el desarrollo de la técnica.

2.3.1.1 Resumen del código 6S

El código 6S estima la reflectancia aparente en la cima de la atmósfera (TOA). El modelo toma en cuenta los efectos de absorción gaseosa, scattering por moléculas, aerosoles e inhomogeneidades espaciales en la reflectancia superficial.

Si ρ_c es la reflectancia superficial espectral del objeto, rodeado por un ambiente homogéneo de reflectancia espectral ρ_e , la reflectancia espectral TOA, ρ^* , al nivel del satélite se puede expresar de la ecuación (2.14) como (*Vermote et al.*, 2006):

$$\rho^*(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi) = t_g(\theta_s, \theta_v) \left\{ \rho_a(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi) + [e^{-\tau/\mu_s} + t_d(\theta_s)] \frac{[\rho_c e^{-\tau/\mu_v} + \rho_e t_d(\theta_v)]}{1 - \rho_e S} \right\} \quad (2.15)$$

Estrictamente hablando, esta ecuación es válida solo para el caso monocromático, la referencia a la longitud de onda ha sido omitida para una mejor claridad. Usamos las siguientes relaciones.

μ_s	= $\cos(\theta_s)$, coseno del ángulo cenit de Sol (Figura 2.4)
μ_v	= $\cos(\theta_v)$, coseno del ángulo cenit de observación
$\Delta\phi$	= acimut relativo entre el Sol y la dirección del satélite

t_g	= transmitancia total gaseosa la cual toma en cuenta varios gases absorbentes
ρ_a	= reflectancia atmosférica la cual es una función de las propiedades ópticas moleculares y aerosoles.
τ	= espesor óptico atmosférico
$t_d(\theta_s), t_d(\theta_v)$	= transmitancias difusa atmosférica
s	= albedo esférico de la atmósfera

El termino $(1 - \rho_e S)$ toma en cuenta el scattering múltiple entre la superficie y la atmósfera. Para un objeto grande, típicamente mayor que 1 km, el efecto ambiental puede ser despreciado ($\rho_e \approx \rho_c$) y la ecuación (2.15) se simplifica a:

$$\rho^*(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi) = t_g(\theta_s, \theta_v) \left\{ \rho_a(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi) + T(\theta_s)T(\theta_v) \frac{\rho_c}{1 - \rho_c S} \right\} \quad (2.16)$$

con

$$T(\theta) = e^{-\tau/\mu} + t_d(\theta) \quad (2.17)$$

donde $\theta = \theta_s$ ó θ_v y $\mu = \cos(\theta_s)$ ó $\cos(\theta_v)$

Como se muestra en las ecuaciones (2.15) y (2.16), el código 6S trata los procesos de absorción y scattering separadamente ya que la transmisión gaseosa es un factor en una serie de términos la cual describen la dispersión. Las contribuciones del scattering molecular y por aerosol son también tratadas separadamente. La reflectancia atmosférica totales es obtenida por una simple adición de las reflectancia atmosféricas de Rayleigh y por aerosoles. El código 6S es un modelo de capacidad simple donde las variaciones verticales en la función de fase son ignoradas. La función de fase de scattering es el término medio de las funciones de fase molecular y por aerosoles, ponderado por los espesores ópticos moleculares y de aerosol.

Las ecuaciones (2.15) y (2.16) son definidas para cálculos monocromáticos. Para una banda espectral dada 6S calcula cada término en la ecuación (2.15) a un paso de 5 nm dentro del intervalo espectral, calcula la reflectancia espectral TOA, y entonces integra la reflectancia espectral TOA sobre toda la banda espectral, conduciendo a la reflectancia aparente. Estas integraciones de cada

parámetro de la ecuación (2.15) sobre la banda espectral demandan un tiempo de cálculo. Los resultados de estas integraciones, para cada parámetro de (3.15), es uno de los resultados del código 6S. Por ejemplo, la transmisión gaseosa de un gas dado, t_{gi} es calculada usando:

$$t_{gi} = \frac{\int_{\Delta\lambda} t_{gi}(\lambda) R(\lambda) E_s(\lambda) d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} R(\lambda) E_s(\lambda) d\lambda} \quad (2.18)$$

Donde $R(\lambda)$ es la respuesta espectral del sensor, λ es la longitud de onda, $t_{gi}(\lambda)$ es la transmisión monocromática y $E_s(\lambda)$ la constante solar monocromática. Para el canal visible del Meteosat (0.4 – 1.1 μm), la integración numérica es realizada sobre 141 longitudes de onda y se repite para cada parámetro de (2.15).

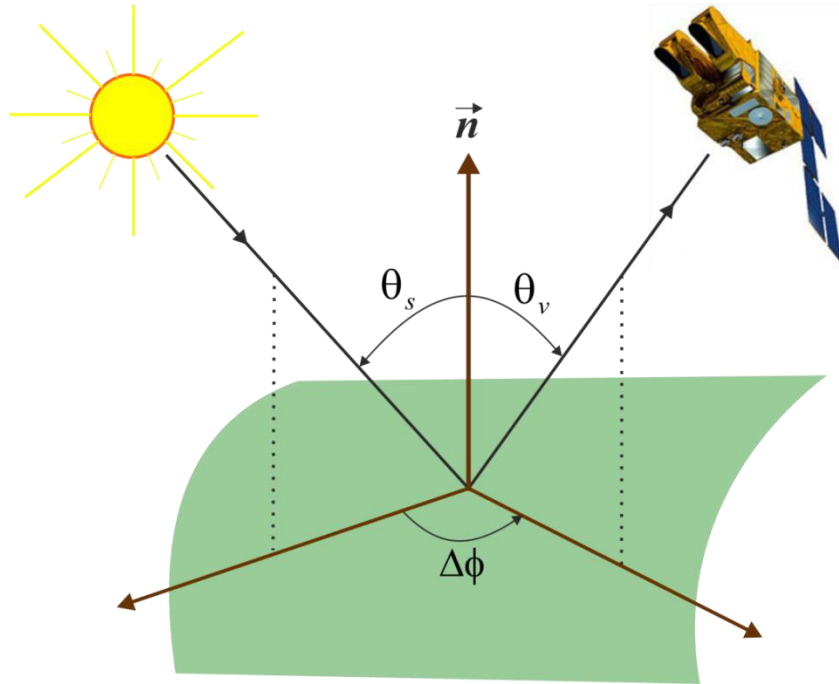


Figura 2.4. Geometría del problema: θ_s ángulo cenit del Sol, θ_v ángulo cenit de visión, $\Delta\phi$ acimut relativo y $\vec{n}$ la normal de la superficie (Adaptado de *Rahman and Dedieu, 1994*).

La estimación de la reflectancia aparente en la cima de la atmósfera necesita las siguientes especificaciones:

- ✓ ángulo del Sol y ángulo de observación.
- ✓ calcular la absorción gaseosa y la componente de Rayleigh para lo cual es necesario un modelo atmosférico definido por la presión, temperatura,

vapor de agua y contenido de ozono a niveles específicos de altitud de la atmósfera

- ✓ Calcula las funciones atmosféricas requieren el contenido de aerosol y parámetros ópticos, por ejemplo, la función de fase, factor de asimetría y albedo de dispersión simple.
- ✓ Debido a las simplificaciones implementadas para el bien de cálculos rápidos, 6S decrece en exactitud si (a) los ángulos solar y de observación son mayores que 60° y 50° respectivamente, o (b) la visibilidad horizontal es menor que 5 km, la cual corresponde a un espesor óptico mayor que 0.8 a 550 nm para un aerosol continental.

Un problema adicional surge con la recuperación de la reflectancia superficial aparente a partir de las medidas de satélite. En este caso, debemos asumir que (2.15) es aun valida para una banda espectral suficientemente estrecha. Cada término de (2.15) es calculado e integrado sobre la banda espectral, usando (2.17), y, asumiendo que la superficie es un cuerpo gris, esto es usado para invertir las ecuaciones (2.15) ó (2.16).

2.3.1.2. Descripción de las funciones analíticas para el algoritmo “SMAC”

La descripción de la interacción de la radiación solar con la atmósfera requiere la profundidad óptica, el albedo de scattering simple de la atmósfera, el factor de asimetría, y las funciones de fase del scattering (*Rahman and Dedieu, 1994*).

a) Dos maneras de la transmisión gaseosa

El doble camino de transmitancia gaseosa, t_{gi} , para un gas dado es una función de la cantidad de absorción y la masa de aire. La ecuación es similar a la ley de transmisión de Bouguer y puede ser escrito como:

$$t_{gi}(\theta_s, \theta_v) = e^{a(mU)^n} \quad (2.19)$$

donde m es la masa de aire dada por

$$m = \frac{1}{\cos(\theta_s)} + \frac{1}{\cos(\theta_v)} = \frac{1}{\mu_s} + \frac{1}{\mu_v}$$

U es la cantidad absorbente integrada verticalmente. Para una banda espectral dada a y n son constantes y son ajustadas a los resultados del 6S para cada uno de los gases separadamente. Los coeficientes a y n varían con la banda espectral. Para varios gases, la transmitancia es obtenida multiplicando cada una de las transmisiones individuales:

$$t_g = \prod_{i=1}^n t_{gi} \quad (2.20)$$

b) Albedo esférico atmosférico

El albedo esférico es independiente de la iluminación o de la geometría de observación y es una función de la profundidad óptica. Utiliza la siguiente fórmula (caso monocromático) (*Tanré et al.*, 1990):

$$S = \frac{b\tau(1 + e^{-b\tau})}{(2 + b\tau)} \quad (2.21)$$

Donde τ es la profundidad óptica del scattering total de la atmósfera y b es un factor de retrodispersión la cual solamente depende de la forma de la función de fase. A partir de los experimentos numéricos, encontramos que el albedo esférico (Rayleigh + aerosoles), promediado sobre una banda espectral, puede ser escrito como una función empírica del espesor óptico del scattering de los aerosoles a 550 nm:

$$S = 1 - \frac{1}{(a_0 + a_1\tau_{550})} \quad (2.22)$$

Donde a_0 y a_1 son constantes a ser ajustados para una banda espectral y para un modelo de aerosol dado. En esta ecuación, cuando $\tau_{550} = 0$, el albedo esférico corresponde al scattering de Rayleigh. Sin embargo, en este caso, la exactitud depende del rango de profundidades ópticas de aerosoles usadas para ajustar los coeficientes de (2.22).

c) Transmisión atmosférica total

Usamos una aproximación empírica para la transmisión difusa total y expresamos como una función del espesor óptico del scattering de aerosoles total a 550 nm y del ángulo solar y de observación:

$$T(\theta) = a_0 + \frac{a_1 \tau_{550}}{\cos(\theta)} + \frac{a_2}{(1 + \cos(\theta))} \quad (2.23)$$

Donde a_0 , a_1 , a_2 son tres constantes a ser ajustadas para una banda espectral y un tipo de aerosol. Esta transmisión toma en cuenta ambos la dispersión de Rayleigh y aerosoles. Cuando $\tau_{550} = 0$, la transmisión corresponde al scattering de Rayleigh, pero, en este caso, la exactitud depende del rango de profundidades ópticas de aerosoles usadas para ajustar los coeficientes de (2.23). La absorción de aerosoles, si existe, es implícitamente tomada en cuenta en el coeficiente a_1 , dependiendo del modelo de aerosol. Para tratar los efectos del entorno (2.15), la transmitancia difusa es calculada por (*Rahman and Dedieu, 1994*):

$$t_d(\theta) = T(\theta) - e^{-\frac{\tau}{\mu}} \quad (2.24)$$

Donde τ es la profundidad óptica promediada para: scattering molecular, scattering y absorción de aerosoles.

d) Reflectancia atmosférica

Siguiendo el código 6S se usa dos ecuaciones separadas para el cálculo de la reflectancia atmosférica molecular y de aerosoles. La reflectancia atmosférica total es obtenida por simple suma de los dos términos

e) Scattering de Rayleigh

Para una atmósfera molecular, usamos la formulación 6S para el scattering de primer orden, a partir de la cual la reflectancia atmosférica de Rayleigh es dada por.

$$\rho_{ar} = \frac{\tau_r p_r(\xi)}{4\mu_s \mu_v} \quad (2.25)$$

Donde $p_r(\xi)$ es la función de fase del scattering molecular. La función de fase específica del scattering angular de luz por la atmósfera que da la probabilidad diferencial de la radiación dispersada en una dirección dada. El espesor óptico molecular τ , es una constante para una banda espectral dada y puede ser directamente tabulada a partir de los resultados del 6S. Una corrección para la variación de la presión debe ser introducida por.

$$\tau_r(P) = \tau_r(P_0) \frac{P}{P_0} \quad (2.26)$$

Donde $\tau_r(P_0)$ es la profundidad óptica molecular a algún nivel de referencia ($P_0 = 1013.25$ hpa para condiciones estándar) y P es la presión observada (Teillet, 1990). De acuerdo a Tanré (1990), la función de fase del scattering molecular es aproximada por la siguiente ecuación:

$$P_r(\xi) = 1.5 \frac{(1 - \delta)}{2 + \delta} (1 - \cos^2(\xi)) + \frac{3\delta}{2 + \delta} \quad (2.27)$$

donde δ es el factor molecular de despolarización ($\delta = 0.0139$), y ξ es el ángulo del scattering calculado a partir de la siguiente ecuación:

$$\cos(\xi) = - \left[\mu_s \mu_v + \sqrt{(1 - \mu_s^2)(1 - \mu_v^2)} \cos(\Delta\phi) \right] \quad (2.28)$$

f) Scattering de aerosoles

La reflectancia atmosférica por aerosoles sobre una banda espectral es calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \rho_{ap}(\mu_s, \mu_v, \phi_s, \phi_v) &= \frac{1}{\mu_s \mu_v} \left\{ \frac{X \mu_v}{1 + k \mu_v} (1 - e^{(-\tau_p(1+k\mu_v)/u_v)}) \right. \\ &+ \frac{X \mu_v}{1 + k \mu_v} (1 - e^{(-\tau_p(1-k\mu_v)/u_v)}) \\ &+ [Z + P(\xi)] \frac{\mu_s \mu_v}{\mu_s + \mu_v} (1 - e^{(-\tau_p(1/\mu_s + 1/\mu_v))}) \left. \right\} \end{aligned} \quad (2.29)$$

con

$$k^2 = (1 - \omega_0)(3 - \omega_0 \beta_1)$$

donde

$$\beta_1 = 3g$$

donde g es el factor asimétrico y ω_0 es el albedo del scattering simple de la atmósfera. Para un tipo de aerosol dado y una banda espectral dada g y ω_0 son constantes. X , Y , Z son funciones complicadas de ω_0 , β_1 , μ_s , μ_v . La profundidad óptica de aerosol promedio para una banda espectral dada, τ_p , es calculada a partir de la profundidad óptica dada a 550 nm usando una ecuación lineal como sigue

$$\tau_p = a_0 + a_1 \tau_{550} \quad (2.30)$$

donde a_0 y a_1 son los coeficientes ajustadas para una banda espectral dada. La función de fase de aerosol es obtenida a partir de una ecuación polinómica de segundo orden del ángulo de fase, ξ , en grados:

$$P_p(\xi) = a_0 + a_1 \xi + a_2 \xi^2 \quad (2.31)$$

donde a_0, a_1, a_2 , son coeficientes a ser ajustada para una banda espectral dada. La reflectancia atmosférica total es finalmente dada por una simple suma de los dos términos:

$$\rho_a = \rho_{ar} + \rho_{ap} \quad (2.32)$$

2.3.2. Corrección atmosférica modelo FLAASH

El algoritmo de corrección atmosférica FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) fue desarrollado por Spectral Sciences Inc. (SSI) y el laboratorio de investigación de la fuerza aérea norteamericana, AFRL/VS, Hanscom AFB. Combina el código de transferencia radiactiva de MODTRAN4 (Moderate resolution atmospheric Transmittance and radiance code) y ha sido modificado en esta base. FLAASH es una herramienta para la corrección atmosférica de primer principio, que es capaz de corregir en el espectro visible, infrarrojo cercana e infrarrojo de onda corta y también puede eliminar la mayor parte de la influencia que tiene el aire y la luz y otros factores de la reflectancia; para obtener parámetros más precisos de la reflectividad, emisividad, temperatura de la superficie y otros modelos físicos reales, características de la superficie (*ITT Visual Information Solutions*, 2009).

FLAASH comienza con una ecuación estándar de radiancia espectral de un píxel recibido por el sensor, en plano lambertiana estándar (o casi un plano lambertiana), que se basa en el espectro del sol (no incluye la radiación térmica), la ecuación es la siguiente.

$$L = \left(\frac{A\rho}{1 - \rho_e S} \right) + \left(\frac{B\rho_e}{1 - \rho_e S} \right) + L_a \quad (2.33)$$

donde L es la radiancia de un píxel recibida por el sensor; ρ es la reflectancia de la superficie para el píxel; ρ_e es la reflectancia promedio del píxel y de las

regiones vecinas; S es el albedo esférico de la atmósfera; L_a es el radiancia que corresponde a la dispersión de la atmosférica; A, B son coeficiente independientes de la superficie y que varía con las condiciones atmosféricas y geométricas (Kawishwar, 2007).

$\left(\frac{A\rho}{1-\rho_e S}\right)$, indica la energía de radiación que ingresa en el sensor directamente las características de la superficie y $\left(\frac{B\rho_e}{1-\rho_e S}\right)$ indica la cantidad de radiación de la superficie que es dispersado por la atmosfera hacia el sensor. La diferencia entre ρ y ρ_e explica “efecto de proximidad” (radiación mixta entre píxeles cercanos) causada por la dispersión atmosférica, con el fin de ignorar este efecto de proximidad, establecemos $\rho = \rho_e$. Sin embargo, no habrá errores significativos cuando hay niebla o un fuerte contraste entre la superficie. De acuerdo con la ecuación (2.33), reflectancia de la superficie se puede calcular píxel por píxel. FLAASH utiliza radiancia promedio espacial, ignorando el “efecto de proximidad”, para obtener la ecuación aproximada (2.34) y para estimar la reflectancia promedio espacial. Dentro de esto, L_e es la imagen de la radiación promedio espacial generada por convolución con la imagen de radiación y la función de ponderación espacial (Guo and Zeng, 2012).

$$L_e = \left(\frac{(A+B)\rho_e}{1-\rho_e S}\right) + L_a \quad (2.34)$$

La mayoría de los parámetros de corrección atmosférica de este algoritmo son utilizados los archivo de cabecera de datos de imágenes, los valores de A, B, S y L_a son determinados por el código MODTRAN4 a partir del ángulo acimut y de elevación del Sol, del ángulo de visión del satélite, de la elevación promedio del área de estudio, del modelo atmosférico y aerosoles elegido y finalmente de la altura de visibilidad. Después de obtener los parámetros deseados, la verdadera reflectancia de la superficie de toda la imagen se calcula píxel por píxel mediante el uso de la ecuación (2.33) y la ecuación (2.34).

2.4. La imagen de satélite

La imagen es capturada a bordo del satélite mediante una serie de detectores fotoeléctricos que transforman los niveles de radiancia, procedentes de la superficie terrestre, en valores numéricos que se denominan números digitales.

El valor del número digital corresponde a un píxel será, de este modo, proporcional a la intensidad de radiancia procedente del terreno. Para ello se utilizan dispositivos de conversión analógico-digital (*Pérez y Muñoz, 2006*).

2.4.1. Formatos digitales de imágenes multispectrales

Una imagen multispectral se representa como una matriz en tres dimensiones de valor de escala gris o intensidad de píxel de forma $g_k(n,m)$, donde k representa número de bandas espectrales, n número de columnas del píxel y m número de filas del píxel como se muestra en la Figura 2.5. (*Canty, 2007*). Las imágenes suministrados por los sensores TM, ETM+ y HRG-2 codifican la información de los números digitales en 8 bits, por lo que admiten un rango de $2^8 = 256$ valores (*Sobrino, 2000*).

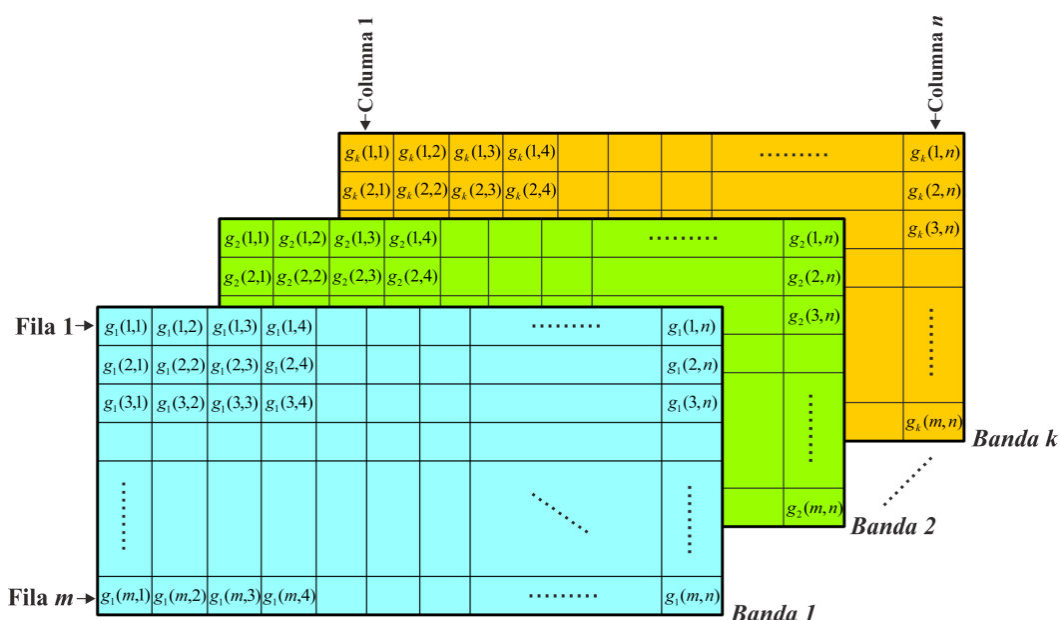


Figura 2.5. Imagen multispectral representada en tres dimensiones (Adaptado de *Sobrino, 2000*).

Existen principalmente tres formatos de grabación para las imágenes multispectrales.

a) Formato de bandas secuenciales (BSQ). Los números digitales de cada banda se disponen uno a continuación de otro hasta completar la banda. A continuación se ilustra en la Figura 2.6.

$g_1(1,1)$	$g_1(2,1)$	...	$g_1(m,1)$
$g_1(1,2)$	$g_1(2,2)$		$g_1(m,2)$
$\vdots$			$\vdots$
$g_1(1,n)$	$g_1(2,n)$	...	$g_1(m,n)$
$g_2(1,1)$	$g_2(2,1)$	...	$g_2(m,1)$
$g_2(1,2)$	$g_2(2,2)$		$g_2(m,2)$
$\vdots$			$\vdots$
$g_2(1,n)$	$g_2(2,n)$	...	$g_2(m,n)$
$\vdots$		...	$\vdots$
$g_i(1,1)$	$g_i(2,1)$	...	$g_i(m,1)$
$g_i(1,2)$	$g_i(2,2)$		$g_i(m,2)$
$\vdots$			$\vdots$
$g_i(1,n)$	$g_i(2,n)$	...	$g_i(m,n)$

Figura 2.6. Representación esquemática del formato BSQ (Adaptado de *Canty*, 2007).

b) Formato de bandas intercaladas por líneas (BIL). Se graba una línea en todas las bandas sucesivamente, y a continuación se pasa a la segunda línea, tercera, etc. Como se muestra en la Figura 2.7.

$g_1(1,1)$	$g_1(2,1)$	...	$g_1(m,1)$
$g_2(1,1)$	$g_2(2,1)$		$g_2(m,1)$
$\vdots$			$\vdots$
$g_i(1,1)$	$g_i(2,1)$	...	$g_i(m,1)$
$g_1(1,2)$	$g_1(2,2)$	...	$g_1(m,2)$
$g_2(1,2)$	$g_2(2,2)$		$g_2(m,2)$
$\vdots$			$\vdots$
$g_i(1,2)$	$g_i(2,2)$		$g_i(m,2)$
$\vdots$		...	$\vdots$
$g_1(1,n)$	$g_1(2,n)$	...	$g_1(m,n)$
$g_2(1,n)$	$g_2(2,n)$		$g_2(m,n)$
$\vdots$			$\vdots$
$g_i(1,n)$	$g_i(2,n)$	...	$g_i(m,n)$

Figura 2.7. Representación esquemática del formato BIL (Adaptado de *Canty*, 2007).

c) Formato de bandas intercaladas por pixel (BIP). Son almacenados un mismo pixel en todas las bandas antes de pasar al siguiente pixel, se ilustra en la siguiente Figura 2.8.

$g_1(1,1)$	$g_2(1,1)$	...	$g_k(1,1)$	$g_1(2,1)$	$g_2(2,1)$	...	$g_k(2,1)$	...	$g_1(m,1)$	$g_2(m,1)$	...	$g_k(m,1)$
$g_1(1,2)$	$g_2(1,2)$		$g_k(1,2)$	$g_1(2,2)$	$g_2(2,2)$		$g_k(2,2)$		$g_1(m,2)$	$g_2(m,2)$		$g_k(m,2)$
$\vdots$			$\vdots$	$\vdots$			$\vdots$		$\vdots$			$\vdots$
$g_1(1,n)$	$g_2(1,n)$	...	$g_k(1,n)$	$g_1(2,n)$	$g_2(2,n)$	...	$g_k(2,n)$	...	$g_1(m,n)$	$g_2(m,n)$	...	$g_k(m,n)$

Figura 2.8. Representación esquemática del formato BIP (Adaptado de *Canty*, 2007).

2.5. Fuentes de distorsión geométrica en imágenes

Las imágenes obtenidas por teledetección contienen distorsiones geométricas debido a muchos factores y pueden clasificarse en sistemáticas y no sistemáticas (*Richard and Jia*, 2006). Las distorsiones son sistemáticas, tales como el **sesgo de escaneado**, causado por el movimiento de avance de la plataforma durante el tiempo requerido para cada barrido del espejo; **velocidad del espejo de escaneado**, la velocidad de éste usualmente no es constante durante un dado ciclo, produciendo una distorsión geométrica a lo largo del escaneado; **efectos panorámicos y curvatura terrestre**, el efecto panorámico deriva del hecho de que los sensores de plataformas satelitales el IFOV (instantaneous field of view) angular es constante, el tamaño del pixel sobre el terreno será mayor en los extremos de la oscilación que en el nadir, también la curvatura terrestre conduce a un efecto similar, aunque para satélites de barrido poco extenso, como el Landsat (185 km) o el SPOT (120 km) el efecto es despreciable, a diferencia de lo que ocurre con los NOAA, con 2700 km de FOV (field of view); **velocidad de la plataforma**, si la velocidad de la plataforma cambia, la cobertura terrestre a lo largo de su traza terrestre para sucesivos escaneos también cambiará, se producirá una distorsión de escala a lo largo del trayecto; **rotación de la Tierra**, a medida que el sensor escanea el terreno la Tierra se desplaza de oeste a este, de modo que un punto del terreno registrado al fin del escaneado va a estar más al oeste que cuando comenzó el barrido. Como casos de distorsiones geométricas no sistemáticas se tiene los efectos por altitud y actitud; **altitud**, si la plataforma se desvía de su altitud normal o si aumenta la elevación del terreno se producen distorsiones

de escala; **actitud**, hace referencia a la orientación del satélite en el espacio tridimensional en que se desplaza. En tal sentido podemos definir un sistema de tridimensional de coordenadas ortogonales centrado en el centro de gravedad de la plataforma considerada. De acuerdo con esto puede definirse la orientación de la plataforma por la contribución de los movimientos respecto a estos ejes principales. Estos movimientos se definen como: balanceo (roll), cabeceo (pitch) y desvío (yaw).

2.6. Corrección geométrica

La corrección geométrica implica un proceso de transformación para situar biunívocamente cada píxel de las diferentes imágenes, en su correcta posición geográfica de la superficie terrestre. La necesidad de realizar este tipo de corrección surge por las diferentes distorsiones que pueden darse por las condiciones del desplazamiento y adquisición de la información en la plataforma satelital (*Sobrino, 2000*). Los procedimientos matemáticos que resuelven este problema y las metodologías usadas para su implementación mediante algoritmos en las aplicaciones informáticas de teledetección son muy variados (*Pérez y Muñoz, 2006*).

La corrección geométrica de las imágenes satélite puede abordarse de acuerdo a tres procedimientos. En el primero, 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 precisión, de las características orbitales de la plataforma y de las especificaciones del sensor. Gracias a ellas se pueden corregir errores sistemáticos, como son los derivados de la rotación o curvatura terrestre y de la inclinación de la órbita. El segundo enfoque resulta más empírico. Se trata de modelar el error geométrico a partir de una serie de puntos de coordenadas conocidas, que se denominan puntos de control, en este caso el error se modela inductivamente, ya que en las funciones de transformación se incluyen simultáneamente todas las fuentes de error, asumiendo como es lógico, que esos puntos sean suficientemente representativos de la deformación geométrica que tiene la imagen. El tercero es la ortorectificación o también llamada ortocorrección de imágenes que

corrige el desplazamiento mediante el uso del modelo de elevación digital (DEM).

2.6.1. Uso de funciones para la corrección

Una suposición que se hace en este procedimiento es que se cuenta con un mapa de la región que corresponde a la imagen, que es geoméricamente correcta. A continuación, definimos dos sistemas de coordenadas cartesianas como se muestra en la Figura 2.9. Uno describe la ubicación de puntos en el mapa (x, y) y el otro sistema de coordenadas define la ubicación de los píxeles en la imagen (u, v) . Ahora supongamos que los sistemas de coordenadas estén relacionados a través de dos funciones f y g de modo que (*Richard and Jia, 2006*):

$$u = f(x, y) \quad (2.35a)$$

$$v = g(x, y) \quad (2.35b)$$

Si se conocen estas funciones entonces podríamos localizar un punto en la imagen conociendo su posición en el mapa. En principio, lo inverso también es cierto.

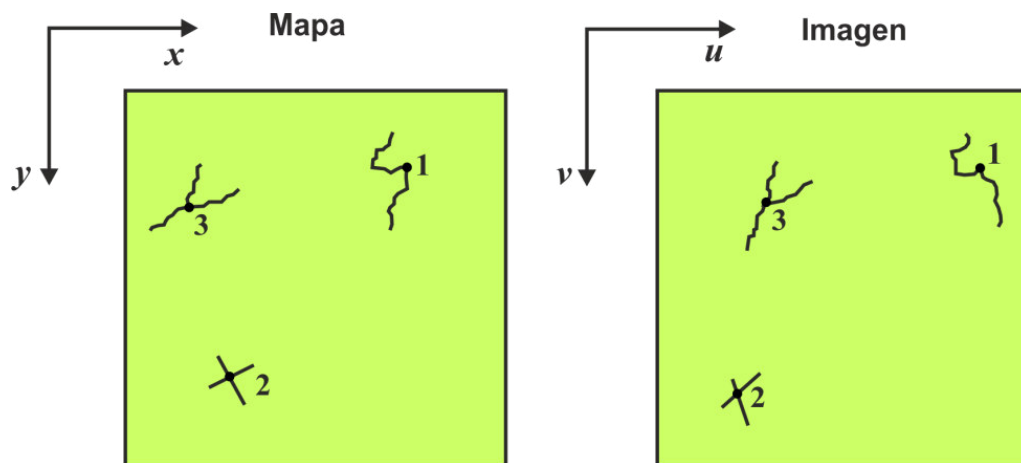


Figura 2.9. Sistemas de coordenadas definidos para la imagen y el mapa
(Adaptado de *Richard and Jia, 2006*).

Mientras que el proceso es sencillo hay algunas dificultades prácticas que debemos tener en cuenta. En primer lugar no sabemos la forma explícita de las funciones de asignación de (2.35a y 2.35b). En segundo lugar, no se pueden

señalar exactamente a un píxel en la imagen correspondiente a una ubicación del mapa, puede ser necesario realizar alguna interpolación.

2.6.2. Polinomios y puntos de control en tierra.

Puesto que las formas explícitas de las funciones de asignación de (2.35) no son conocidas, estas son generalmente elegidas como polinomios simples de primero, segundo o tercer grado. Por ejemplo, en el caso de segundo grado

$$u = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \quad (2.36a)$$

$$v = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2 \quad (2.36b)$$

A veces son utilizados de orden superior a tres, pero se debe tener cuidado de evitar la introducción de errores peores que las de corregirse. Si los coeficientes a_i y b_i en las ecuaciones (2.36a) y (2.36b) son conocidas entonces los polinomios podrían ser utilizados para relacionar cualquier punto en el mapa a su punto correspondiente en la imagen, como en la discusión anterior. Los valores se pueden estimar mediante la identificación de un conjunto de características en el mapa, que también puede ser identificado en la imagen. Estas características, conocidas como puntos de control del terreno (GPS), estos puntos deben ser bien definidos en un espacio pequeño y podría ser intersecciones de carreteras, pistas de aeropuertos, vértices geodésicos, ríos, etc. Se eligen suficientes puntos en el mapa y la imagen, de manera que los coeficientes de los polinomios pueden ser estimados por sustitución (*Sobrino, 2000*). Las ecuaciones (2.36a) y (2.36b) muestran que el número mínimo de puntos requerido para polinomios de segundo orden es seis. Del mismo modo se requiere un mínimo de tres puntos para el primer orden y de diez para el tercer orden. En la práctica, sin embargo, son requeridos más que éstos y los coeficientes son elegidos utilizando la estimación de mínimos cuadrados. De esta manera los puntos de control que contienen errores posicionales importantes ya sea en el mapa o en la imagen no tendrán una influencia indebida sobre los coeficientes del polinomio (*Richard and Jia, 2006*).

2.6.3. La ortorectificación

El método de ortorectificación incluye la elevación de cada píxel en el cálculo de las funciones de transformación. Como es sabido, el motivo que justifica este proceder es que la elevación de un punto del terreno provoca un desplazamiento aparente de dicho punto en la imagen. Este desplazamiento depende de parámetros como la localización y orientación de la imagen, de la propia elevación del punto del terreno y otras especificaciones del tipo de sensor, tales como los parámetros de la geometría del satélite y la información proporcionada junto con los datos de imagen, como la actitud y efemérides; en el caso de las cámaras fotográficas, de la posición planimétrica del punto respecto a la interacción del eje óptico de la toma con el terreno (Reis, et al., 2007).

El principal inconveniente de este método es la necesidad de disponer de un modelo de elevaciones digital (DEM) de la zona cubierta por la imagen. Una opción posible es la construcción del DEM de la zona a partir de imágenes estereoscópicas si el sensor utilizado lo permite. En este caso tendríamos garantizado un ajuste perfecto entre las imágenes y el DEM aunque sería necesario disponer de una aplicación informática fotogramétrica. La otra es conseguir el DEM de fuentes externas para luego utilizarlo en la ortorrectificación (*Cuartero y Felicísimo, 2003*).

2.6.4. Interpolación

La interpolación consiste en la extracción del número digital o valor de brillo, ubicada en x' , y' de la imagen original de entrada (distorsionada) y su traslado a las coordenadas correctas x , y de la imagen de salida rectificada, por esta razón se tiene que tomar algunas decisiones para que los valores de brillo de cada pixel deba ser colocado sobre la nueva cuadrícula. Se pueden usar tres técnicas para este propósito (*Richard and Jia, 2006*).

a) Interpolación de vecino más cercano

Consiste en situar en cada cuadrícula de la imagen corregida el valor de brillo o números digitales (ND) del pixel más cercano de la imagen original. Esta es la solución más rápida y no produce alteraciones en los ND de la imagen original.

Su principal inconveniente radica en la distorsión de los rasgos lineales de la imagen (como carreteras o caminos) que pueden aparecer en la imagen corregida como líneas quebradas.

b) Interpolación bilineal

Consiste en asignar al píxel corregido la media ponderada de los números digitales correspondientes a los cuatro píxeles más cercanos de la imagen transformada, donde el peso asociado a cada número digital es proporcional a la cercanía de aquellos, medida la distancia entre los centros de los píxeles. Este método produce resultados suavizados, reduce el efecto de distorsión en rasgos lineales, y es útil cuando se trata de corregir imágenes con información cuantitativa.

c) Interpolación de convolución cúbica

Consiste en realizar la media ponderada de los dieciséis píxeles más cercanos al píxel considerado. Los valores de brillo o ND de los dieciséis píxeles de la imagen transformada se interpolan linealmente en grupos de cuatro píxeles cada uno para formar cuatro interpolantes. Posteriormente se realiza otra interpolación lineal entre cuatro valores obtenidos para asignar el resultado al píxel corregido.

La elección entre uno de los tres métodos depende de la finalidad del proceso y de los recursos informáticos disponibles, el método del vecino más próximo es el único que preserva los valores originales al no introducir promedios. Si, por el contrario, se pretende facilitar el análisis visual, habrá de optarse por algoritmos de interpolación más sofisticados, concretamente por el de convolución cúbica (*Richard and Jia, 2006*).

Capítulo 3

Descripción del Área de Estudio y los Datos Utilizados

3.1. Área de estudio

3.1.1. Ubicación

Los terrenos de la Empresa Agroindustrial Pomalca S.A.A está ubicada en la provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque y abarca los siguientes distritos: Chongoyape, Zaña, Pisci, Chiclayo, Reque, Monsefú y Lambayeque (Figura 3.1). Tomando su fábrica como punto referencial, se encuentra a 7 km de la Ciudad de Chiclayo. Las plantaciones de Pomalca se encuentran en la cuenca del valle Chancay, las que son servidas por el río del mismo nombre y por sus ramales del río Lambayeque y río Reque. Su ubicación geográfica se encuentra enmarcada entre los 79°26' y 79°55' longitud oeste y entre los 6°40' y 6°51' latitud sur con una altitud promedio aproximado de 44 m.s.n.m. del área de estudio, según fuente de la Empresa Agroindustrial Pomalca.

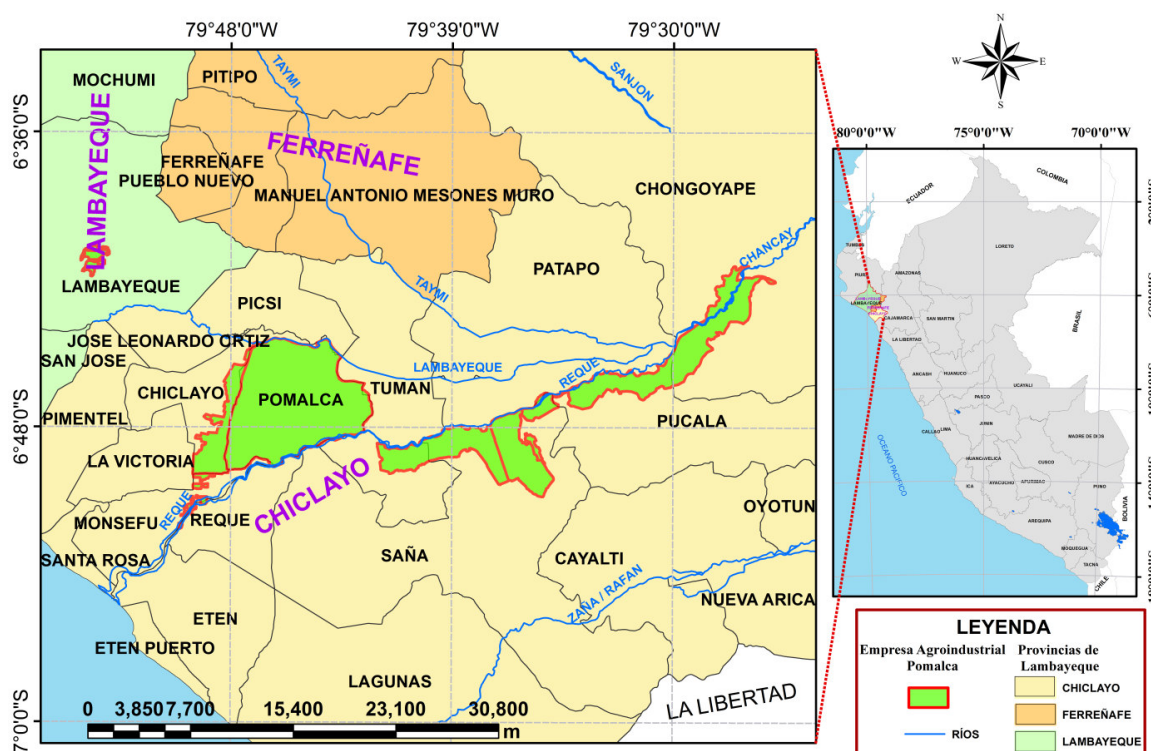


Figura 3.1. Ubicación del área de estudio, color verde, el marco rojo representa límite externo y división interna de los terrenos de la E. Agroindustrial Pomalca.

3.1.2. Superficie

La superficie territorial de la Empresa Agroindustrial Pomalca S.A.A alcanza un total de 14837,88 hectáreas, sin considerar el área de 283,45 hectáreas ocupada por los centros poblados. El área agrícola clasificada como apta para el cultivo de la caña de azúcar representa el 84,21% (12494,89 ha) del total.

3.1.3. Clima

El clima es cálido-templado durante las estaciones de primavera, otoño e invierno, y caluroso en la época de verano, esto es regulado por la cadena Occidental de los Andes, la Corriente marina de Humboldt y la corriente marina “El Niño”. La temperatura promedio fluctúa entre los 30° C en verano y 15° C en invierno, la humedad relativa varía entre el 55% y 60%; las precipitaciones pluvial promedio anual varía desde 0.5 hasta 24 mm. La característica fundamental es la escasez y deficiencia de lluvias durante todo el año.

3.1.4. Relieve

El entorno físico presenta un suelo llano de suave pendiente en dirección descendiente NE a SO, con pequeñas elevaciones constituidas por el Cerro Boro y el Cerro dos Tetas; y depresiones fácilmente inundables en épocas de lluvia, debido a que no presentan drenaje natural.

3.1.5. Hidrografía

El sistema hidrográfico lo conforman los ríos Chancay, Reque y Lambayeque de caudal variable, con nacientes en las vertientes occidentales de los Andes y con desembocadura en el Océano Pacífico. A lo largo del año tiene una descarga irregular de sus aguas; son escasas durante el invierno, incrementando notablemente su caudal en épocas de verano, debido a las precipitaciones abundantes.

3.1.6. Actividad

En la actualidad la Empresa Agroindustrial Pomalca S.A.A. tiene como actividad principal el cultivo y procesamiento de la caña de azúcar, dando como resultado la elaboración de azúcar rubia, la melaza o miel de caña y bagazo.

3.1.7. Vientos.

Los vientos son uniformes, durante casi todo el año, con dirección E a O. La dirección de los vientos está relacionada directamente a la posición del Anticiclón del Pacífico.

3.2. Datos Imágenes

3.2.1. Imágenes TM Landsat-5 y ETM+ Landsat-7.

Las imágenes TM y ETM+ son de libre acceso y se obtuvo de la Administración Nacional Aero-Espacial de los Estados Unidos (NASA), a través de la página web <http://glovis.usgs.gov/> [acceso 5 de Marzo 2014] con (Path=10, Row=65; Latitud=-7.2, Longitud=-80.0). Las características de cada una de las imágenes utilizadas se detallan en la Tabla 3.1., la nubosidad representa el porcentaje de nubes en toda la imagen, para este estudio se escogieron las imágenes que no poseen nubes exactamente en el área de estudio (Figura 3.1) durante el periodo de 1999 a 2012 que representa un total de 74 imágenes.

N°	Satélite	Sensor	Path-Row		Fecha de Adquisición	Hora de Adquisición	Ángulo de Elevación	Ángulo de Acimut	Nubosidad
1	Landsat-5	TM	10	65	1999-01-06	15:07:21	53.358	118.396	1%
2	Landsat-5	TM	10	65	1999-05-14	15:06:48	48.867	50.616	0%
3	Landsat-7	ETM+	10	65	1999-08-26	15:21:14	55.113	59.959	52%
4	Landsat-7	ETM+	10	65	1999-10-13	15:21:18	63.881	92.897	42%
5	Landsat-7	ETM+	10	65	1999-11-30	15:21:04	60.301	121.856	4%
6	Landsat-7	ETM+	10	65	2000-01-17	15:21:05	55.980	116.845	8%
7	Landsat-7	ETM+	10	65	2000-04-06	15:20:43	56.575	66.002	4%
8	Landsat-7	ETM+	10	65	2000-09-29	15:18:45	61.832	82.145	62%
9	Landsat-5	TM	10	65	2000-10-07	15:06:47	59.863	89.069	40%
10	Landsat-7	ETM+	10	65	2000-10-15	15:18:25	63.379	95.182	38%
11	Landsat-7	ETM+	10	65	2000-10-31	15:18:40	63.218	107.619	43%
12	Landsat-7	ETM+	10	65	2001-04-09	15:18:23	55.794	64.609	47%
13	Landsat-7	ETM+	10	65	2001-09-16	15:16:47	58.945	72.880	68%
14	Landsat-7	ETM+	10	65	2001-10-02	15:16:34	61.671	84.494	68%
15	Landsat-7	ETM+	10	65	2001-12-21	15:16:59	56.632	122.430	53%
16	Landsat-7	ETM+	10	65	2002-04-12	15:17:07	55.207	63.124	15%
17	Landsat-7	ETM+	10	65	2002-05-14	15:17:01	50.735	48.278	6%
18	Landsat-7	ETM+	10	65	2002-06-15	15:16:49	46.982	43.879	56%
19	Landsat-7	ETM+	10	65	2002-09-03	15:16:17	55.897	65.119	55%
20	Landsat-7	ETM+	10	65	2002-12-24	15:16:38	56.279	122.097	1%
21	Landsat-7	ETM+	10	65	2003-02-10	15:16:58	55.489	104.845	41%
22	Landsat-7	ETM+	10	65	2003-05-01	15:17:04	52.721	53.118	31%

23	Landsat-7	ETM+	10	65	2003-11-09	15:16:47	62.039	112.642	50%
24	Landsat-7	ETM+	10	65	2004-02-29	15:17:26	56.439	92.966	9%
25	Landsat-7	ETM+	10	65	2004-03-16	15:17:34	56.741	81.499	2%
26	Landsat-7	ETM+	10	65	2004-04-17	15:17:26	54.623	59.734	6%
27	Landsat-7	ETM+	10	65	2004-09-24	15:16:54	60.518	78.663	49
28	Landsat-7	ETM+	10	65	2004-10-26	15:17:05	63.009	103.886	3%
29	Landsat-7	ETM+	10	65	2004-11-11	15:17:14	61.834	114.234	47%
30	Landsat-7	ETM+	10	65	2004-11-27	15:17:23	59.748	120.566	60%
31	Landsat-7	ETM+	10	65	2004-12-13	15:17:29	57.584	122.764	3%
32	Landsat-7	ETM+	10	65	2005-04-20	15:17:49	54.360	58.097	35%
33	Landsat-7	ETM+	10	65	2005-06-23	15:17:43	46.740	43.959	67%
34	Landsat-7	ETM+	10	65	2005-11-14	15:17:47	61.612	115.719	71%
35	Landsat-7	ETM+	10	65	2006-01-01	15:18:03	55.858	120.948	6%
36	Landsat-7	ETM+	10	65	2006-02-02	15:18:18	55.476	109.102	10%
37	Landsat-7	ETM+	10	65	2006-02-18	15:18:22	56.175	99.912	11%
38	Landsat-7	ETM+	10	65	2006-04-23	15:18:19	54.059	56.540	1%
39	Landsat-7	ETM+	10	65	2006-05-09	15:18:22	51.673	49.581	4%
40	Landsat-7	ETM+	10	65	2006-05-25	15:18:22	49.320	45.367	0%
41	Landsat-7	ETM+	10	65	2006-08-29	15:17:55	55.091	62.312	76%
42	Landsat-7	ETM+	10	65	2006-09-14	15:17:50	58.666	71.374	52%
43	Landsat-7	ETM+	10	65	2006-09-30	15:17:43	61.572	82.761	41%
44	Landsat-7	ETM+	10	65	2006-11-17	15:18:15	61.337	117.054	61%
45	Landsat-7	ETM+	10	65	2006-12-03	15:18:24	59.129	121.925	48%
46	Landsat-7	ETM+	10	65	2007-02-21	15:18:45	56.379	98.143	1%
47	Landsat-7	ETM+	10	65	2007-05-12	15:18:41	51.303	48.584	6%
48	Landsat-7	ETM+	10	65	2007-05-28	15:18:34	49.005	44.828	2%
49	Landsat-7	ETM+	10	65	2007-11-04	15:18:19	62.788	109.832	34%
50	Landsat-7	ETM+	10	65	2007-11-20	15:18:28	61.005	118.228	32%
51	Landsat-7	ETM+	10	65	2007-12-22	15:18:38	56.809	122.616	24%
52	Landsat-7	ETM+	10	65	2008-02-08	15:18:36	55.721	106.154	18%
53	Landsat-5	TM	10	65	2008-04-20	15:17:29	54.314	58.005	5%
54	Landsat-5	TM	10	65	2008-05-06	15:17:03	51.907	50.712	22%
55	Landsat-7	ETM+	10	65	2008-11-06	15:17:20	62.319	111.437	40%
56	Landsat-7	ETM+	10	65	2008-12-08	15:17:44	58.228	122.533	1%
57	Landsat-7	ETM+	10	65	2009-03-14	15:18:27	57.036	83.048	19%
58	Landsat-7	ETM+	10	65	2009-04-15	15:18:39	55.174	60.795	30%
59	Landsat-7	ETM+	10	65	2009-05-17	15:18:44	50.552	46.951	3%
60	Landsat-7	ETM+	10	65	2009-09-22	15:18:26	60.545	76.805	61%
61	Landsat-7	ETM+	10	65	2009-10-08	15:18:19	62.833	89.260	65%
62	Landsat-7	ETM+	10	65	2010-04-02	15:20:30	56.848	69.118	9%
63	Landsat-7	ETM+	10	65	2010-07-23	15:20:31	48.720	48.138	48%
64	Landsat-7	ETM+	10	65	2010-10-11	15:20:38	63.647	91.490	12%
65	Landsat-7	ETM+	10	65	2011-05-07	15:21:54	52.790	49.459	27%
66	Landsat-7	ETM+	10	65	2011-06-08	15:21:54	48.431	42.851	47%
67	Landsat-7	ETM+	10	65	2011-08-27	15:21:41	55.488	60.358	72%
68	Landsat-7	ETM+	10	65	2011-09-28	15:21:32	62.278	80.557	70%
69	Landsat-7	ETM+	10	65	2011-12-01	15:22:02	60.345	122.275	14%

70	Landsat-7	ETM+	10	65	2012-01-02	15:22:18	56.795	121.543	58%
71	Landsat-7	ETM+	10	65	2012-07-28	15:23:13	49.979	49.011	63%
72	Landsat-7	ETM+	10	65	2012-08-13	15:23:25	52.913	54.276	67%
73	Landsat-7	ETM+	10	65	2012-11-01	15:24:08	64.478	109.115	39%
74	Landsat-7	ETM+	10	65	2012-12-19	15:24:25	58.394	123.940	53%

Tabla 3.1. Características de las imágenes Landsat utilizadas.

Las imágenes del sensor TM del satélite Landsat-5 y el sensor ETM+ del satélite Landsat-7 son imágenes multiespectrales, que tienen varias bandas y cada uno registra la radiación en un intervalo del espectro visible e infrarrojo, como se detalla en la Tabla 3.2. Los satélites Landsat orbitan alrededor de la Tierra en órbita circular heliosincrónica, a 705 km de altura, con una inclinación de 98.2° respecto al ecuador geográfico y un periodo orbital de 98.9 minutos.

Satélite	Sensor	Rango espectral μm	Bandas	Resolución de pixel (m)
L5	TM multiespectral	0.45-2.35	1, 2, 3, 4, 5 y 7	30
	TM térmico	10.40-12.50	6	120
L7	ETM+ multiespectral	0.45-2.35	1, 2, 3, 4, 5 y 7	30
	ETM+ térmico	10.40-12.50	6.1, 6.2	60
	Pancromática	0.52-0.90	8	15

Tabla 3.2 Características de Landsat-5 y Landsat-7(NASA, 2011).

Landsat-5, fue lanzada por la NASA el 1 de marzo 1984. Diseñado y construido al mismo tiempo que Landsat-4, cuenta con los instrumentos Multispectral Scanner System (MSS) y el Thematic Mapper (TM). El 21 de diciembre de 2012, el USGS anuncio la baja de Landsat-5 tras el fallo del giroscopio.

Landsat-7, fue lanzada con éxito el 15 de abril de 1999, desde Western Test Range of Vandenberg Air Force Base, California, del lanzador Delta-II. Cuenta con el sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+). El ETM+ incluye características adicionales que lo convierte en un instrumento más versátil y eficiente para el estudio del monitoreo y evaluación de la Tierra. Las imágenes Landsat-7 fueron perfectas hasta el 31 de mayo de 2003, hasta que falló el instrumento Scan Line Corrector (SLC). El SLC consiste en un par de

pequeños espejos que giran alrededor de un eje en tándem con el movimiento del ETM+ más el espejo principal de escaneo. El propósito de SLC es para compensar el movimiento del avance del satélite de manera que las exploraciones resultantes están alineados paralelos entre sí. El efecto de esta falla es que aproximadamente el 22% de los datos en una escena Landsat-7 falta cuando se adquieren sin SLC. Actualmente sigue proporcionando imágenes (NASA, 2011).

Los satélites Landsat-5 y Landsat-7 cuentan con una resolución temporal de 16 días y resolución radiométrica de 8 bits.

3.2.2. Imagen HRG-2 del satélite SPOT-5

Las imagen HRG-2 fue adquirida de la empresa “EKODES Consultores S.R.L” (representante en el Perú de las imágenes SPOT) de Nivel 1A solo con corrección por normalización CCD y sin corrección geométrica, en formato Dimap Geotiff con cuatro bandas. En la Tabla 3.3 se muestra las características de su resolución espacial y rango espectral.

Bandas	Resolución del pixel	Rango espectral
B1=XS1 (verde)	10m	0.50-0.59 μm
B2=XS2 (rojo)	10m	0.61-0.68 μm
B3=XS3 (Infrarrojo cercano)	10m	0.78-0.89 μm
B4=SWIR (Infrarrojo de onda corta)	20m	1.58-1.75 μm

Tabla 3.3 Características de la imagen HRG-2/SPOT-5 (*Spot Image*, 2002).

En la Figura 3.2 se muestra la imagen HRG-2 en combinación de falso color RGB-432 bandas-4, 3, 2 que se encuentra sin georreferenciar y su información se detalla en la Tabla 3.4.

imagen HRG-2 SPOT-5	
Fecha y hora	2009-02-20 / 15:43:00.1
Instrumento	HRG-2
Nivel de Procesamiento	L1A
Número de Bandas espectrales	4
Latitud central de la imagen	S6° 53' 5"
Longitud central de la imagen	W79° 30' 57"
Resolución Radiométrica	8 bits

Tabla 3.4 Información de la imagen HRG-2/SPOT-5 (*METADATA.DIM*).

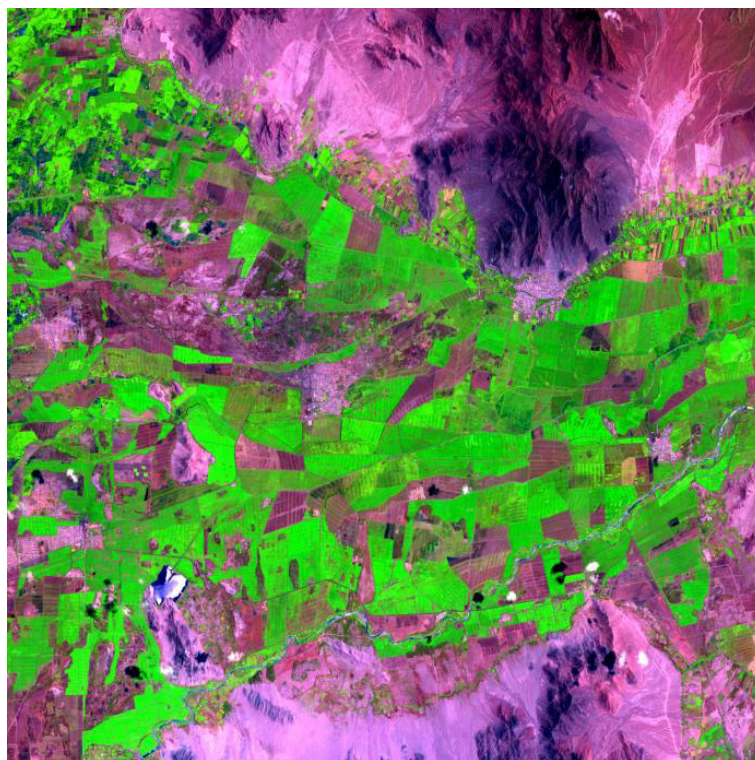


Figura 3.2. Composición de color RGB-432 de la Imagen HRG-2 de nivel 1A.

El sensor HRG-2 (High Resolution Geometric) a bordo del satélite SPOT-5 fue puesto en órbita el 3 de mayo 2002 con el objetivo de asegurar la continuidad del servicio a los usuarios de los datos SPOT. El satélite SPOT-5 se colocó sobre una órbita polar, circular, heliosincrónica y en fase con relación a la Tierra a una altitud de 832 km e inclinación de 98° grados, y con una resolución temporal de 26 días (*Spot Image*, 2002).

3.2.3. Imágenes GDEM ASTER versión-2

NASA (National Aeronautics and Space Administration) de Estados Unidos y METI (Ministry of Economy, Trade, and Industry) de Japón lanzaron la segunda versión del GDEM (Global Digital Elevation Model) ASTER versión 2 el 03 de octubre de 2011. Se genera a partir de los datos recogidos del sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) a bordo del satélite TERRA, donde la Tierra es observada desde un instrumento óptico del satélite. La versión 2 tiene la misma estructura de grillado y de mosaico (Tile) que la versión 1, pero la versión 2 del GDEM ASTER se desarrolló, utilizando un algoritmo avanzado para mejorar la resolución y exactitud de la elevación del DEM, se generó de un total de 1.5 millones de datos recogidos de

ASTER, incluyendo 250 000 escenas adicionales adquiridos después de la versión 1 (*Cook et al.*, 2012). La precisión de esta última versión es validada por el esfuerzo de la colaboración entre Japón y Estados Unidos, que muestra mejoras significativas respecto a la versión 1. El GDEM ASTER versión 2 fue lanzado oficialmente como una actualización a la versión 1, el 17 de octubre de 2011, puesta a disposición para la comunidad científica en la página web <http://gdem.ersdac.ispacesystems.or.jp/> [acceso 6 de Abril 2014]. Estos datos descargados contienen el Archivo “Dem” y el “Num” o archivo QA (Quality Assessment), donde el archivo “Dem” representa al modelo de elevación digital y el “Num” es el archivo de garantía de calidad que indica que tipo de información se utilizó en las zonas de cobertura de nubes o anomalías que son reemplazados por otras fuente (*Arefi and Reinartz*, 2011). A continuación se muestra las características del GDEM ASTER versión 2 en la Tabla 3.5.

GDEM ASTER versión-2	
Tamaño de mosaico (Tile Size)	3601 × 3601 (1° × 1°).
Tamaño del pixel	1 Arc-Segundo (30 m × 30 m).
Sistema de coordenadas geográficas	Latitud / Longitud.
Formato se salida DEM	GeoTIFF, valores de pixel de 16 bits, en unidades de metros la vertical referenciado al geoide WGS84.
Valores espaciales de ND	-9999 para píxeles vacíos, y 0 para el cuerpo de agua de mar.
Cobertura	Norte 83° a Sur 83° / Oeste 180° a Este 180°.

Tabla 3.5. Características del GDEM ASTER versión-2 (*Athmania and Achour*, 2014).

3.2.3.1. GDEM ASTER generados a partir de imágenes del sensor ASTER

La capacidad de ASTER para construir DEM está basada en el principio geométrico de Pitágoras y en el principio fotogramétricos que ha sido comprendido y usado rutinariamente en imágenes aéreas durante más de 50 años (*Cuartero*, 2003).

La relación entre la elevación de un punto y la paralaje de dicho punto en el par estereoscópico es proporcional a la relación *Base/Altura* de la toma, dicha relación es aplicada para el cálculo de la elevación en cada punto. En la Figura

3.3 se muestra el esquema de medición de la elevación de un determinado punto a partir de la diferencia de paralaje (Δp) en un estéreopar de ASTER. Además, la elevación del punto, Δh , se relaciona con el ángulo α y el intervalo de tiempo (Dt) necesario para registrar la parte superior y fondo del objeto (Cuartero, 2003).

Para extraer la elevación a partir de los datos estereoscópicos de TERRA-ASTER se utilizan las bandas 3N y 3B de las imágenes ASTER. Estas bandas toman datos en el IR próximo, lo cual es una novedad respecto a los métodos más tradicionales que usan imágenes pancromáticas en el espectro visible.

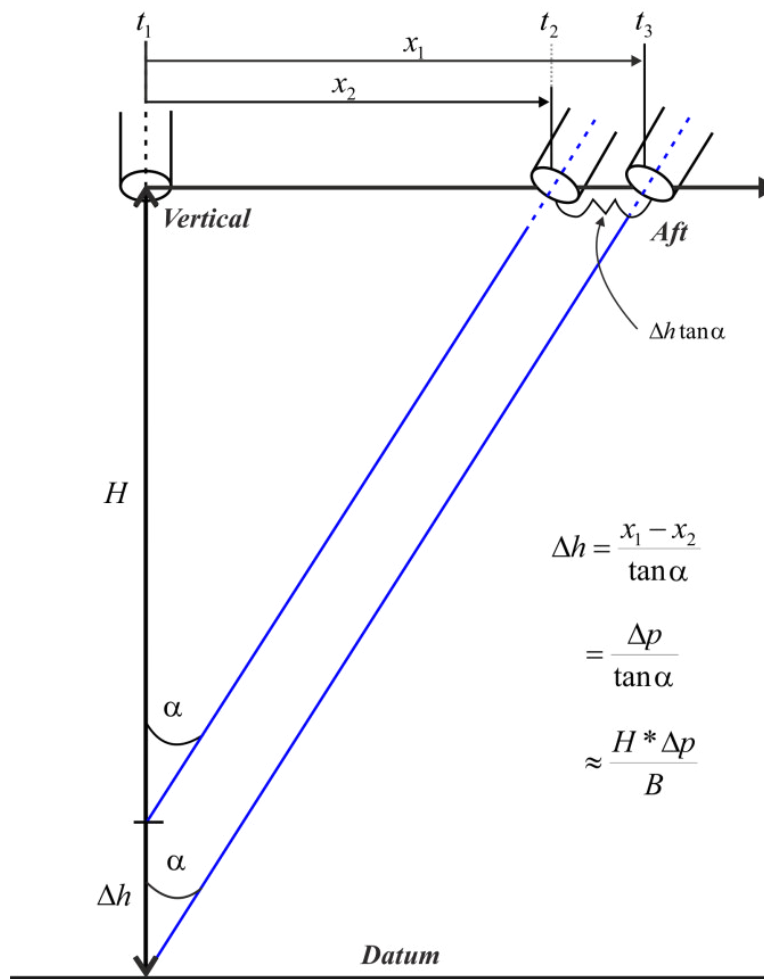


Figura 3.3. Esquema de medición de la elevación (Δh), base (B) = x_1 , Dt : representa por $(x_1 - x_2) = \Delta p$ (Lang and Welch, 1999).

El dato utilizado de la imagen GDEM ASTER se muestra en la Figura 3.4 que cubre el área de estudio. Con proyección: Geográfica Lat/Lon, datum: WGS84 y tamaño de pixel: 0,000278 grados ($30\text{ m} \times 30\text{ m}$).

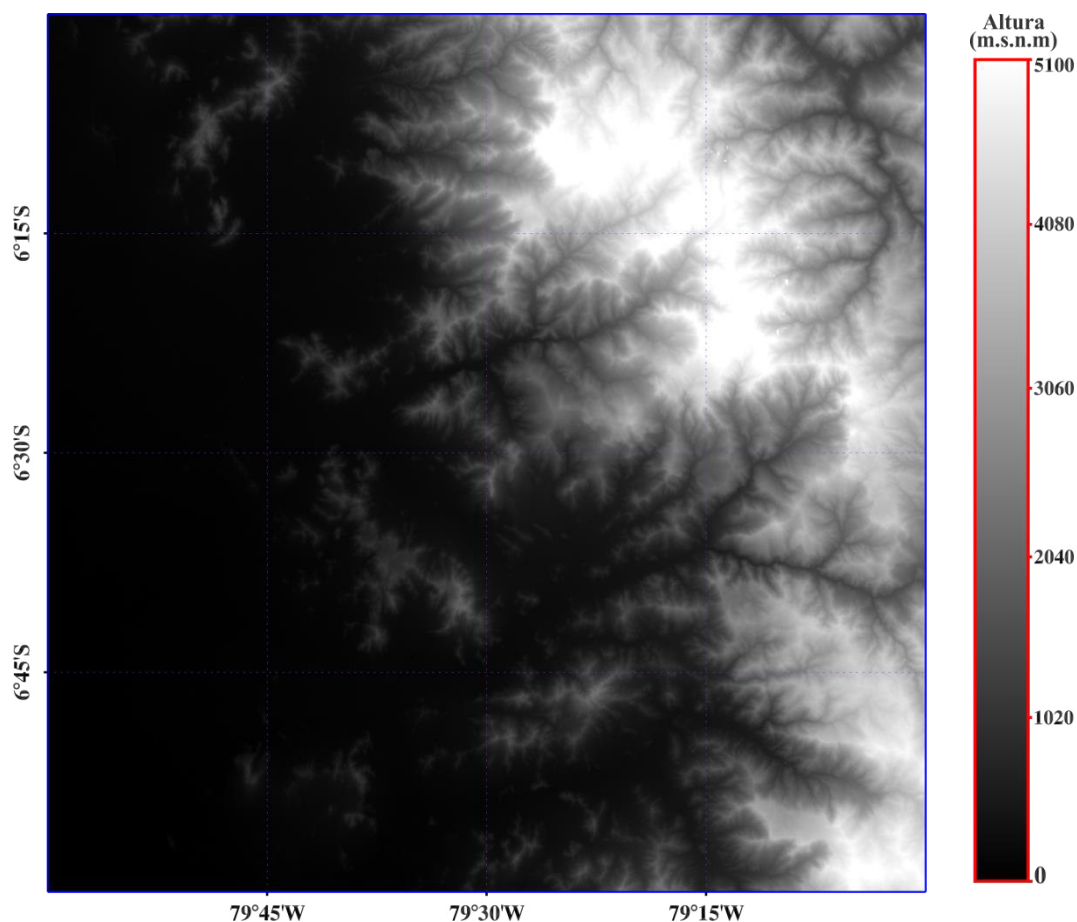


Figura 3.4. Imagen GDEM ASTER, perteneciente a la escena S07W080.

3.2.4. Software web GIOVANNI

GIOVANNI (“Geospatial Interactive Online Visualization ANd aNalysis Infrastructure”) es una aplicación sobre la web que proporciona un método simple e intuitivo de visualizar, analizar y acceder a productos incluidos en distintas áreas temáticas de las ciencias de la Tierra, obtenidos mediante teledetección. En definitiva, es una plataforma online auspiciada por NASA, a través de la cual se puede acceder a estos productos de un modo gratuito.

La página web principal del GIOVANNI (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni> [acceso 7 de Abril 2014]) se dispone en cinco portales. Cada uno engloba diferentes interfaces para la visualización y análisis de productos (también llamadas instancias). Los cinco portales son: “Portal Atmosférico”, “Portal de Educación y Aplicaciones”, “Portal Meteorológico”, “Portal Oceánica”, “Portal Hidrología” (*Manual de uso Giovanni Online*, 2014)

3.2.4.1. Resoluciones de los datos de GIOVANNI

Existen varios niveles de resolución espacial de los datos de GIOVANNI: la alta resolución espacial comprende un área de $250m \times 250m$, $500m \times 500m$, $1km \times 1km$ o $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ (por ejemplo “MODIS True Color Imagery”, RGBs); la resolución espacial moderada identifica área de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (por ejemplo productos de OMI); finalmente, la resolución derivada de promedios espaciales que tiene gran parte de los productos en GIOVANNI es de $1^\circ \times 1^\circ$ (por ejemplo la temperatura superficial del aire de AIRS) (Reyes, 2010).

3.2.4.2. Niveles de procesamiento de los datos GIOVANNI

Existen varios niveles de procesamiento de datos: el Nivel 1, constituido por los datos de radiancia medidos sin calibrar (1A) y radiancias calibradas (1B). El Nivel 2, constituido por los datos de variables geofísicas derivadas, con la misma resolución y localización que la fuente de datos en el Nivel 1 (después de haber aplicado correcciones atmosféricas, etc.). El Nivel 2G, constituido por datos rasterizados en mapas sobre celdillas de espacio y tiempo uniforme. El Nivel 3, constituido por variables geofísicas representadas en mapas de celdillas de espacio y tiempo uniformes, con resoluciones de derivados espaciales y/o temporales (por ejemplo datos de lluvia acumulada con resolución espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ y temporal de 3 horas) (Reyes, 2010).

3.2.4.3. Datos productos de GIOVANNI utilizado

Los datos productos utilizados de GIOVANNI fueron del “Portal Atmosférico” de Nivel 3 y de resolución espacial de $1^\circ \times 1^\circ$, para realizar la corrección atmosférica SMAC para la imagen del sensor HRG-2 del satélite SPOT-5, para obtener otros productos. Los productos utilizados fueron los siguientes:

a. Ozono.- Los datos productos de ozono, accesibles desde GIOVANNI se adquirió a través del siguiente instrumento: OMI/Aura (Aura OMI Level 3) -> columna total de ozono (Column Amount Ozone).

b. Vapor de agua atmosférico.- Los productos relativos a vapor de agua atmosférico, disponibles en GIOVANNI, se efectúan a partir de los siguientes

instrumentos: MODIS/Terra y Aqua (Terra and Aqua MODIS: Monthly) -> Columna Total de Vapor de Agua (Water Vapor Clear Sky (QA-w, NIR).

c. Espesor óptico.- Para obtener el espesor óptico se utilizaron, los productos relativos a Aerosoles atmosférico, disponibles en GIOVANNI, del siguiente instrumento: MODIS/Terra y Aqua (Terra and Aqua MODIS: Monthly) -> MODIS/Terra (Aerosol Optical Depth at 550 nm).

3.3. Datos de campo

3.3.1. Datos de conductividad eléctrica del suelo

Los datos in-situ de conductividad eléctrica (CE) del suelo fueron proporcionados por el Gerente de Campo de la Empresa Agroindustrial Pomalca S.A.A (*Fernández and Pérez, 2012*), en Microsoft Excel un total de 1108 datos de CE del suelo. El archivo Excel además de la CE, contiene información de cada muestra tomada la textura, pH, su coordenada (WGS84), relación de suelo-agua (1:1) y su respectiva fecha de toma. La Tabla 3.6 muestra la cantidad de muestras tomadas (E. A. Pomalca) por mes en los años de 2008 y 2009. La publicación del total de datos no está permitida por la Empresa.

La Figura 3.5 muestra la ubicación de las muestras de campo tomadas por mes en las áreas de cultivo de la Empresa Agroindustrial Pomalca S.A.A.

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2008	0	15	54	50	56	63	53	69	78	66	69	31
2009	55	60	76	57	51	90	58	57	0	0	0	0

Tabla 3.6 Número de muestras de campo tomadas por mes.

a. Obtención de muestras de suelo en campo.

Información proporcionada por el Gerente de Campo de la Empresa Agroindustrial Pomalca *Fernández and Pérez (2012)*.

1. Se ubicaron puntos de muestreo dentro de las parcelas de los cultivos de caña de azúcar los que fueron debidamente georreferenciados con la ayuda de un GPS en el sistema WGS 84, luego se procedió a la extracción de las muestras de suelo de 0.0 – 0.50 m. aproximadamente

de profundidad, con un peso aproximadamente de 2 kilogramos por muestra.

2. Luego fue trasladado al laboratorio de suelos, de la Empresa Agroindustrial Pomalca S.A.A en donde se determinaron la conductividad eléctrica del suelo de cada muestra y guardados en una hoja de cálculo Microsoft Excel.

b. Procedimientos para medir la conductividad eléctrica de las muestras de suelo en laboratorio.

Para medir la conductividad eléctrica del suelo, el personal de la E. A. Pomalca, realizaron los siguientes procedimientos, según *Fernández and Perez (2012)*:

1. Secado: las muestras son sacadas de su contenedor y tendidas en la intemperie durante varios días.
2. Una vez seco el material se desmenuza, deshaciendo los gránulos de suelo con la ayuda de un mortero hasta obtener un material de aspecto homogéneo.
3. Tamizado: las muestras se hacen pasar a través de un tamiz de 10 mm. de luz, de esta manera se separan la grava, piedras, etc.
4. Las muestras tamizadas se recogen en nuevas bolsas plásticas por separado cada una debidamente etiquetadas.
5. En laboratorio de suelos se utiliza la relación 1:1 (1 de suelo: 1 de agua destilada). Estos dos componentes en un vaso de precipitados es agitado con un agitador mecánico durante 30 minutos para que se equilibre la solución (o 5 minutos en agitador magnético).
6. Se deja en reposo durante unos minutos, para luego filtrar a través de un papel de filtro a otro vaso de precipitados.
7. Antes de usar el medidor de la conductividad eléctrica (conductímetro) se debe calibrar con una solución estándar.
8. Finalmente a una temperatura estándar de 25°C es medida la CE de la solución electrolítica de la muestra del suelo con el conductímetro, introduciendo el electrodo del conductímetro en el vaso de precipitados.

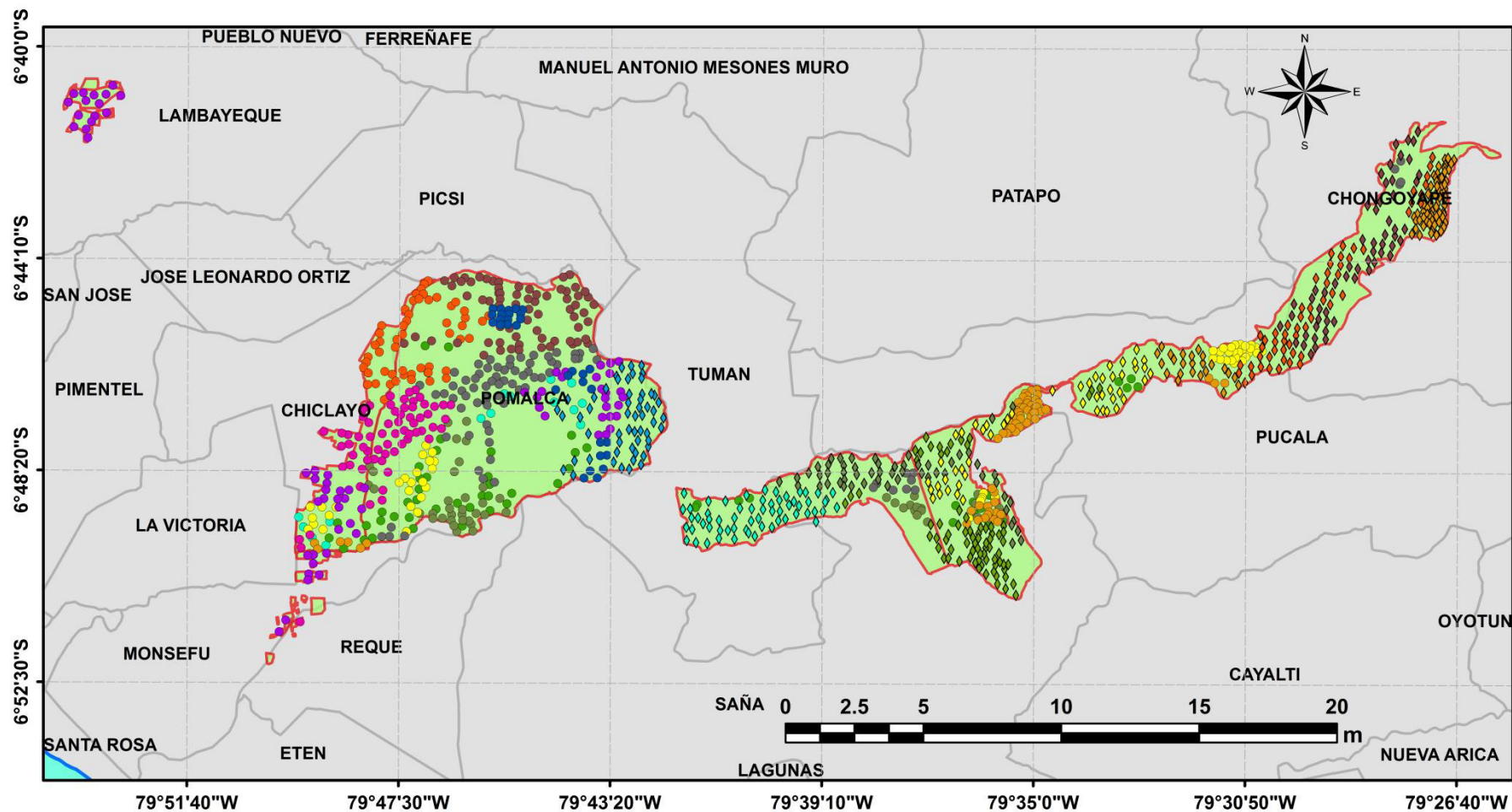


Figura 3.5. Ubicación de las muestras de suelo tomadas en los años 2008 y 2009.

Pre-Procesamiento de Imágenes

A las imágenes de teledetección es necesario realizar la corrección de los efectos sistemáticos o características indeseables del sensor, con el fin de extraer información fiable. Los usuarios que obtengan los datos de nivel 1 de costo u otras razones se deben hacer correcciones y calibración según sea necesario para su aplicación. Las Correcciones típicas incluyen la reducción de la segmentación del detector u otro ruido, rectificación geométrica, y varios niveles de calibración radiométrica. Estos temas se basan en los modelos y técnicas de procesamiento de imágenes.

4.1. Imagen HRG-2 del satélite SPOT-5

4.1.1. Corrección geométrica

El modelo de corrección geométrica realizada a la imagen del sensor HRG-2 del satélite SPOT-5 es la ortorectificación, para realizar este proceso se utilizó un modelo de elevación digital (DEM) y el Software ENVI 4.5.

4.1.1.1. Modelo de elevación digital (DEM)

Conceptualmente, un modelo de elevación digital es una estructura (informática) de datos numéricos que representa la distribución espacial de la altura de la superficie del terreno. Un terreno real puede describirse de forma genérica como una función bivariable continua $z = \xi(x, y)$ sin discontinuidades verticales, donde z representa la altitud del terreno en el punto de coordenada (x, y) y ξ es una función que relaciona la variable con su localización geográfica. En un modelo de elevaciones digital la función se aplica sobre un dominio espacial concreto, D . En consecuencia, un DEM puede describirse genéricamente como $DEM = (D, \xi)$. En la práctica, la función no es continua sino se resuelve a intervalos discretos, por lo que el DEM está compuesto por un conjunto finito y explícito de elementos. Esta generalización implica una pérdida de información que incrementa el error del DEM y, en consecuencia, se propaga a los modelos derivados que se construyan a partir de él (*Felicísimo*, 1994).

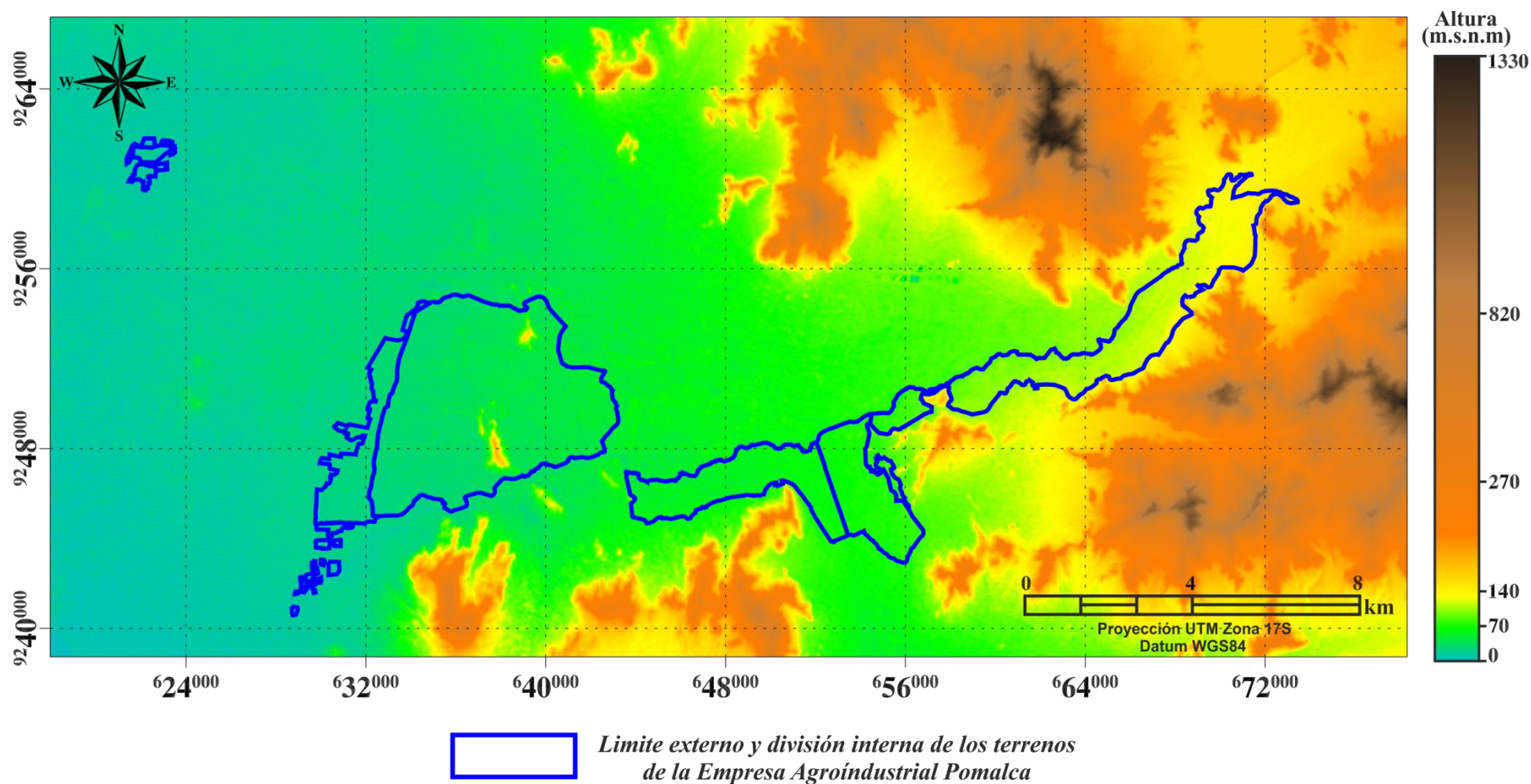


Figura 4.1. Modelo de elevación digital de los terrenos de la Empresa Agroindustrial Pomalca a partir de GEDEM ASTER (resolución espacial de $30\text{ m} \times 30\text{ m}$). Proyección UTM (coordenadas en metros), zona 17S, Datum WGS84.

4.1.1.2. Ortorectificación de la imagen HRG-2 del satélite SPOT-5

La imagen HRG-2 de nivel de procesamiento 1A es ortorectificada utilizando el modelo de elevación digital (DEM) de GDEM ASTER obtenida de la página web (<http://gdem.ersdac.ispacesystems.or.jp/> [Acceso: 2 de junio 2014]), con una resolución espacial de $30m \times 30m$, la escena utilizada es S07W080 (Figura 3.4) a la cual se realiza un corte del área de interés utilizando el Software ENVI 4.5, como se ilustra en la Figura 4.1. Para el proceso de la ortorectificación se ingresa los siguientes parámetros en la ventana de nombre “Orthorectification Parameters” del Software ENVI 4.5 como se muestra en la Figura 4.2:

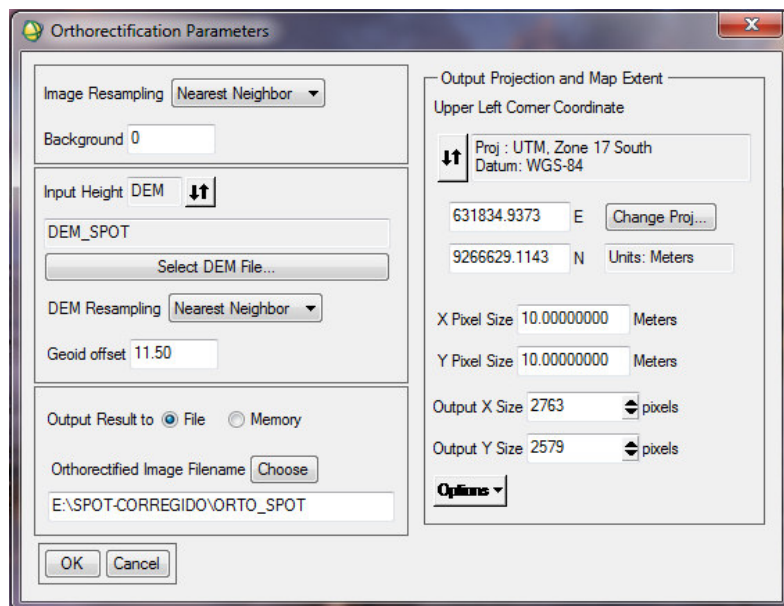


Figura 4.2. Ventana del ENVI para el proceso de ortorectificación de la imagen HRG-2.

- Método de remuestreo de la imagen: Vecino más cercano.
- Background (Fondo de la imagen): 0.
- Ingreso del modelo digital de elevación (GDEM ASTER): DEM_SPOT.
- Método de remuestreo para el DEM: Vecino más cercano.
- Geoid offset: Ondulación geoidal promedio de la zona de estudio, se calculó utilizando la latitud = -6.8847 y longitud = -79.5158 (centro de la imagen HRG-2) y estos valores se introdujeron al Software NIMA EGM96 Calculator [Versión 1.0]. Cuyo resultado fue de 11.5 m [Calculado: 10/06/ 2014].
- Nombre del archivo de salida: ORTO_SPOT

Las imágenes resultantes del proceso de ortorectificación se proyectaron al sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM) zona 17S con datum y elipsoide WGS 84.

Como resultado final del proceso de ortorectificación de la imagen HRG-2 se ilustra en la Figura 4.3.

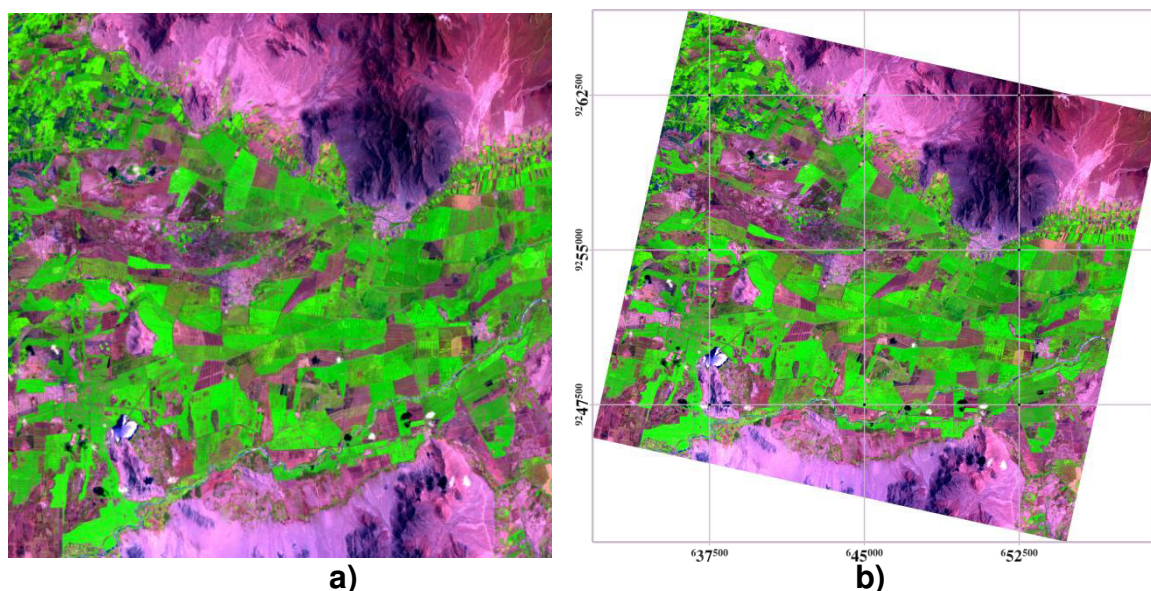


Figura 4.3. Composición de color RGB – 432, **a)** Imagen original y **b)** imagen ortorectificada.

4.1.2. Corrección radiométrica

La corrección radiométrica de las imágenes de satélite, busca evitar errores o distorsiones radiométricas debido a las diferencias en la sensibilidad de los sensores. Cuando la energía electromagnética emitida o reflejada es observada por el sensor, la energía observada no coincide con la energía emitida o reflejada del mismo objeto observado de una distancia corta. Esto es debido a la elevación del Sol, a la respuesta del sensor que influyen la energía observada, etc. Por lo tanto, para obtener valores de radiancia y reflectancia planetaria, esas distorsiones radiométricas deben ser corregidas. Así la corrección radiométrica es clasificada en cuatro tipos (*Chander et al.*, 2009):

- Corrección radiométrica por efecto de sensibilidad del sensor.
En el caso de los sensores ópticos, es tratada con el uso de una lente, las esquinas de un área serán más oscuras con respecto al área central.

A esto se le llama “vignetting”, y se puede expresar por el $\cos \theta$, donde θ es el ángulo de un rayo con respecto al eje óptico. n es dependiente de las características de la lente, aunque n se toma generalmente como 4. En el caso de los sensores electro-ópticos, los datos medidos de la calibración entre la irradiancia y la señal de salida del sensor, pueden ser utilizados para la corrección radiométrica.

- Corrección radiométrica por el ángulo del Sol.

La radiación solar se reflejará difusamente sobre la superficie de la Tierra, que dará como resultado áreas más iluminadas en una imagen. A esto se le llama “Sun spot”. El “Sun spot” junto con los efectos “vignetting” pueden ser corregidos por la estimación de una curva de calibración (*Dimap Dictionary*, 2006).

- Corrección radiométrica por la topografía

El efecto de sombra debido al relieve topográfico puede ser corregido utilizando el ángulo entre la dirección de la radiación solar y la normal a la superficie de la Tierra.

- Corrección atmosférica.

La radiación solar es absorbida o scattered por la atmósfera durante su transmisión a la superficie de la Tierra, mientras que la radiación emitida o reflejada por el objeto de interés también es absorbida o scattered por la atmósfera antes de que sea captada por el sensor. Un sensor recibirá no sólo la radiación directamente reflejada o emitida de un objeto de interés, sino también la radiación scattered del objeto de interés y la radiación scattered de la atmósfera. Así la corrección atmosférica es utilizada para remover estos efectos.

4.1.2.1. Conversión de números digitales (ND) a radiancia espectral

Consiste en la conversión de números digitales a radiancia espectral, para lo cual requiere la información del “Gain” y “Bias” del sensor en cada banda. Esta transformación se basa en una curva de calibración de números digitales a radiancia, calculada por los sistemas de operación del satélite (*Chander et al.*, 2009).

$$L_{\lambda} = (Gain * ND) + Bias \quad (4.1)$$

La ecuación general de la calibración está dada por la expresión (4.1). Sin embargo para el caso del SPOT-5, la ecuación (4.1), la cual permite convertir valores digitales a radiancia espectral para cada pixel se transforma en la ecuación (4.2) (*Dimap Dictionary*, 2006).

El valor del $1/Gain$ representa la pendiente de la recta de calibración que se muestra en la Figura 4.4 mientras que el *Bias* define la radiancia espectral del sensor para un valor de ND igual a cero.

$$L_{\lambda} = \left(\frac{ND}{Gain} \right) + Bias \quad (4.2)$$

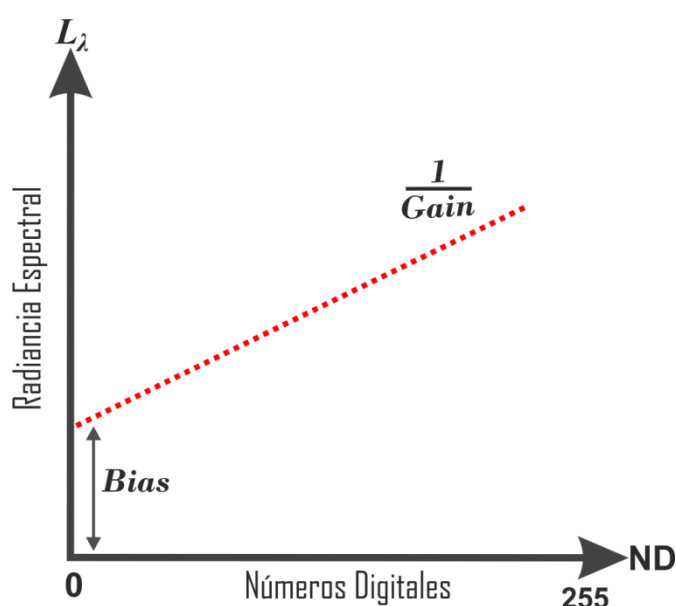


Figura 4.4. Representación gráfica de L_{λ} vs ND en SPOT-5.

donde L_{λ} es la radiancia espectral en la abertura del sensor ($W/(m^2 sr \mu m)$), ND son los números digitales de entrada para la banda considerada (0 a 255), Gain y Bias son los valores de calibración absoluta para cada banda que se muestra en la Tabla 4.1.

Bandas	Bias ($W/(m^2 sr \mu m)$)/ND	Gain $W/(m^2 sr \mu m)$
XS1 (verde)	0.000	2.049724
XS2 (rojo)	0.000	2.209176
XS3 (Infrarrojo cercano)	0.000	1.284000
SWIR (Infrarrojo de onda corta)	0.000	8.170710

Tabla 4.1. Valores de Bias y Gain para HRG-2/SPOT-5 (*METADATA.DIM*).

Para la conversión de los números digitales a valores de radiancia espectral se desarrolló un programa en IDL utilizando la ecuación (4.2), cuyo nombre de archivo es ND_A_RADIANCIA.PRO que se encuentra en el Anexo B (Programa B.1), este programa se utilizó para las cuatro bandas de la imagen HRG-2. Como resultado final se visualiza en la Figura 4.5.

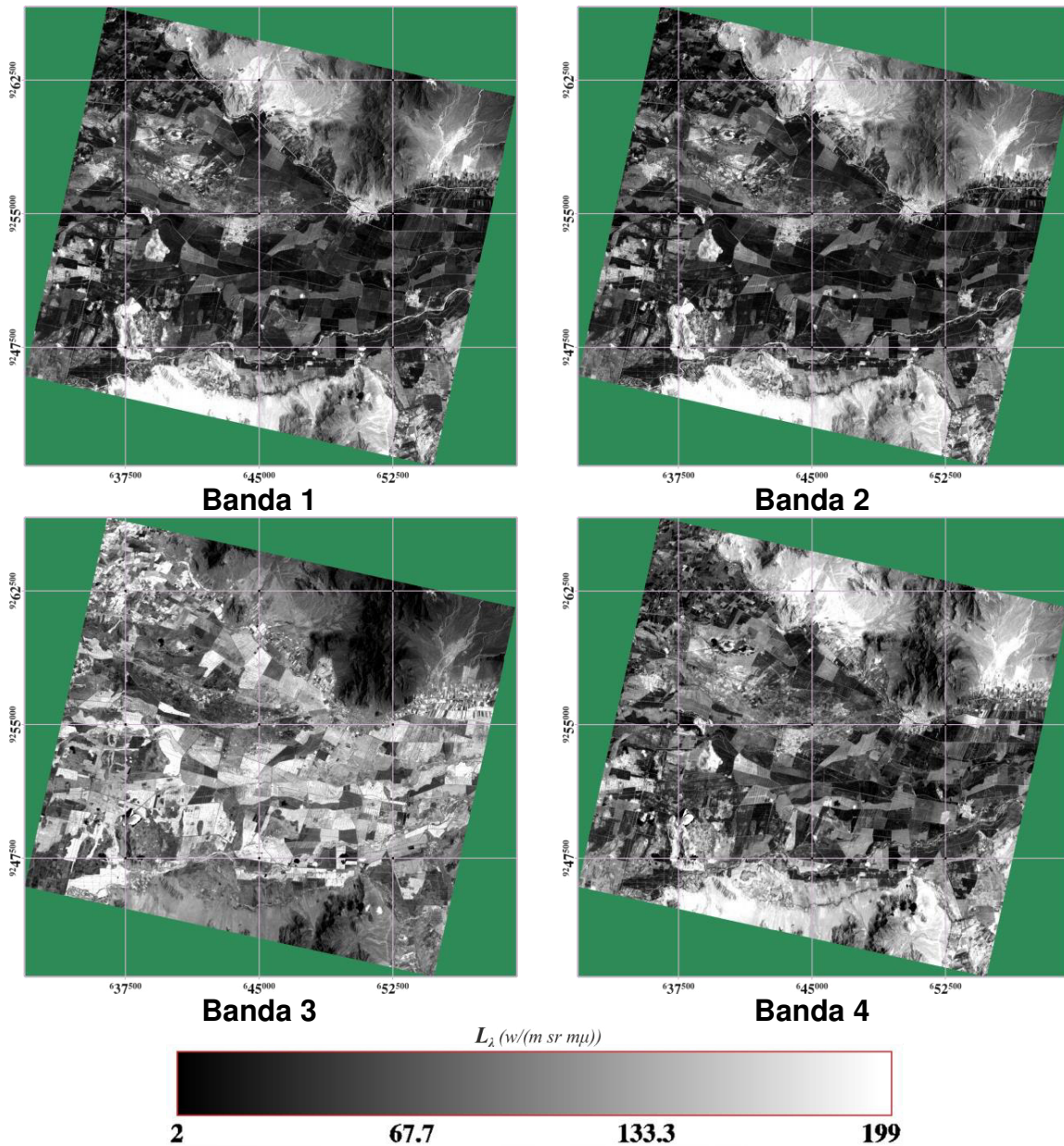


Figura 4.5. Radiancia espectral (L_{λ}) registrada por el sensor HRG-2, para las cuatro bandas; L_{λ} esta expresada en ($W/(m^2 sr \mu m)$). Proyección UTM coordenadas en metros.

4.1.2.2. Conversión de radiancia espectral a reflectividad en el techo de la atmósfera, Top Of the Atmosphere (TOA)

Una segunda magnitud física es el de obtener la denominada reflectividad aparente o reflectividad al nivel del sensor, llamada también reflectividad en el techo de la atmósfera o reflectividad planetaria. Este valor engloba la reflectividad de la superficie y la de la atmósfera, es adimensional y cuyos valores se encuentran entre 0 y 1, es descrita según la ecuación (4.3) (*Hill and Aifodopoulou*, 1990).

$$\rho_{\lambda} = \rho_{TOA} = \frac{\pi L_{\lambda} d^2}{ESUN_{\lambda} \cos \theta_s} \quad (4.3)$$

donde ρ_{TOA} es la reflectividad TOA (adimensional), d es la distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas (1UA) se calcula bajo la ecuación $d = (1 - 0.01672 \cos(RADIAN(0.9856(d_n - 4))))$, d_n es el día del año, L_{λ} es la radiancia espectral de cada banda a su longitud de onda en unidades ($W/(m^2 sr \mu m)$), $ESUN_{\lambda}$ es la irradiancia solar exoatmosférica medida en ($W/(m^2 \mu m)$), la Tabla 4.2 muestra los valores de $ESUN_{\lambda}$ para cada banda, θ_s es el ángulo cenit del Sol (en radianes) $\theta_s = (90 - \theta_e) \frac{\pi}{180}$, θ_e es el ángulo de elevación (adquirido de la METADATA.DIM).

BANDAS	$ESUN_{\lambda}$, para HRG-2 SPOT-5 ($W/(m^2 \mu m)$)
XS1 (verde)	1858
XS2 (rojo)	1575
XS3 (Infrarrojo cercano)	1047
SWIR (Infrarrojo de onda corta)	234

Tabla 4.2. Valores de la irradiancia solar exoatmosférica para HRG-2 (METADATA.DIM).

Para obtener la reflectancia aparente se desarrolló un programa en IDL utilizando la ecuación (4.3), cuyo nombre de archivo es RADIANCIA_A_TOA.PRO que se encuentra en el Anexo B (Programa B.2). Este programa se utilizó para las cuatro bandas de la imagen HRG-2. El resultado final, se visualiza en la Figura 4.6 y su estadística en la Tabla 4.3.

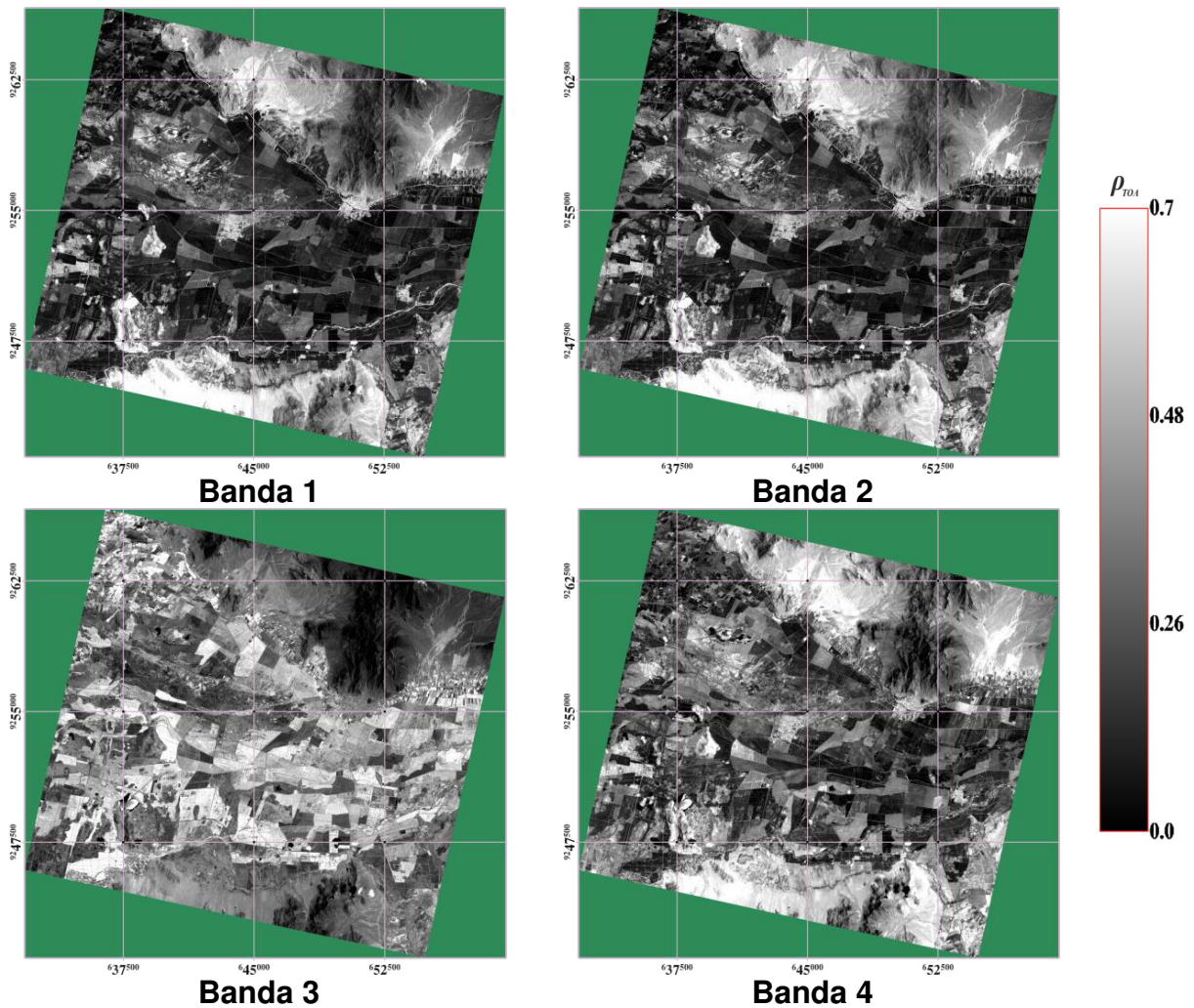


Figura 4.6. Reflectancia en la cima de la atmosfera (ρ_{TOA}), para las 4 bandas de la imagen HRG-2. Con unidad adimensional.

BANDAS	Mínimo	Máximo	Media	Desviación Estándar
Banda 1	0.057	0.231	0.109	0.027
Banda 2	0.040	0.253	0.105	0.039
Banda 3	0.041	0.655	0.195	0.052
Banda 4	0.043	0.460	0.181	0.044

Tabla 4.3. Estadística de la reflectancia TOA para las 4 bandas de HRG-2.

4.1.2.3. Corrección atmosférica usando SMAC

El modelo de corrección atmosférica denominado “Simplified Method for the Atmospheric Correction” (SMAC) es un modelo que describe la transferencia radiativa en la atmosfera que fue desarrollado por *Rahman y Dedieu* (1994). Este modelo consiste en determinar la relación entre la reflectancia estimada

en la cima de la atmosfera y la reflectancia estimada en la superficie del suelo, utilizando un conjunto de ecuaciones matemáticas con coeficientes, que se determinan en función de las bandas espectrales del modelo del sensor y aerosoles.

Los datos que se requiere para ejecutar el algoritmo SMAC son: espesor óptico del aerosol, la concentración de ozono, la columna de vapor de agua, presión superficial, archivos de coeficiente del sensor HRG-2 del satélite SPOT-5 y los ángulos (cenit sensor, cenit solar, acimut solar y acimut sensor). Las diversas fuentes y métodos utilizados para estimar estos datos, se describen a continuación.

4.1.2.3.1. Ángulos para el algoritmo SMAC

En la METADATA.DIM de la imagen del sensor HRG-2 del satélite SPOT-5, se encuentra las siguientes informaciones con respecto a los ángulos.

- ❖ Ángulo de incidencia (<INCIDENCE_ANGLE>): L 20.678864 en grados.
- ❖ Ángulo de visión (<VIEWING_ANGLE>): 18.222885 en grados.
- ❖ Ángulo acimut solar (<SUN_AZIMUTH>): 101.238012 en grados.
- ❖ Ángulo de elevación solar (<SUN_ELEVATION>): 62.769764 en grados.
- ❖ Ángulo de orientación: 12.230340 en grados.

La Tabla 4.4 muestra los ángulos que requiere el algoritmo SMAC

Detalle de los ángulos	
Fecha de la Imagen	2009-02-20
Tiempo Local	15:43:001
θ_v	L20.678864°
ϕ_v^a	282.230340°
θ_s^b	27.230236°
ϕ_s	101.238012°
ϕ_r^c	180.992328°

Tabla 4.4. Detalle de los ángulos de la imagen HRG-2.

donde θ_v es el ángulo de incidencia vista del sensor (ángulo cenit del sensor), θ_s es el ángulo cenit del Sol, ϕ_s es el ángulo acimut del Sol, ϕ_v es el ángulo acimut del sensor y ϕ_r es el Acimut relativo.

^aEl ángulo acimut del sensor es calculado con el ángulo de orientación + 90° para la derecha (R) (negativo, este) vista fuera del nadir y el ángulo de orientación + 270° para la izquierda (L) (positivo, oeste) vista fuera del nadir.

^bEl ángulo cenit del Sol es determinado 90°- el ángulo elevación del Sol.

^cEl ángulo Acimut relativo es determinado entre la diferencia del ángulo acimut del sensor y el ángulo acimut del Sol (*Forrester*, 2010).

4.1.2.3.2. Condiciones Atmosféricas para el Algoritmo SMAC

Para el algoritmo SMAC se necesita conocer la concentración de la cantidad de vapor de agua (H_2O_{atm}), ozono (O_3), espesor óptico a 550nm (τ_{550}) y presión sobre el suelo (hPa), que dependen de la ubicación y el tiempo.

Para cuyo fin se utiliza los datos productos del software web GIOVANNI (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni> [Acceso: 15 de Febrero 2014]). La región geográfica que engloba a la imagen del sensor HRG-2 del satélite SPOT-5 corresponde a la latitud (6N, 7S) y longitud (80W, 79E), luego se calcula la serie temporal de promedios mensual de la región asignada, dando como resultado en la Tabla 4.5 para el mes de Febrero del año 2009.

Parámetro	Valor
Ozono durante condiciones de verano en latitudes medias O_3	0.237 <i>cm. atm</i>
Vapor de agua medida en verano H_2O_{atm}	4.354 <i>g. cm⁻²</i>
Espesor óptico a 550 <i>nm</i> (τ_{550})	0.288
Presión sobre el suelo (<i>hPa</i>)	1013.25

Tabla 4.5. Condiciones atmosféricas para el algoritmo SMAC.

Los archivos de coeficientes del sensor HRG-2 del satélite SPOT-5 fueron descargados de la página web (<http://www.cesbio.ups-tlse.fr/us/serveurs4.htm> [Acceso: 5 de Enero 2014]) para todas las bandas. Estos coeficientes se encuentran en extensión *.DAT y está dado para cada tipo de atmósfera.

Parámetros de ingreso que requiere el algoritmo SMAC:

- Imagen de reflectancia en el techo de la atmosfera (TOA)
- Ángulo cenit sensor
- Ángulo cenit solar

- Ángulo acimut solar
- Ángulo acimut sensor
- Contenido de Ozono
- Contenido de vapor de agua
- Espesor óptico
- Presión sobre el suelo
- Coeficientes del sensor HRG-2 del satélite SPOT-5.

Estos parámetros fueron ingresados al algoritmo SMAC implementada en el lenguaje de programación IDL, cuyo nombre de archivo es TOA_A_REFLECTANCIA_SUPERFICIE.PRO que se encuentra en el Anexo B (Programa B.3), este programa se utilizó para las cuatro bandas de la imagen HRG-2. El resultado final se visualiza en la Figura 4.7.

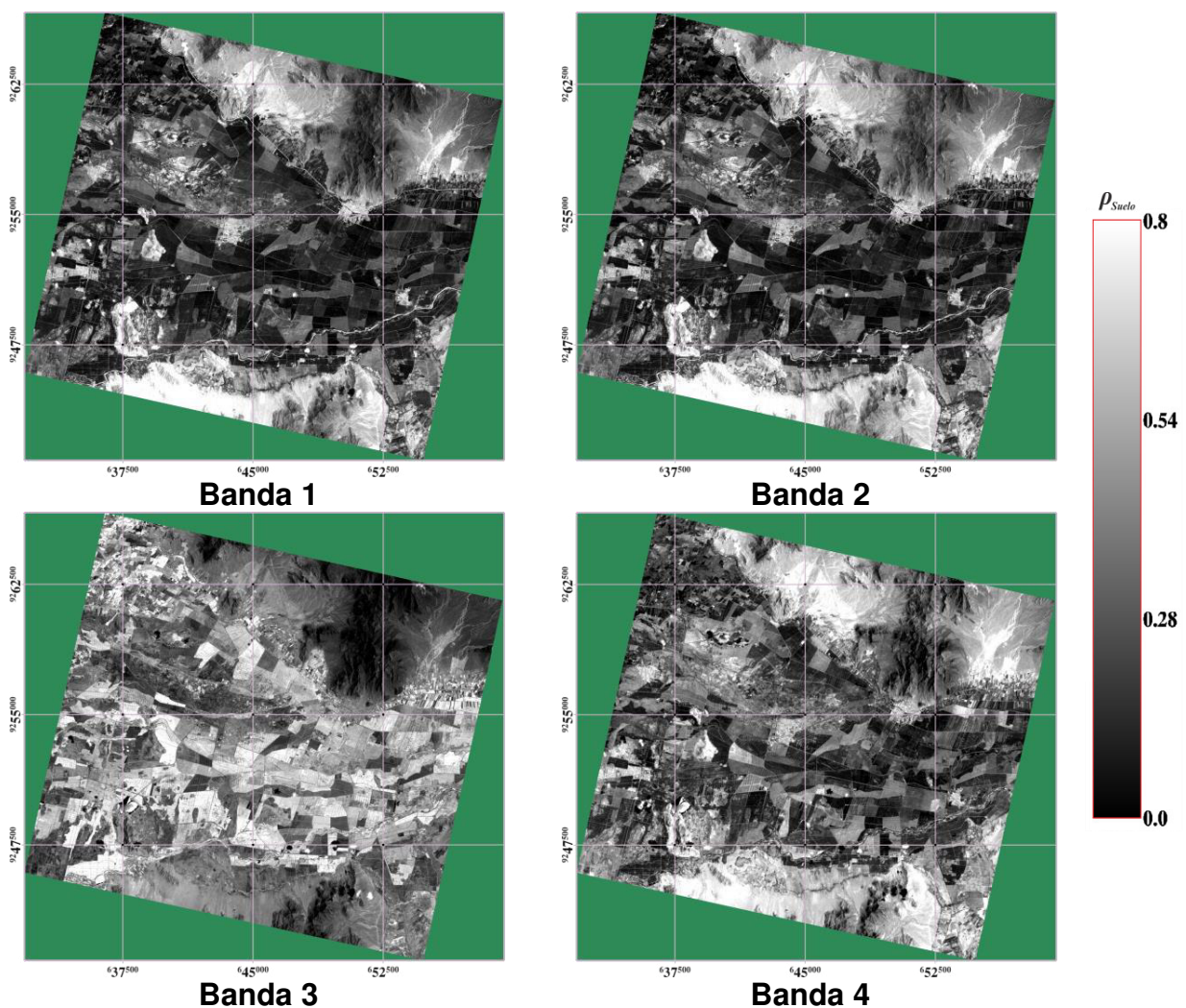


Figura 4.7. Reflectancia de la superficie (ρ_{suelo}) de las Imágenes HRG-2 usando el algoritmo SMAC. Con unidad adimensional.

La Tabla 4.6 muestra la estadística de la reflectancia de la superficie para las cuatro bandas de la imagen HRG-2 del satélite SPOT-5.

BANDAS	Mínimo	Máximo	Media	Desviación Estándar
Banda 1	0.020	0.238	0.085	0.034
Banda 2	0.022	0.275	0.099	0.047
Banda 3	0.035	0.748	0.222	0.062
Banda 4	0.040	0.487	0.190	0.047

Tabla 4.6. Estadística de las 4 bandas de la imagen HRG-2, corregida atmosféricamente mediante el algoritmo SMAC.

4.1.3. Estadística de la imagen HRG-2 del satélite SPOT-5

Los histogramas de frecuencia que se muestra en la Figura 4.8 a. y Figura 4.8 b. fueron realizados a las imágenes de reflectancia de la superficie corregido atmosféricamente por el método SMAC (método simplificado para la corrección atmosférica). Las dimensiones de las imágenes son de 2763 x 2579 pixeles con 2138610 pixeles que representan al “background” (fondo de la imagen) y 4987167 pixeles que representa a la imagen del que se realizó los histogramas para cada banda. Las bandas 1 y 2 tienen una distribución de frecuencia sesgado a la derecha (distribución bimodal), la banda 3 representa una distribución simétrica (distribución unimodal) y la banda 4 tiene una distribución multimodal.

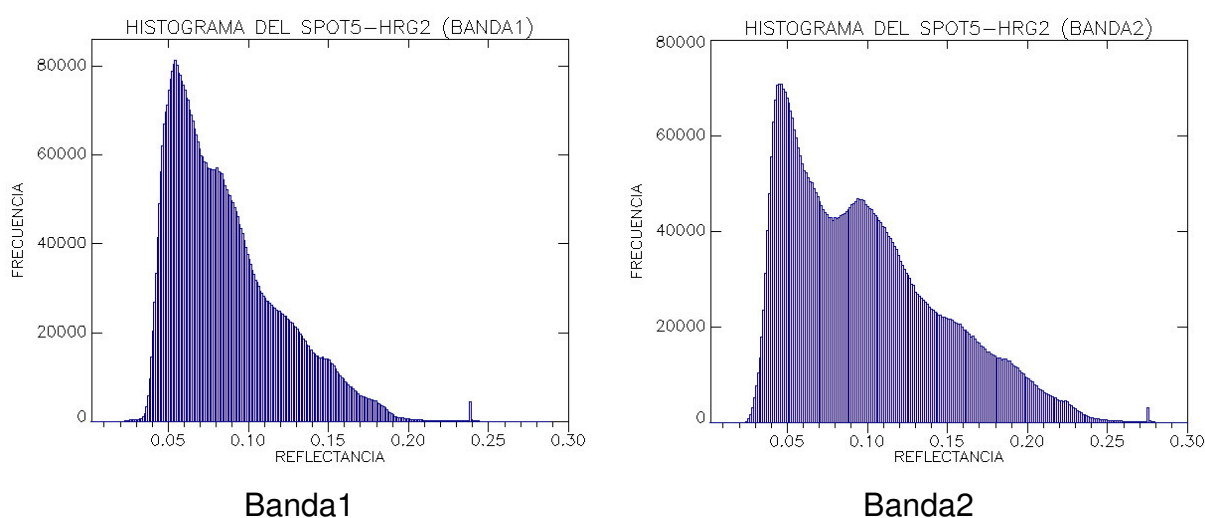


Figura 4.8a. Histograma de frecuencias para las bandas 1 y 2 de HRG-2 corregido atmosféricamente mediante el algoritmo SMAC.

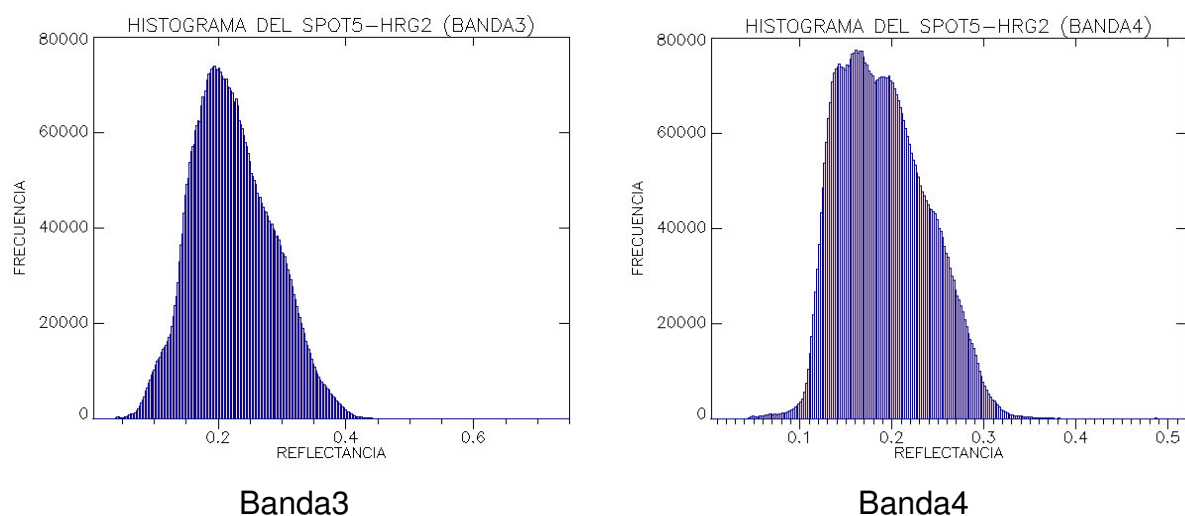


Figura 4.8b. Histograma de frecuencias para las bandas 3 y 4 de HRG-2 corregido atmosféricamente mediante el algoritmo SMAC.

4.2. Imágenes TM Landsat-5 y ETM+ Landsat-7

4.2.1. Corrección geométrica

Las imágenes TM del Landsat-5 y ETM+ del Landsat-7 no fueron necesarias realizar la corrección geométrica, son imágenes que fueron adquiridos en un nivel de tratamiento básico L1T que se encuentran ortorectificadas.

4.2.2. Corrección radiométrica

La corrección radiométrica consiste en la calibración de los datos del sensor y la corrección atmosférica. Ello implica la conversión de los niveles digitales de la imagen a valores físicos de radiancia, reflectividad y la corrección de los efectos atmosféricos. La corrección atmosférica es un paso imprescindible en los estudios multitemporales, en los que un mismo píxel terreno se recoge bajo diferentes condiciones de iluminación, atmosfera y observación.

4.2.2.1. Conversión de números digitales (ND) a radiancia espectral

Para los sensores TM y ETM+ de los satélites Landsat-5 y Landsat-7 los detectores están calibrados de manera tal que hay una relación lineal entre los ND y al radiancia espectral. Esta función lineal es típicamente descrita por los parámetros del: rango de valores ND en la imagen, la radiancia más baja

($LMIN_{\lambda}$) y la radiancia más alta ($LMAX_{\lambda}$). En general los datos son distribuidos en formato de 8 bits correspondiente a los valores 256 niveles ND. $LMIN_{\lambda}$ es la radiación espectral correspondiente al valor ND mínimo (usualmente 0). $LMAX_{\lambda}$ es la radiación correspondiente al valor ND máximo (usualmente 255). La información acerca de los parámetros de calibración de los sensores es ofrecida en la metadato o en el trabajo publicado por *Chander et al.* (2009). La ecuación que relaciona los ND de sensores remotos con la radiancia espectral (L_{λ}) es:

$$L_{\lambda} = \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) (ND - Q_{calmin}) + LMIN_{\lambda} \quad (4.4)$$

Alternativamente, la calibración del sensor puede ser expresada en la forma de compensación y ganancia (también denominadas “Bias” y “Gain”). En este caso, la radiancia espectral se puede calcular como:

$$L_{\lambda} = G \times ND + B \quad (4.5)$$

con

$$G = \frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}}$$

$$B = LMIN_{\lambda} - \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) Q_{calmin}$$

donde L_{λ} es la radiancia espectral en el sensor [$W/(m^2sr \mu m)$], ND es el números digital para cada pixel de la imagen, Q_{calmin} es el rango más bajo de radiancia reescalada en ND, Q_{calmax} es el rango más alto de radiancia reescalada en ND, $LMIN_{\lambda}$ es la radiancia espectral en la banda λ correspondiente a Q_{calmin} [$W/(m^2sr \mu m)$], $LMAX_{\lambda}$ es la radiancia espectral en la banda λ correspondiente a Q_{calmax} [$W/(m^2sr \mu m)$], G es el Gain [$(W/(m^2sr \mu m))/ND$] y B es el Bias [$W/(m^2sr \mu m)$].

Para los datos procesados por NLAPS, los valores de $Q_{calmin} = 0$, para procesados por LPGS, $Q_{calmin} = 1$. El valor de $Q_{calmax} = 255$, los valores de $LMIN_{\lambda}$ y $LMAX_{\lambda}$ se encuentran en la metadato de la imagen.

La conversión de los valores digitales a radiancia espectral, fue realizada para las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 de las imágenes de los sensores TM y ETM+, mediante un programa en IDL, que se muestra en el Anexo B (Programa B.4) cuyo nombre del programa es ND_A_RADIANCIA.PRO.

4.2.2.2. Corrección atmosférica modelo FLAASH.

El módulo FLAASH es una herramienta de corrección atmosférica que viene incorporado en el software ENVI 4.5. FLAASH corrige en las longitudes de onda del visible, infrarrojo cercano y en el infrarrojo medio hasta los 3 μm .

El módulo FLAASH incluye las siguientes características: Corrección del efecto de adyacencia (mezcla de píxeles debido al scattering de la radiación reflejada de la superficie), una opción para calcular la visibilidad en la escena media (cantidad de aerosol/neblina). FLAASH utiliza las técnicas más avanzadas para el manejo de las condiciones atmosféricas, tales como la presencia de nubes.

FLAASH soporta sensores hiperespectrales (como HyMAP, AVIRIS, HYDICE, HYPERION, etc.) y sensores multiespectrales (como ASTER, IRIS, Landsat, RapidEye, SPOT, etc.).

4.2.2.2.1. Librería espectral del módulo FLAASH

El módulo FLAASH para la corrección atmosférica utiliza las funciones de Respuesta Espectral Relativa (“Relative Spectral Response” (RSR)) que son librerías espectrales diseñadas para los sensores de un satélite antes de su lanzamiento. La RSR de cada banda de un sistema de sensor se caracteriza por la eficiencia cuántica espectral efectiva, que indica la sensibilidad espectral de las bandas en cada longitud de onda. Cada sensor tiene por consiguiente una sensibilidad espectral diferente, que es descrita por sus funciones RSR individuales. Las Figuras 4.9, 4.10 y 4.11 muestra las funciones de RSR para SPOT-5, Landsat-5 TM y Landsat-7 ETM+ (*Forestier et al.*, 2009). Las funciones RSR en el módulo FLAASH es llamado “Filter Function”.

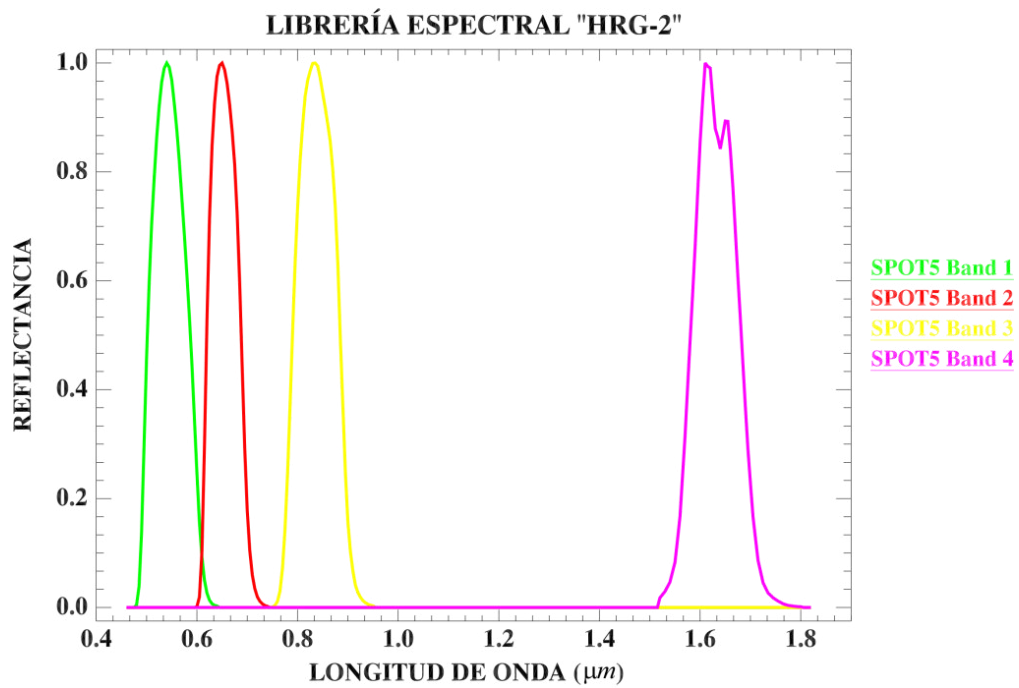


Figura 4.9. Funciones de RSR del sensor HRG-2, para las bandas 1, 2, 3 y 4.

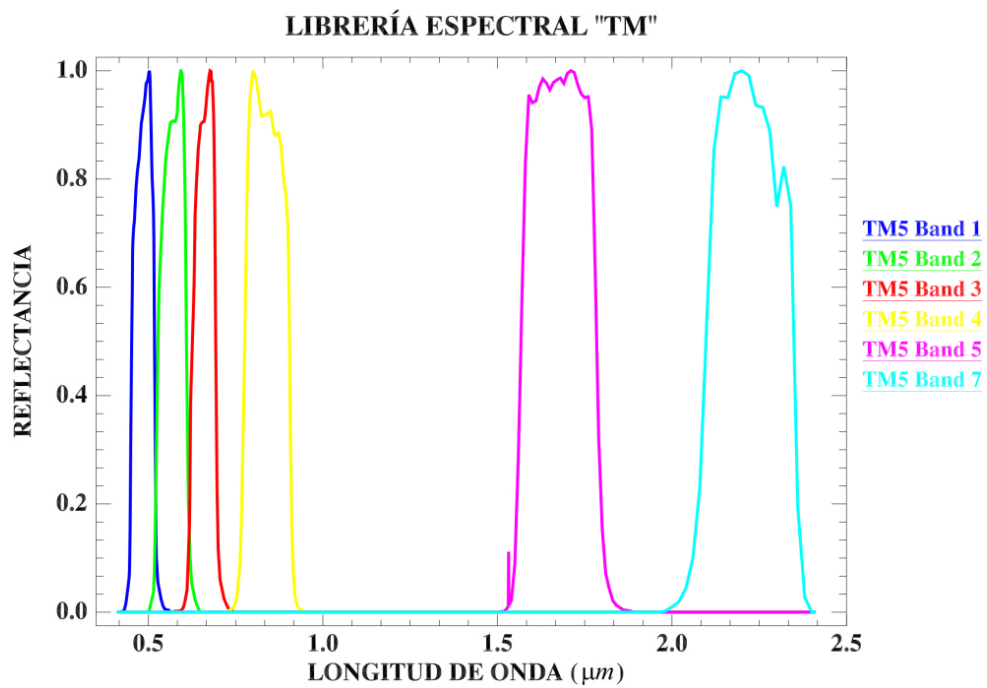


Figura 4.10. Funciones de RSR del sensor TM, para las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7.

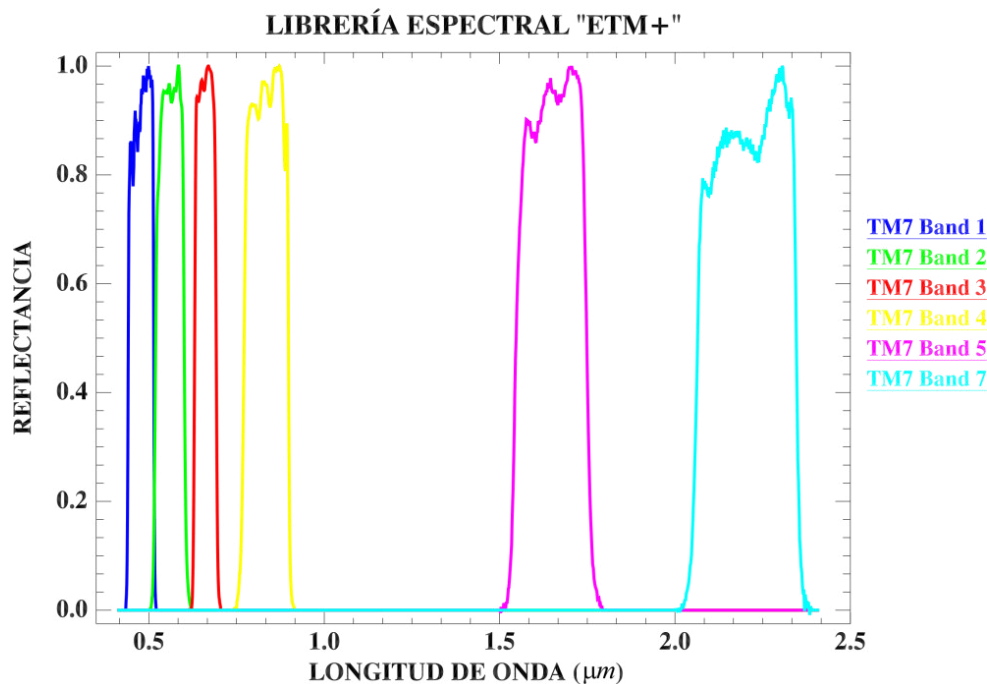


Figura 4.11. Funciones de RSR del sensor ETM+, para las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7.

5.2.2.2.2. Parámetros que requiere el módulo FLAASH

El módulo FLAASH del software ENVI 4.5, viene representado por un interfaz gráfico en donde se establecen todos los parámetros de entrada (Figura 4.12). Requiere como ingreso imágenes que se encuentre en radiancia espectral de punto flotante en unidad de $\mu W/(cm^2.sr.nm)$ y en formato de bandas Intercaladas por Líneas (BIL) o Formato de bandas Intercaladas por Pixel (BIP). En las imágenes de los sensores TM, ETM+ y HRG-2 se divide entre el factor de escala de 10 para pasar de $W/(m^2.sr.\mu m)$ a $\mu W/(cm^2.sr.nm)$ (ITT Visual Information Solutions, 2009).

Además del archivo de la imagen que debe corregirse, FLAASH también necesita información sobre la coordenada geográfica del centro de la imagen, la fecha y hora del momento en que fue capturado y la altura en que se encuentra el sensor. Estas informaciones deben ser introducidas por el usuario. El sensor se puede especificar de una extensa lista de sensores multiespectrales y hiperespectrales para los que se conocen sus funciones de respuesta espectral relativa. Desconocidos sensores también se puede seleccionado, pero las funciones de respuesta espectral relativa se debe proporcionar por separado.

La elevación del terreno se debe proporcionar para cada imagen, y se puede encontrar por ejemplo a partir del “Google Earth” o de un modelo de elevación digital (DEM).

Se debe seleccionar un modelo atmosférico en función del clima (latitud y época del año). Si la imagen contiene una banda de absorción de agua, FLAASH puede estimar la columna de vapor de agua; de lo contrario el vapor de agua se toma del modelo atmosférico. El modelo de aerosoles debe ser seleccionado dependiendo del tipo esperado de aerosoles presentes. Para sensores con las bandas necesarias, FLAASH puede llevar a cabo la recuperación de aerosol a partir de la imagen. De lo contrario, se utilizan los valores por defecto del modelo de aerosoles. En cualquier caso, se debe establecer un valor inicial para la visibilidad. En la mayoría de los casos FLAASH proporciona valores predeterminados para las bandas que se utilizarán para el vapor de agua y la recuperación de aerosoles, pero en algunos casos debe ser especificado por el usuario (*Rudjord and Due, 2012*).

Los parámetros requeridos y usados para la corrección atmosférica FLAASH para la imagen del sensor TM del satélite Landsat-5 son:

- a) Coordenadas geográficas del centro de la escena.
 - ✓ Latitud: -6°44'26.27"
 - ✓ Longitud: -79°40'33.42"
- b) Tipo de sensor: Multiespectral –Landsat TM5.
- c) Altura del sensor: 705 km.
- d) Altura sobre el nivel del mar del área de estudio: 0.1 km.
- e) Tamaño del pixel: 30 m.
- f) Fecha de adquisición de la imagen: 20-04-2008
- g) Hora de adquisición de la imagen: 15h: 17min: 28s.
- h) Modelo atmosférico: Tropical.
- i) Modelo de aerosol: Rural.
- j) Visibilidad: 40 km.

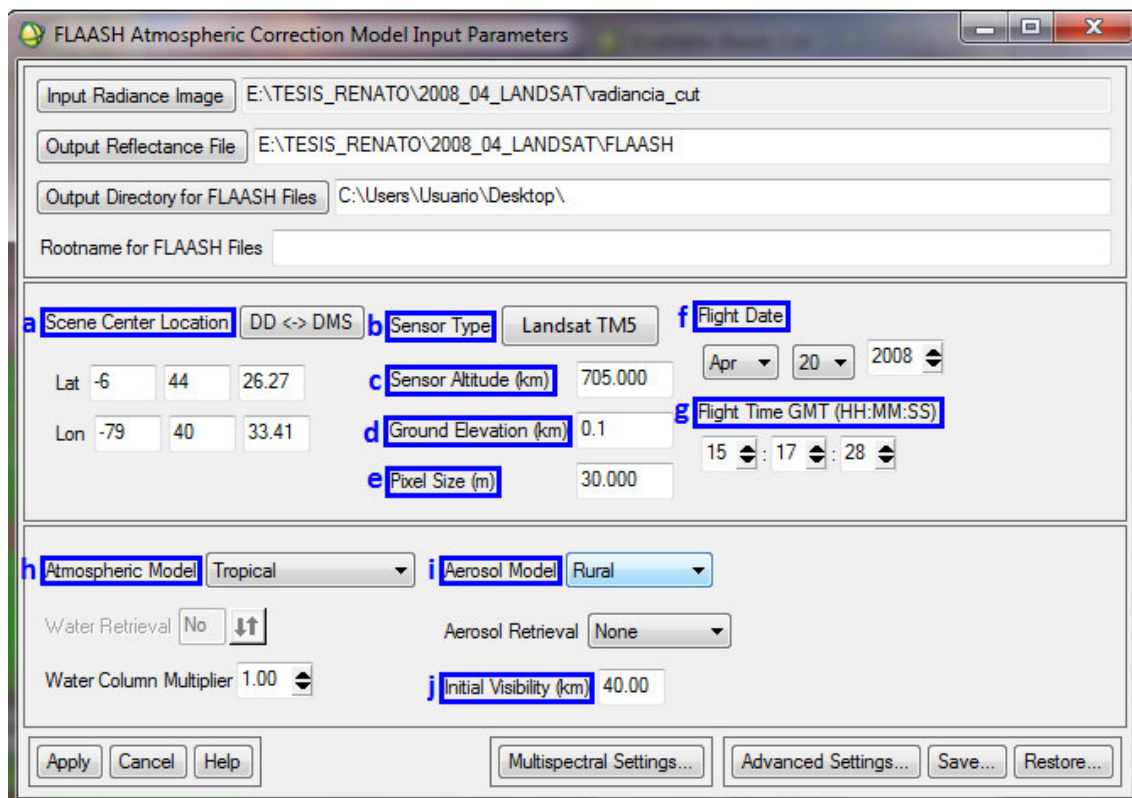


Figura 4.12. Ventana del módulo FLAASH en ENVI 4.5.

4.3. Correlación del SMAC vs FLAASH de la imagen HRG-2 del satélite SPOT-5

Se muestra en la Figura 4.13 los diagramas de correlación para las 4 bandas de la imagen HRG-2 corregidas atmosféricamente por el método SMAC vs el modelo FLAASH que tienen un coeficiente de correlación muy bueno para las 4 bandas aproximándose a 1, se realizó para toda la imagen de 4987167 pixeles sin tomar en cuenta el background que es igual a 2138610 pixeles. Para la corrección geométrica se realizó la misma técnica de ortorrectificación para SMAC y FLAASH. El modelo de corrección atmosférica FLAASH para la imagen HRG-2 del satélite SPOT-5 es de forma similar que para las imágenes TM y ETM+ mencionado antes. De este resultado, se concluye que la corrección atmosférica SMAC realizada a la imagen HRG-2 del satélite SPOT-5 es satisfactoria.

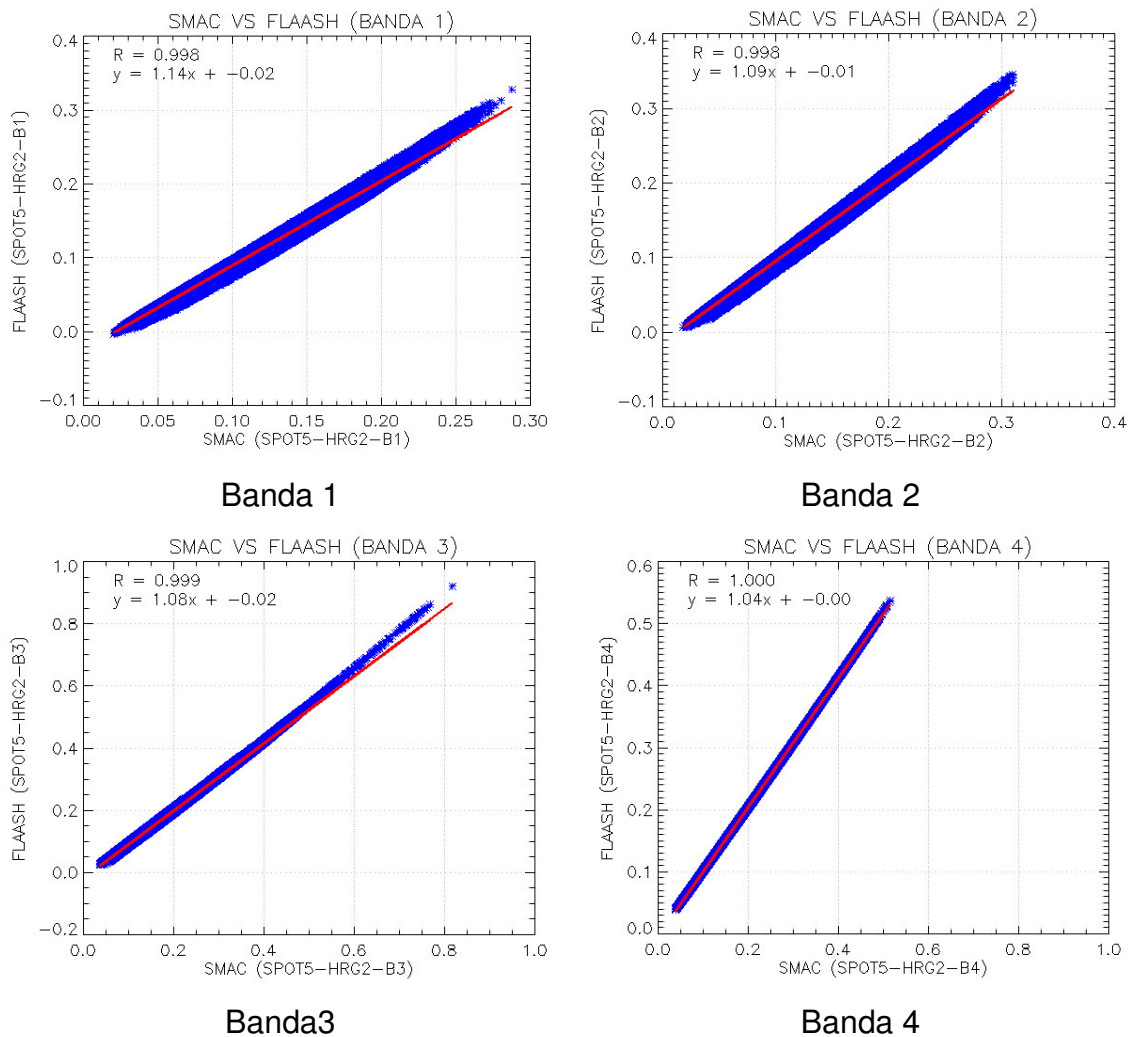


Figura 4.13. Gráfica de correlación de las bandas 1, 2, 3 y 4 usando SMAC vs FLAASH.

4.4. Índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI)

El índice de vegetación diferencial normalizado es utilizado ampliamente para mejorar la discriminación de cubiertas vegetales, medir el vigor de las plantas y la producción de la biomasa. Es calculado a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda. Este índice no mide directamente productividad ni disponibilidad forrajera, pero tiene una estrecha relación con estas variables, lo que permite utilizarlos para análisis regionales. Es decir, que los cambios de índice de vegetación permiten decir si un determinado mes o año es mejor o peor respecto al valor histórico (*Gilabert et al.*, 1997).

Los valores del NDVI están en función de la energía absorbida o reflejada por la plantas en diversas partes del espectro electromagnético, Figura 4.14. La respuesta espectral que tiene la vegetación sana, muestra un claro contraste

entre el espectro del visible, especialmente la banda roja (entre 0.6 a 0.7 μm), y el infrarrojo cercano (entre 0.7 a 1.1 μm). Mientras que en el visible los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía que reciben, en el infrarrojo cercano, las paredes de las células de las hojas, que se encuentran llenas de agua, reflejan la mayor cantidad de energía. El NDVI se calcula mediante la siguiente expresión (Huete *et al.*, 2002).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (4.6)$$

donde ρ_{NIR} es la reflectividad en el infrarrojo cercano y ρ_R es la reflectividad en el rojo.

El rango de valores de las reflexiones espectrales se encuentra entre el 0 y el 1; ya que, tanto la reflectividad del infrarrojo cercano como la del rojo, son cocientes de la radiación reflejada sobre la radiación entrante en cada banda espectral. Por consecuencia de estos rangos de valores, el NDVI varía su valor entre -1 y 1. El agua tiene reflectancia $\rho_R > \rho_{NIR}$, por lo tanto el NDVI tiene valores negativos; las nubes presentan valores similares de ρ_R y ρ_{NIR} , por lo que su NDVI es cercano a cero, el suelo descubierto y con vegetación rala presenta valores positivos aunque no muy elevados; la vegetación densa, húmeda y bien desarrollada presenta los mayores valores de NDVI (Jackson *and Huete*, 1991).

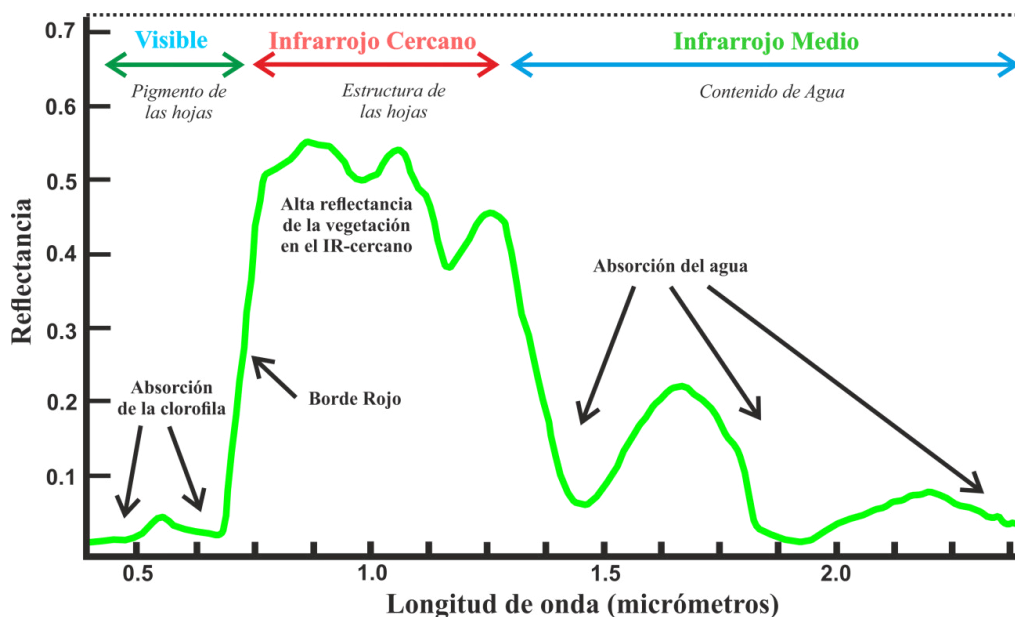


Figura 4.14. Comportamiento espectral de la vegetación (Adaptado de Jackson *and Huete*, 1991).

El NDVI, es obtenido del sensor TM y ETM+ a partir de la reflectancia de las bandas 4 y 3, para el caso de la imagen HRG-2 del satélite SPOT-5 a partir de la reflectancia de las bandas 2 y 3, en la Figura 4.15 se muestra un ejemplo del cálculo del NDVI para la imagen HRG-2 de fecha 2009/02/20.

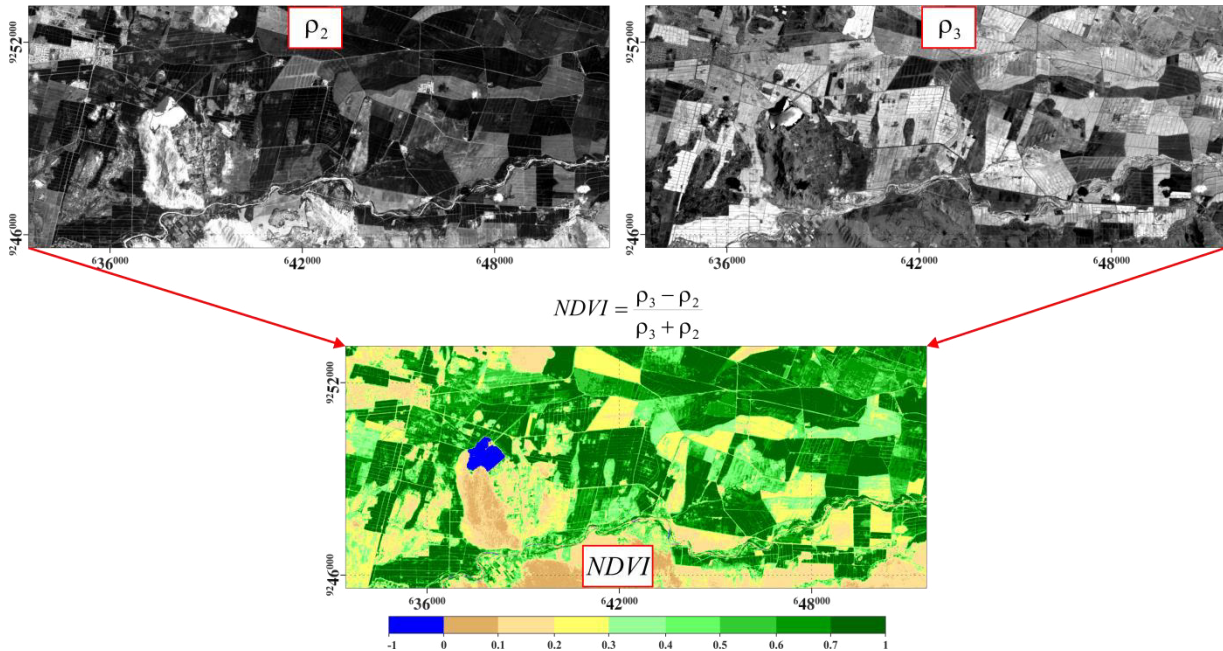


Figura 4.15. Cálculo del NDVI de la imagen HRG-2 del satélite SPOT-5, a partir de la reflectancia de las bandas 2 y 3.

4.5. Índice de salinidad (IndSal) del suelo

El Índice de Salinidad utilizado fue propuesto por Al-Khaier (2003), utilizó el rango de la longitud de onda del infrarrojo medio para las imágenes de los sensores TM y ETM+, es decir la reflectancia de las bandas 5 (1.547 – 1.748 μm) y 7 (2.065 – 2.346 μm).

$$IndSal = \frac{\rho_5 - \rho_7}{\rho_5 + \rho_7} \quad (4.7)$$

Tiene una precisión de la detección general de la salinidad en los suelos desnudos, en especial cuando las tierras están en barbecho. Los valores del Índice de Salinidad fluctúan entre -1 y 1. Los valores cercanos a 1 indican un nivel bajo de sales, mientras que los valores de -1 hasta cercanos a 0 por la derecha representan niveles elevados de sales.

4.6. Máximo valor compuesto y mínimo valor compuesto de imágenes

La técnica de los máximos valor compuestos (MVC) y mínimos valor compuestos consiste en seleccionar el mayor y el menor valor numérico de un pixel dado, en diferentes fechas. En la Figura 4.16 se presenta un ejemplo para ambos casos (Bai et al., 2005).

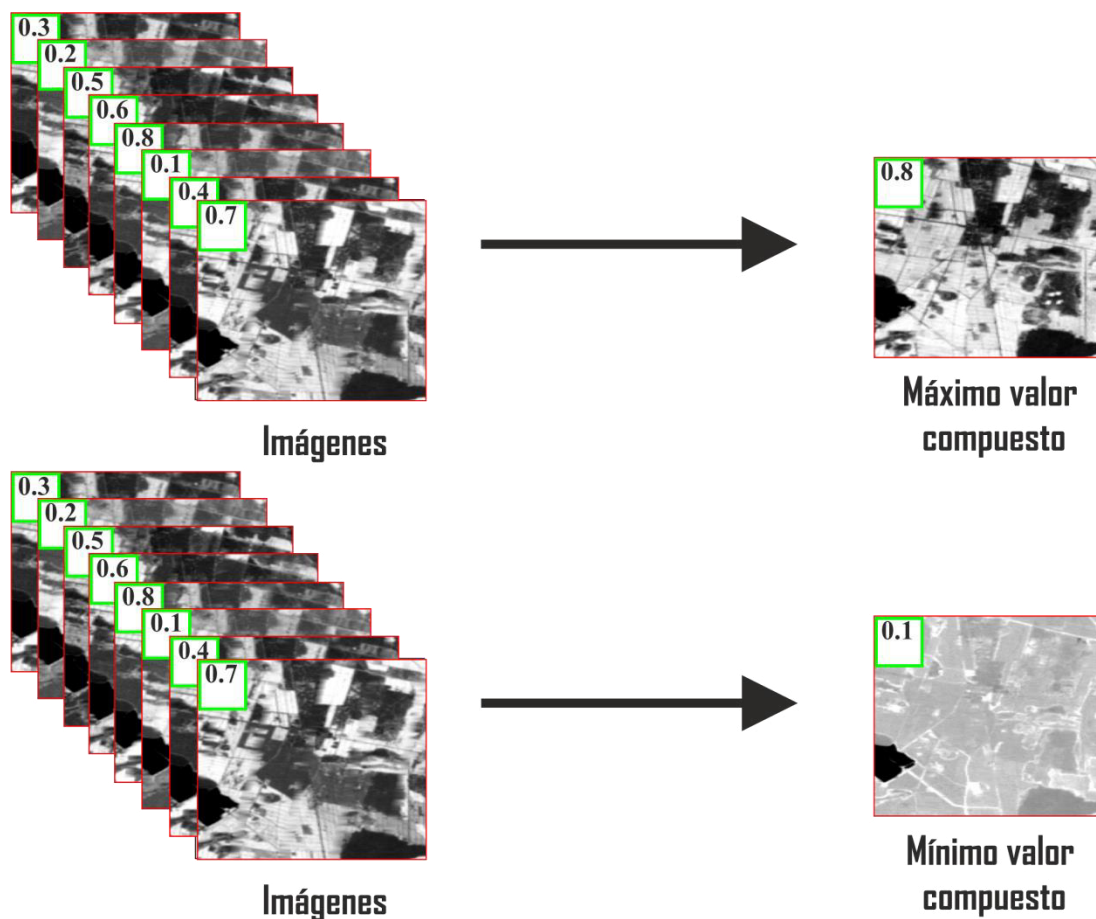


Figura 4.16. Ejemplo del máximo valor compuesto y mínimo valor compuesto.

4.7. Software utilizado

ENVI 4.5 (“Environment for Visualizing Images”).- Software diseñado para la visualización, análisis, y presentación de imágenes en formato digital, usado para el procesamiento de las imágenes, mosaicos, calibración radiométrica, filtros, componentes principales, cálculos estadísticos, etc (Canty, 2007).

IDL 7. (“Interactive Data Language”).- Lenguaje de programación especializado para la computación y visualización científica (Canty, 2007), usado para la ejecución de algoritmos de preprocesamientos de imágenes, etc.

Resultados

En el presente capítulo se muestra los resultados obtenidos a partir de datos imágenes de los sensor HRG-2, TM y ETM+ a bordo de los satélites SPOT-5, Landsat-5 y Landsat-7 respectivamente, y datos in-situ de conductividad eléctrica (CE) del suelo. Se presenta el comportamiento espectral de la superficie del suelo en diferentes coberturas de cuerpos, se identificó las tierras degradadas mediante máximo valor compuesto del índice de vegetación de diferencial normalizado (NDVI) e índice de salinidad (IndSal), se muestra el análisis de la variación del NDVI en el tiempo en suelos afectadas por la salinidad y en suelos normales, también se generó modelos de regresión lineal simple y múltiple usando los datos in-situ de CE del suelo en función de datos Imágenes, para luego generar un mapa de salinidad del suelo clasificado según el grado de salinidad. Estos procesos se realizaron mediante el uso del software ENVI 4.5 y el lenguaje de programación en IDL.

5.1. Comportamiento espectral de diferentes superficies del suelo

5.1.1. Firma espectral obtenida de HRG-2 / SPOT-5

Estas firmas espectrales fueron obtenidas a partir de la imagen de reflectancia del suelo del sensor HRG-2. En la Figura 5.1 se muestra la variación de la reflectancia del suelo en función de la longitud de onda central de las cuatro bandas del sensor HRG-2 (verde, rojo, infrarrojo cercano, Infrarrojo de onda corta). Se tomó diferentes cuerpos como el agua con coordenadas UTM (E=637684.937 m - N=9250079.114 m) que corresponde a la Laguna Boro, vegetación saludable (caña de azúcar) con coordenadas UTM (E=639894.937 m - N=9252419.114 m), suelo normal (en barbecho) con coordenadas UTM (E=650164.937 m - N=9247459.114 m) y suelo afectado por la salinidad con coordenadas UTM (E=647794.937 m - N=9246559.114 m).

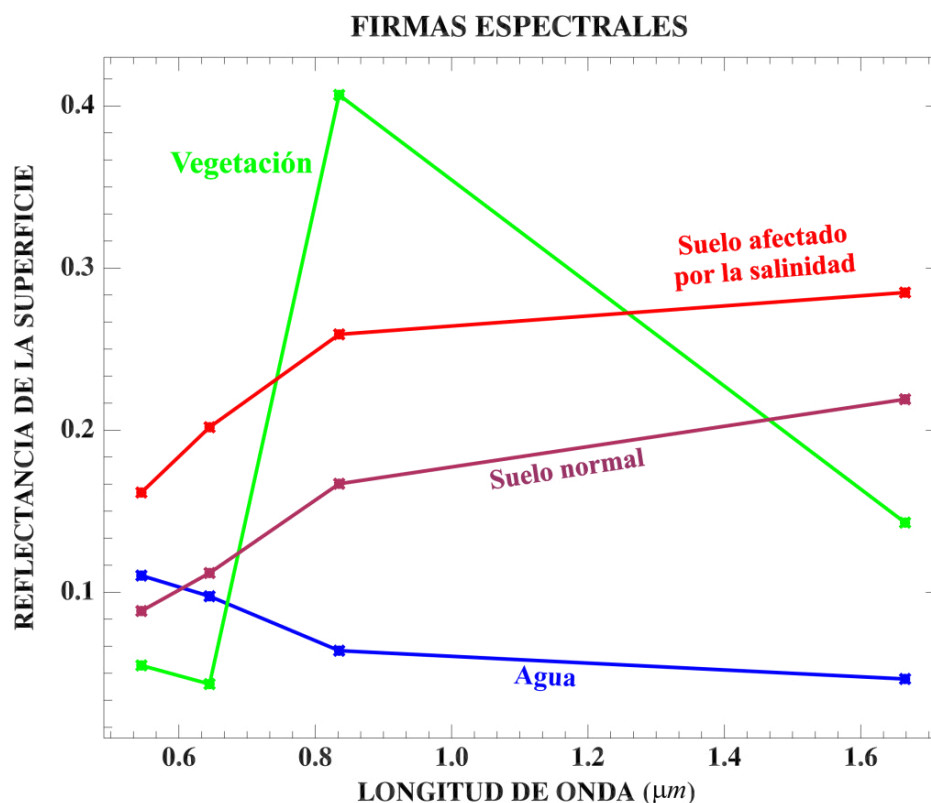


Figura 5.1. Reflectancia en diferentes coberturas del suelo (Extraídas de la imagen HRG-2 -20/02/2009).

La Figura 5.1 muestra la firma espectral de la vegetación saludable, se caracteriza por una escasa reflectancia (10%) en el visible, ligeramente mayor en el verde ($0.54 \mu m$) con respecto al rojo ($0.64 \mu m$), esto es por la fuerte absorción debido a la clorofila; en el infrarrojo cercano ($0.83 \mu m$) la reflectancia de la vegetación es muy alta (40%) debido a la escasa absorción de energía por parte de las plantas en esta banda y en el infrarrojo medio ($1.66 \mu m$) la reflectancia disminuye a causa que el agua de la planta absorbe la energía. Las firmas espectrales del suelo representan, tierras en bajo grado de salinidad y tierras afectadas por la salinidad, los suelos afectados por la salinidad del suelo tienen mayor reflectancia en todas las bandas que un suelo en buen estado. La firma espectral del agua representa mayor reflectancia en el visible de aquí va disminuyendo hasta el infrarrojo medio.

5.1.1.1 Comportamiento espectral de la caña de azúcar según su estado de salud

La Figura 5.2 muestra las firmas espectrales del cultivo de la caña de azúcar en diferentes estados de salud, corresponde a la imagen HRG-2 de fecha

20/02/2009 se tomó la muestra 1, 2, 3 y 4 de la Tabla C.1 del Anexo C, según la descripción, los datos de campo corresponden cercano a la fecha de la toma de imagen. Se caracterizan por presentar un claro contraste entre las regiones del espectro correspondiente al rojo del visible y el infrarrojo cercano. En la región del visible (rojo), los pigmentos de la hojas absorben la mayor parte de la luz que reciben, en el infrarrojo cercano estas sustancias son bastante transparente. Por esta razón, el cultivo de la caña de azúcar en un buen estado ofrece baja reflectividad en la banda roja del espectro y alta en el infrarrojo cercano, de manera que cuanto mayor sea el “vigor” que presenta el cultivo de la caña de azúcar, mayor será el contraste entre los valores de reflectancia captadas en ambas bandas. Bajos valores de reflectancia en el infrarrojo cercano y un incremento en el visible indica que el cultivo de la caña de azúcar se encuentra en mal estado, una de las causas es la salinidad del suelo.

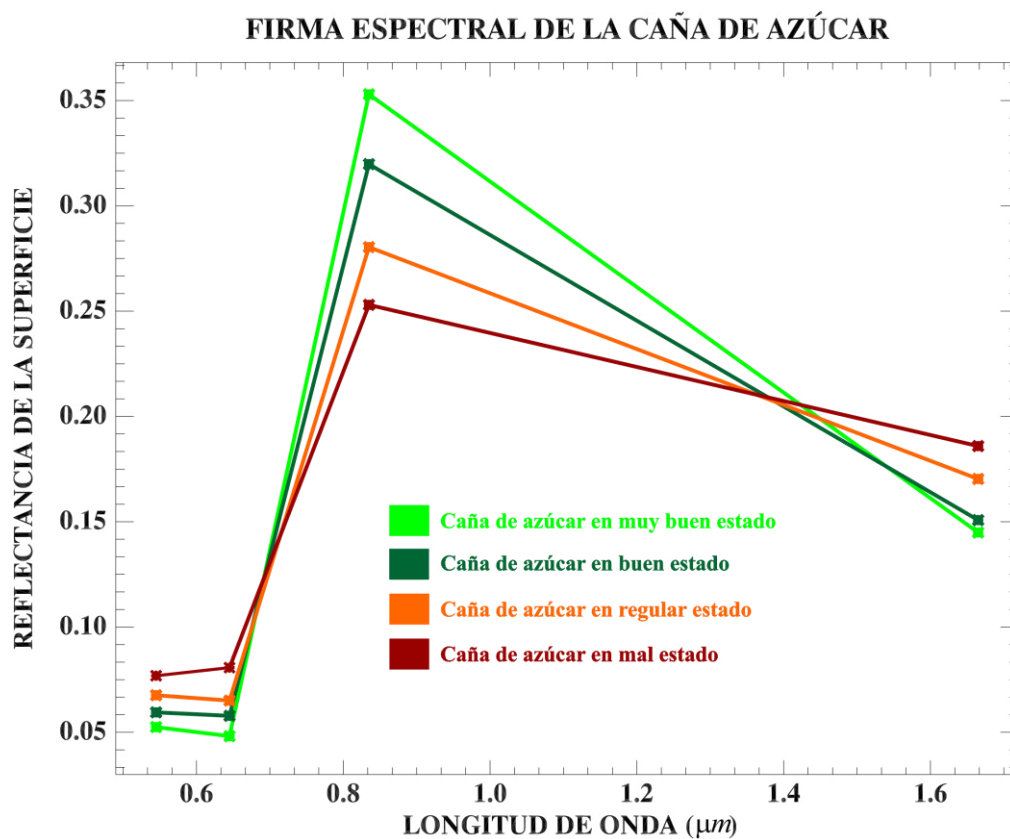


Figura 5.2. Comportamiento espectral en diferentes estados de salud de la caña de azúcar (Imagen HRG-2 - 20/02/2009).

5.1.1.2 Comportamiento espectral del suelo según el grado de Salinidad

La Figura 5.3 muestra las firmas espectrales del suelo según el grado de salinidad que corresponden a la imagen HRG-2 de fecha 20/02/2009, se tomó la muestra 5, 6 y 7 de la Tabla C.1 del Anexo C debido a que estas muestras de campo fueron tomados cercanos a la fecha de la imagen. Se puede interpretar que a diferentes grados de salinidad del suelo, se refleja la radiación electromagnética de manera distinta, un suelo no salino tendrá menor reflectancia con respecto a un suelo ligeramente salino y moderadamente salino tanto en el visible, infrarrojo cercano y medio.

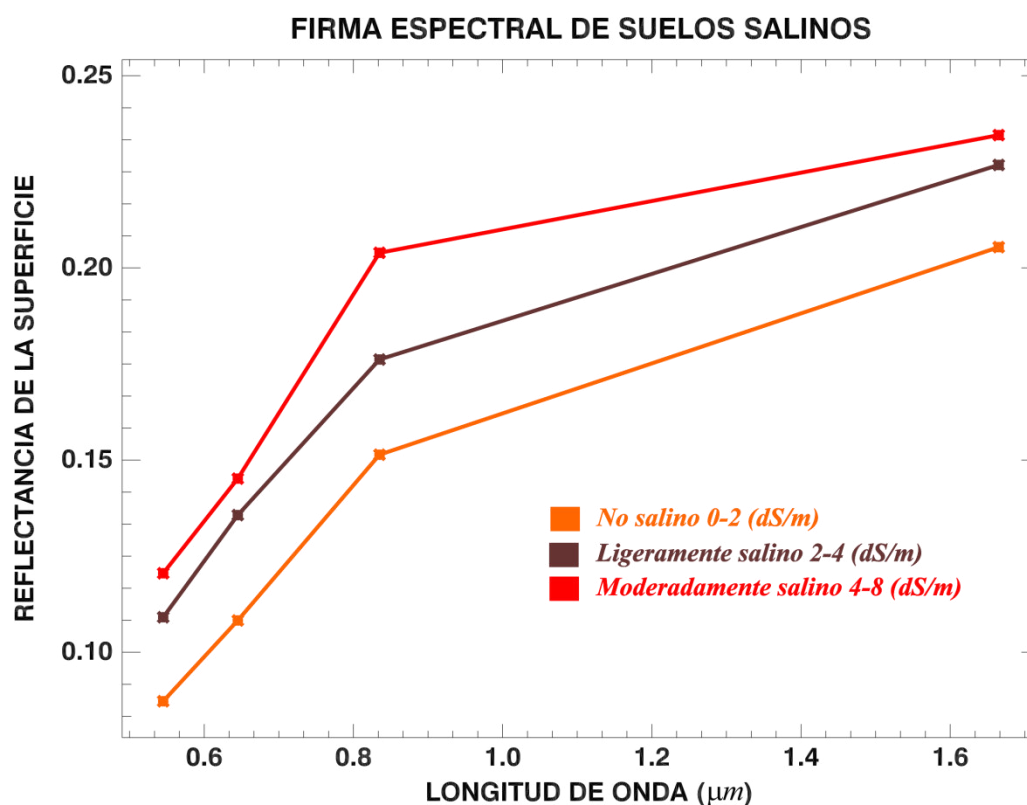


Figura 5.3. Comportamiento espectral del suelo desnudo según el grado de salinidad (Imagen HRG-2 - 20/02/2009).

5.1.2 Firma espectral obtenida de TM / Landsat-5

Estas firmas espectrales fueron obtenidas a partir de la imagen del sensor TM del satélite Landsat-5 de fecha 20/04/2008.

En la Figura 5.4, muestra la variación de la reflectancia de la superficie del suelo en función de la longitud de onda central de las 6 bandas (1, 2, 3, 4, 5 y

7) del sensor TM. Se tomó 4 cuerpos diferentes como el agua con coordenadas UTM (E=671145.0 m – N=9266185.0 m), vegetación saludable con coordenadas UTM (E=637995.0 m – N=9252205 m), suelo desnudo sin problemas de salinidad con coordenadas UTM (E=635895.0 m - N=9249265.0 m) y suelo con problema de salinidad con coordenadas UTM (E=644535.0 m – N=9248575.0 m).

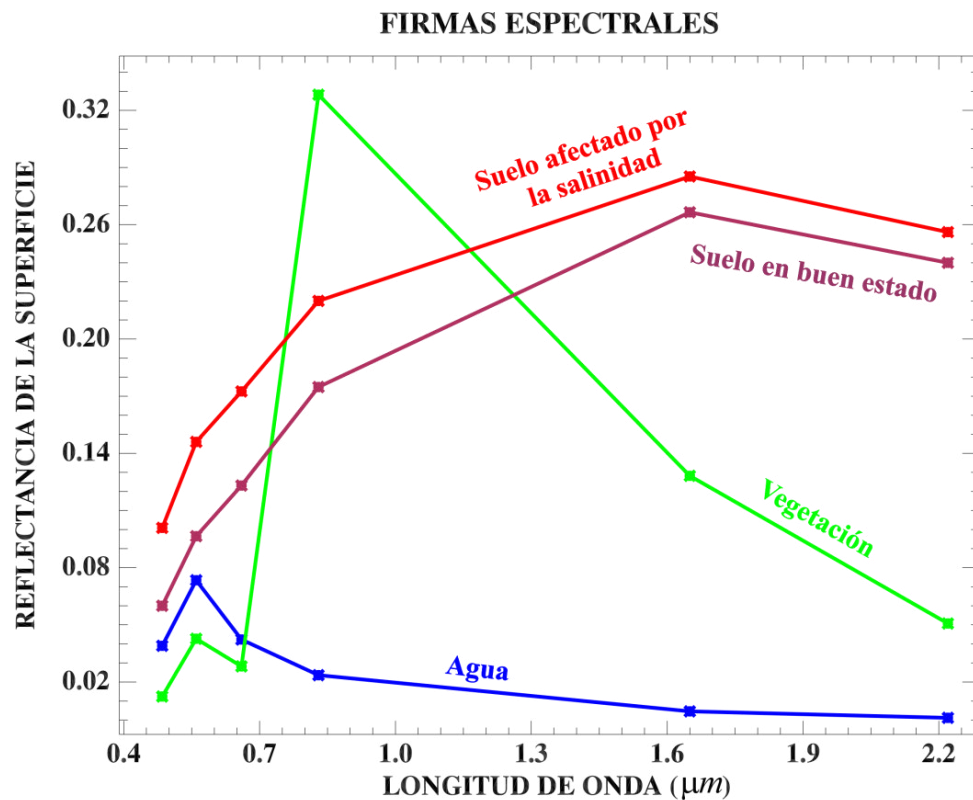


Figura 5.4. Reflectancia en diferentes coberturas del suelo (TM Landsat-5 - 20/04/2008).

La firma espectral de la vegetación representa al cultivos de la caña de azúcar saludable, en el visible se presenta mayor absorción relativa de la radiación que llega a las hojas la cantidad reflejada y transmitida son pequeñas, en el infrarrojo cercano la cantidad de radiación absorbida es muy pequeña mientras que la reflejada y la transmitida son grandes, en el infrarrojo medio hay una intensa absorción de la radiación debido al contenido de agua en las hojas. La firma espectral del suelo en buen estado representa tierras (desnudas) óptimas para el cultivo y la firma espectral del suelo afectado por la salinidad son tierras que están en mal estado afectadas por las sales, la reflectancia del suelo aumenta progresivamente desde el visible al infrarrojo medio en la banda 7 de

longitud de onda central $2.206 \mu m$ disminuye debido a la absorción del agua. La firma espectral del agua tiene su máxima reflectancia en el visible (verde), en el infrarrojo cercano y medio empieza a decrecer donde el valor de la reflectancia es muy débil aproximándose a cero.

5.2. Identificación de tierras degradadas por la salinidad del suelo

Para poder identificar las áreas degradadas por la salinidad dividimos en dos zonas y un sector los terrenos de la Empresa Agroindustrial Pomalca, como se ilustra en la Figura 5.5.

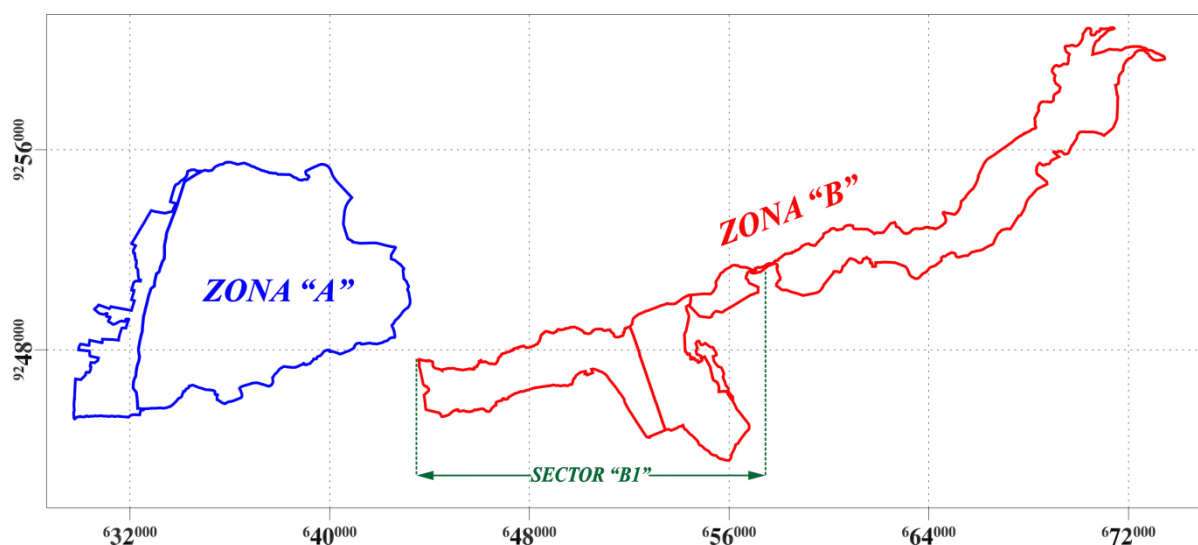


Figura 5.5. Límite externo y división interna de los terrenos de cultivo de la Empresa Agroindustrial Pomalca. Proyección UTM, coordenadas en metros.

5.2.1. Dinámica del cultivo de la caña de azúcar mediante el NDVI, durante el periodo 2007 a 2010 para la zona "A"

Mediante un análisis visual de las imágenes del NDVI en el tiempo de las Figura 5.6 a, Figura 5.6 b y Figura 5.6 c se observa la dinámica de producción de la caña de azúcar, esto sirve para tener una idea general de la variación del cultivo de caña de azúcar. El análisis de los valores bajos del NDVI en distintas fechas de un mismo lugar permite visualizar suelos con bajo rendimiento agrícola, esto en mayor parte corresponde a suelos salinos.

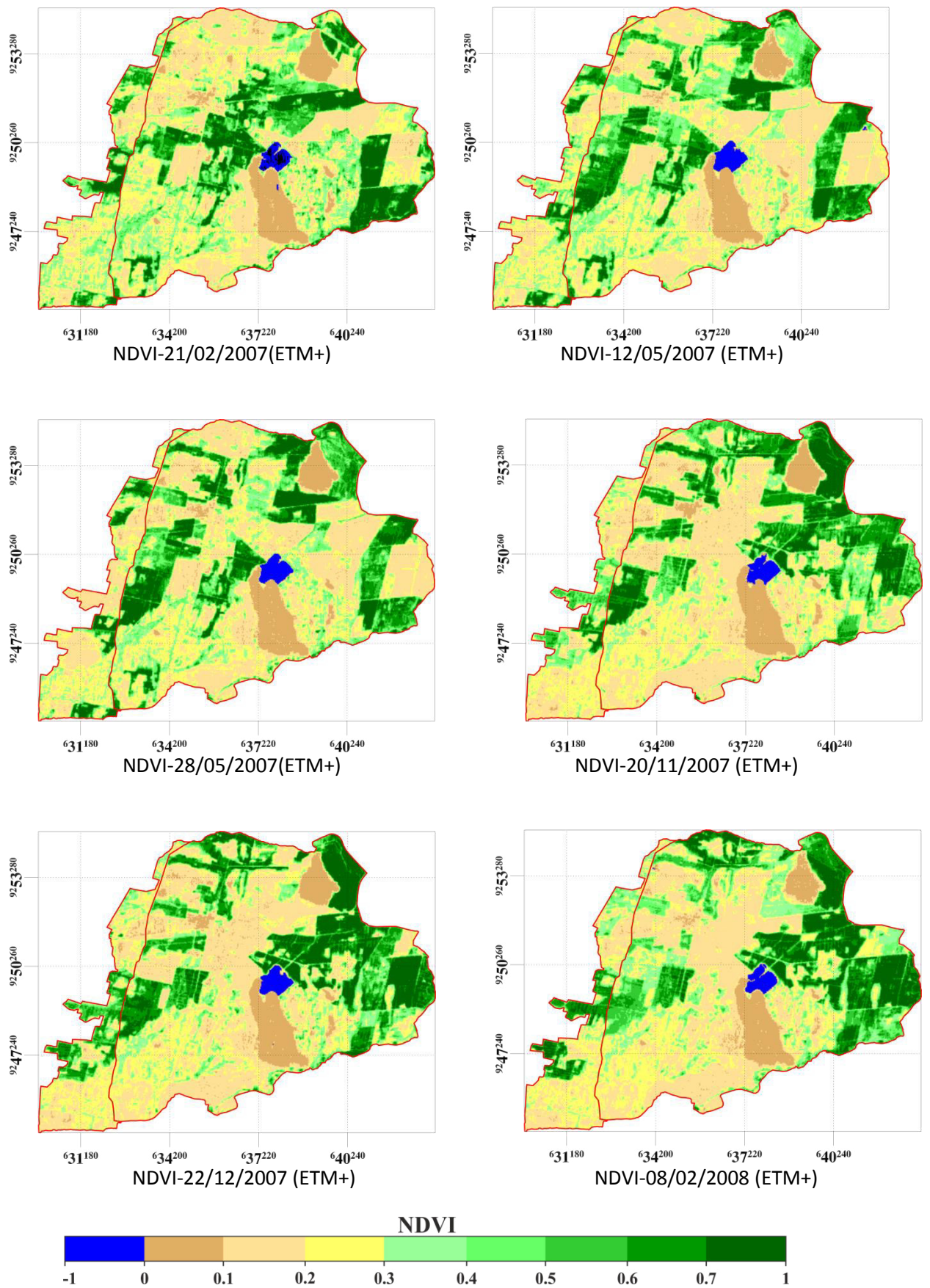


Figura 5.6a. Variación del INDVI para 6 fechas (zona “A”). Proyección UTM, coordenadas en metros.

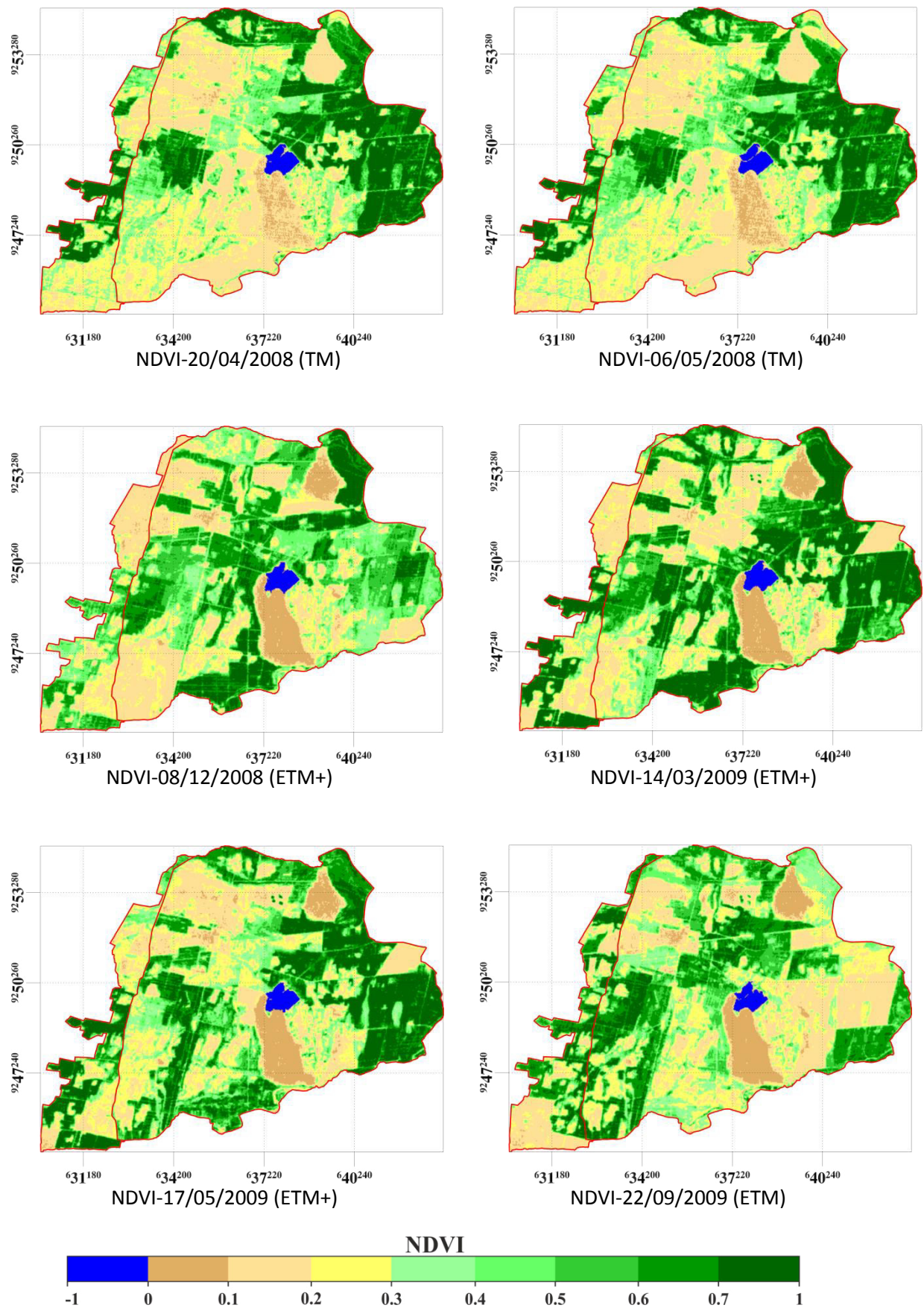


Figura 5.6b. Variación del INDVI para 6 fechas (zona “A”). Proyección UTM, coordenadas en metros.

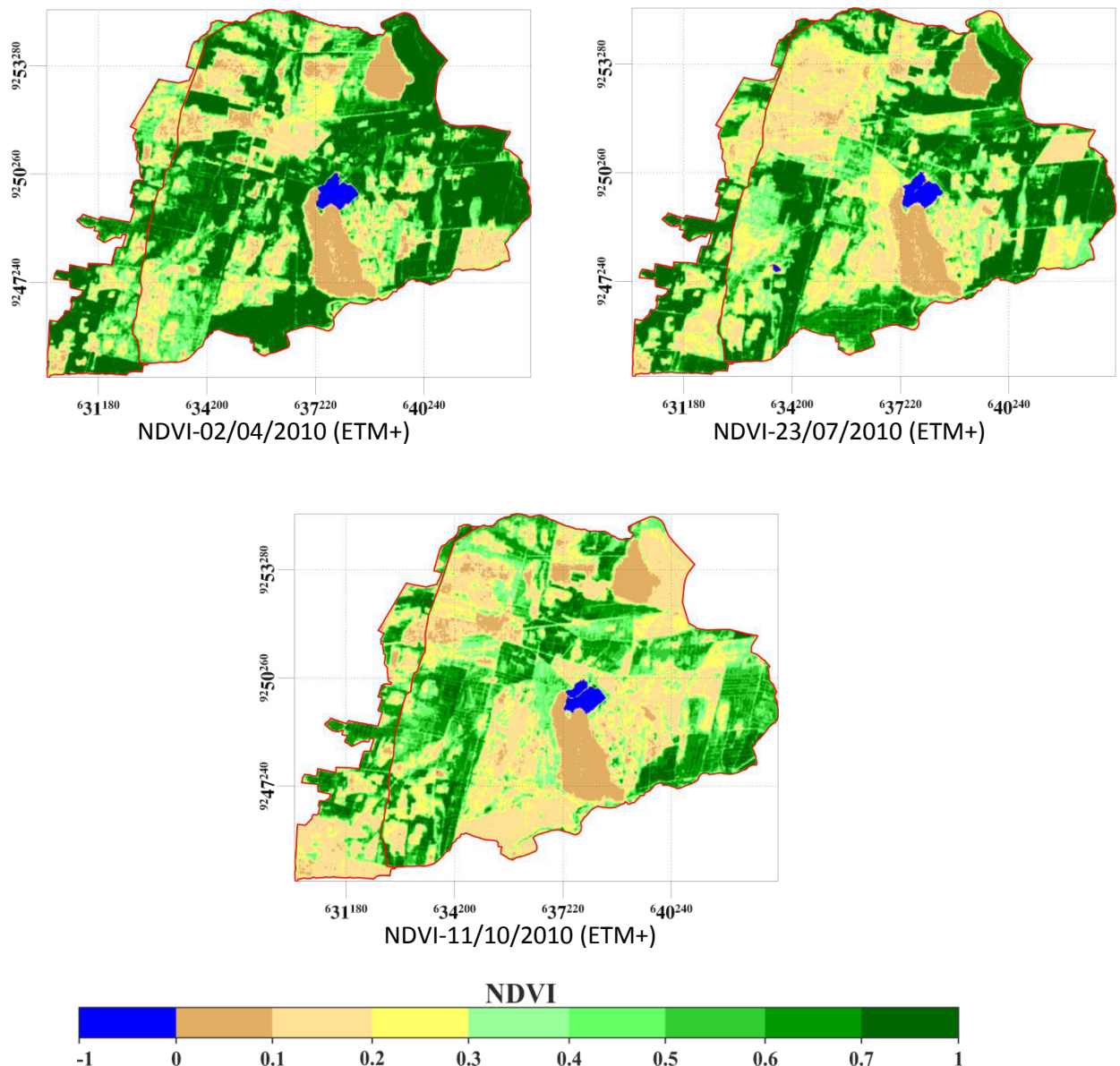


Figura 5.6c. Variación del NDVI para 3 fechas (zona “A”). Proyección UTM, coordenadas en metros.

5.2.2. Máximo valor compuesto de 15 imágenes de NDVI 2007 a 2010 de la zona “A”

El máximo valor compuesto (MVC) de NDVI se utilizó para evaluar la dinámica interanual de tierras cultivadas y no cultivadas durante el periodo de 2007 a 2010. Mediante esta metodología planteada se identifica las áreas de tierras cultivadas con caña de azúcar y no cultivadas. El objetivo principal es identificar suelos con baja calidad agrícola, en la Figura 5.7 se observa que los valores más altos del NDVI (rango de 0.57 - 1) corresponden a cultivos de caña de azúcar en un buen estado, el 62.19% (un aproximado de 5313.78 ha)

corresponden a suelos óptimos para la producción agrícola sin problemas de salinidad y los valores bajos de NDVI (rango de 0 – 0.57) el 37.18% (un aproximado de 3177.27 ha) corresponden a suelos con baja calidad agrícola ocasionados principalmente por los problemas de salinidad o corresponden a ciudades, cerros y caminos. El 0.63% (rango de -1 a 0) corresponde a cuerpos de agua (un aproximado de 54 ha).

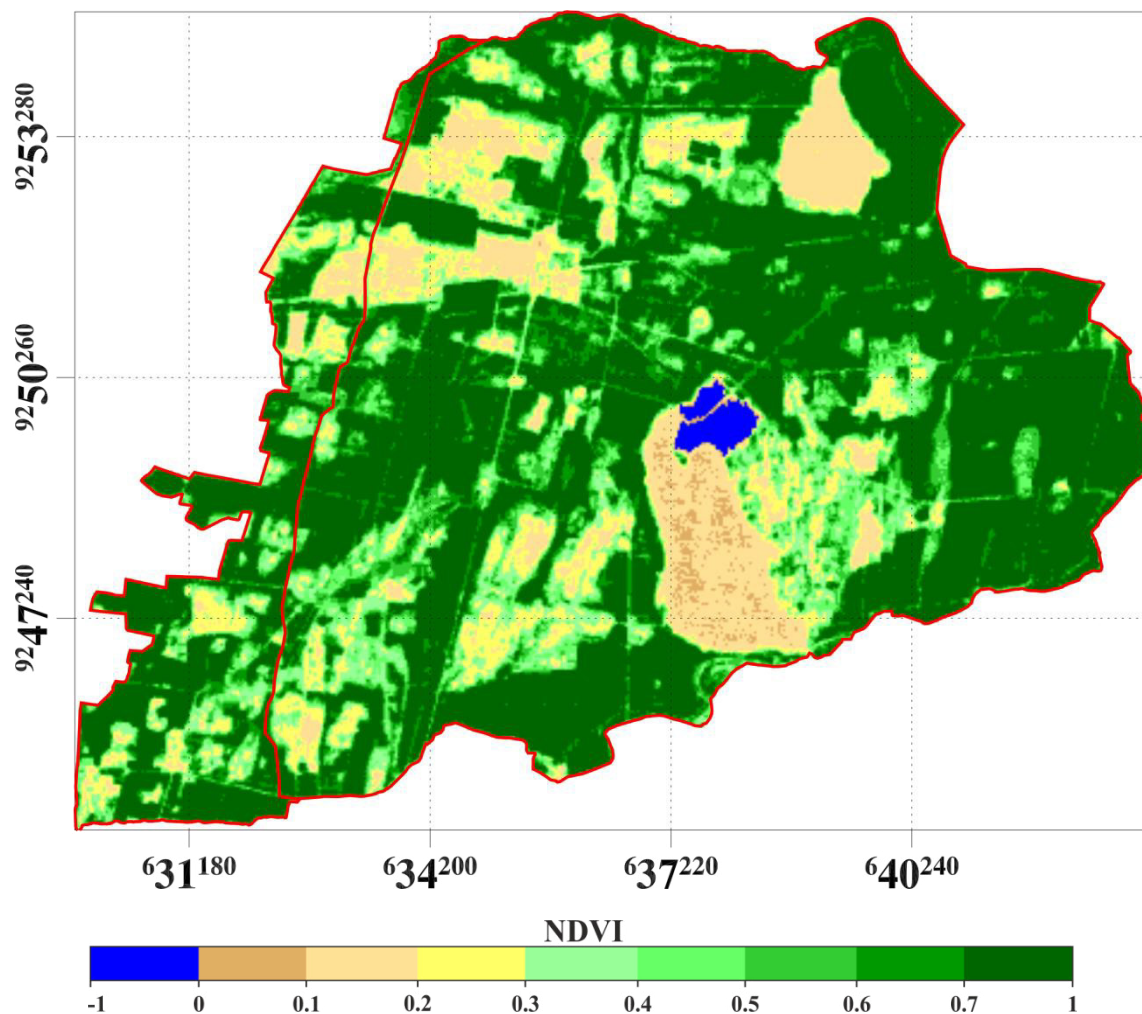


Figura 5.7. Máximo valor compuesto de NDVI periodo 2007-2010 (zona “A”).
Proyección UTM, coordenadas en metros.

5.2.3. Máximo valor compuesto de 15 imágenes de IndSal, 2007 a 2010 de la zona “A”

Las Imágenes Índice de Salinidad (IndSal) se generaron usando la ecuación (4.7) para las 15 imágenes que corresponden a los años de 2007 a 2010, mostradas en la Tabla 3.1 (las imágenes del N° 46 - 64 con excepción de 49,

55, 58 y 61 por poseer nubes). Los valores del IndSal fluctúan entre -1 y 1. Al realizar el máximo valor compuesto (MVC) los valores del IndSal varían de 0 a 1, donde los valores cercanos a 1 indican un nivel bajo de sales, mientras que los valores cercanos a 0 representan niveles elevados de sales.

En la Figura 5.8, se muestra el máximo valor compuesto de las 15 imágenes de IndSal. El resultado de este procedimiento resulta una imagen en donde se distinguen claramente dos tipos de cobertura, una parte de color más clara que se visualiza claramente las parcelas de los cultivos de caña de azúcar sin problemas de salinidad y el de color más oscuro representan tierras perjudicadas por la salinidad, suelos en descanso, poblaciones, caminos y cerros.

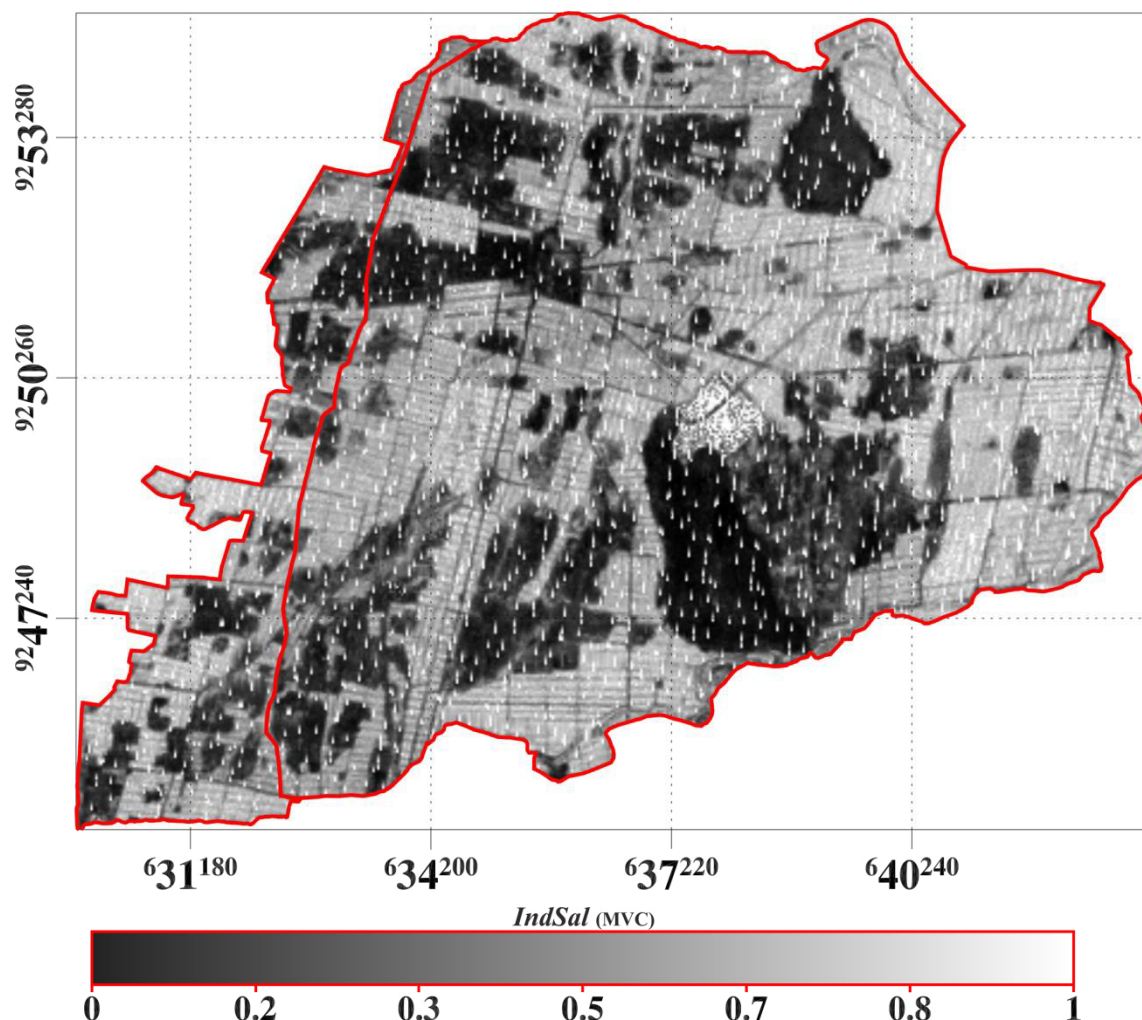


Figura 5.8. Máximo valor compuesto de 15 imágenes de IndSal (zona "A") periodo 2007 a 2010. Proyección UTM, coordenadas en metros.

La Figura 5.9 muestra a la imagen del máximo valor compuesto (MVC) del IndSal que varían sus valores en un rango de 0 a 1. Se clasificó en dos clases

uno de color rojo a un rango de 0 - 0.25 y 0.25 - 1; al realizar este procedimiento solo queda las áreas perjudicadas por la salinidad del suelo, suelos en descanso, poblaciones, caminos y cerros que representa aproximadamente un total de 3168.63 ha (37.08%), la parte de las parcelas de los cultivos de caña de azúcar representan un aproximado de 5303.61 ha (62.06%) y el reservorio Boro representa aproximadamente 73.26 ha (0.86%).

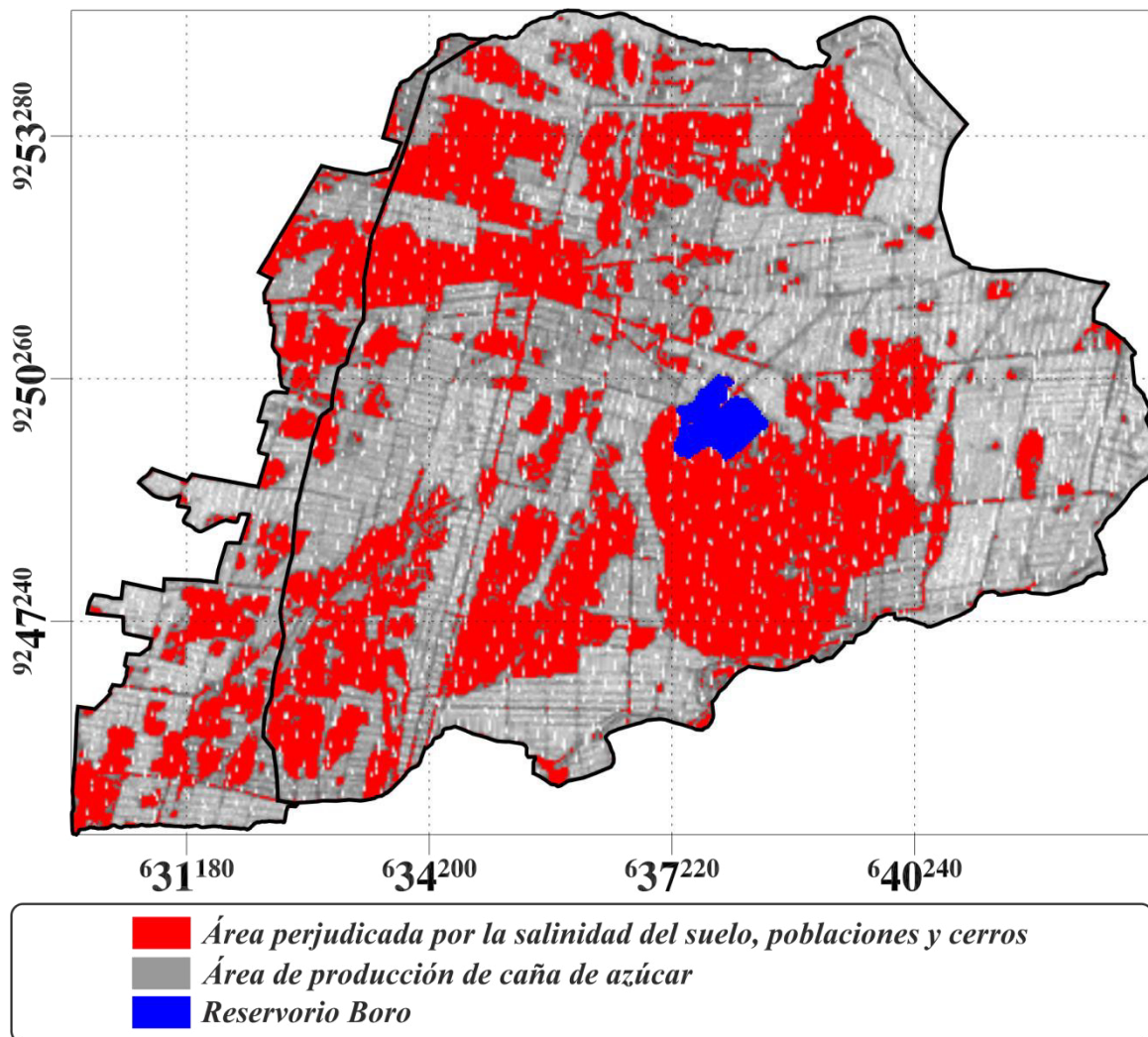


Figura 5.9. Detección de las áreas salinas, cerros y ciudades a un rango de 0 a 0.25 (zona "A") del MVC del IndSal. Proyección UTM, coordenadas en metros.

En la Figura 5.10, se muestra un vector (*Shapefile*) generado a partir de la Figura 5.9 a un rango de 0 a 0.25, este vector engloba a todas las áreas donde no hay cultivo de caña de azúcar que están representadas por áreas perjudicadas por la salinidad del suelo, suelos en descanso, poblaciones, caminos y cerros.

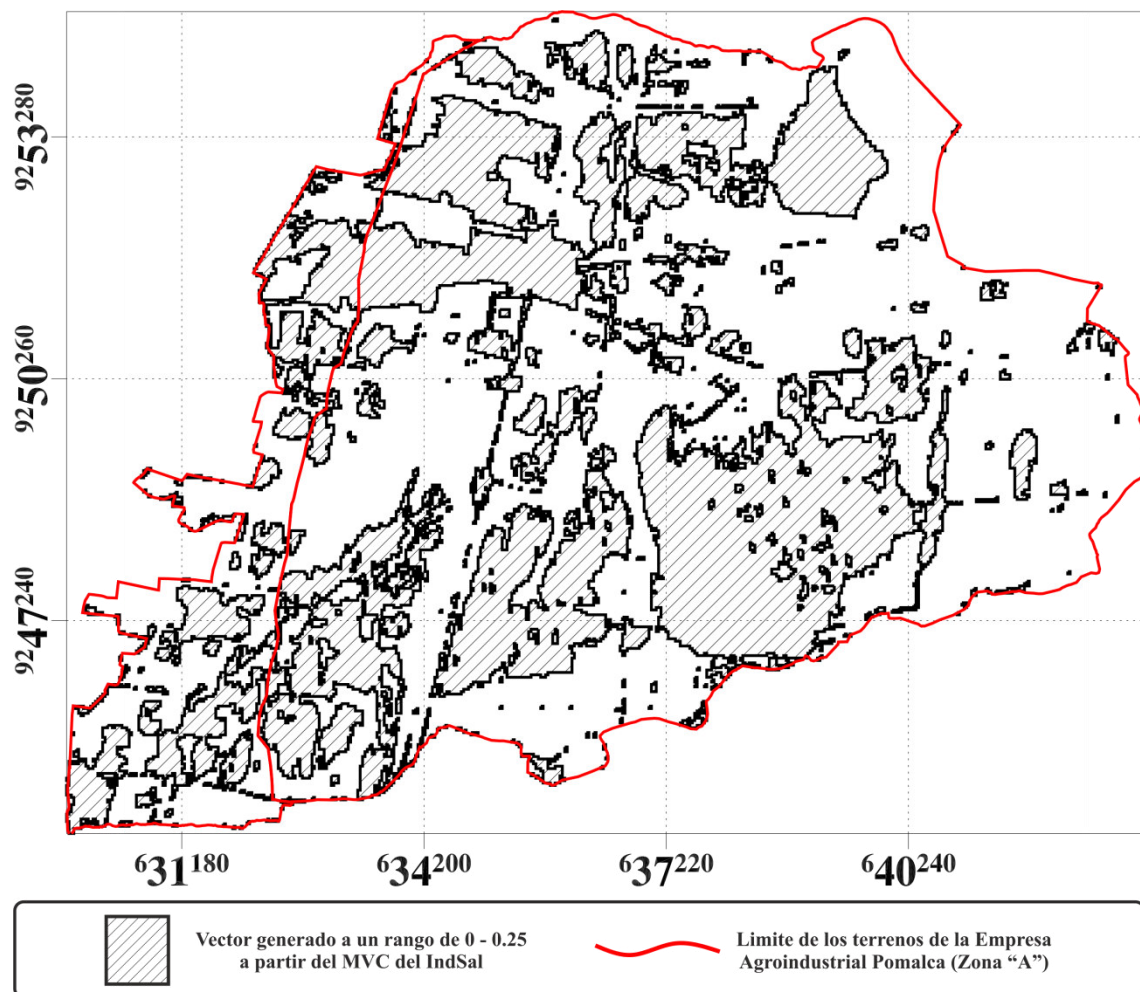


Figura 5.10. Vector (*Shapefile*) generado a un rango de 0 a 0.25 del MVC de IndSal, periodo 2007-2010 (Zona "A"). Proyección UTM, coordenadas en metros.

Para identificar y visualizar con mayor detalle se utiliza la imagen de alta resolución espacial ($10\text{ m} \times 10\text{ m}$) del sensor HRG-2 del satélite SPOT-5, para cuyo fin se superpuso el vector generado a partir de la imagen del máximo valor compuesto del IndSal sobre la imagen de alta resolución HRG-2, de este modo se distingue áreas con cultivo de la caña de azúcar y sin cultivo en buen estado, áreas afectados por la salinidad del suelo, cerros y ciudades, como es ilustrado en la Figura 5.11.

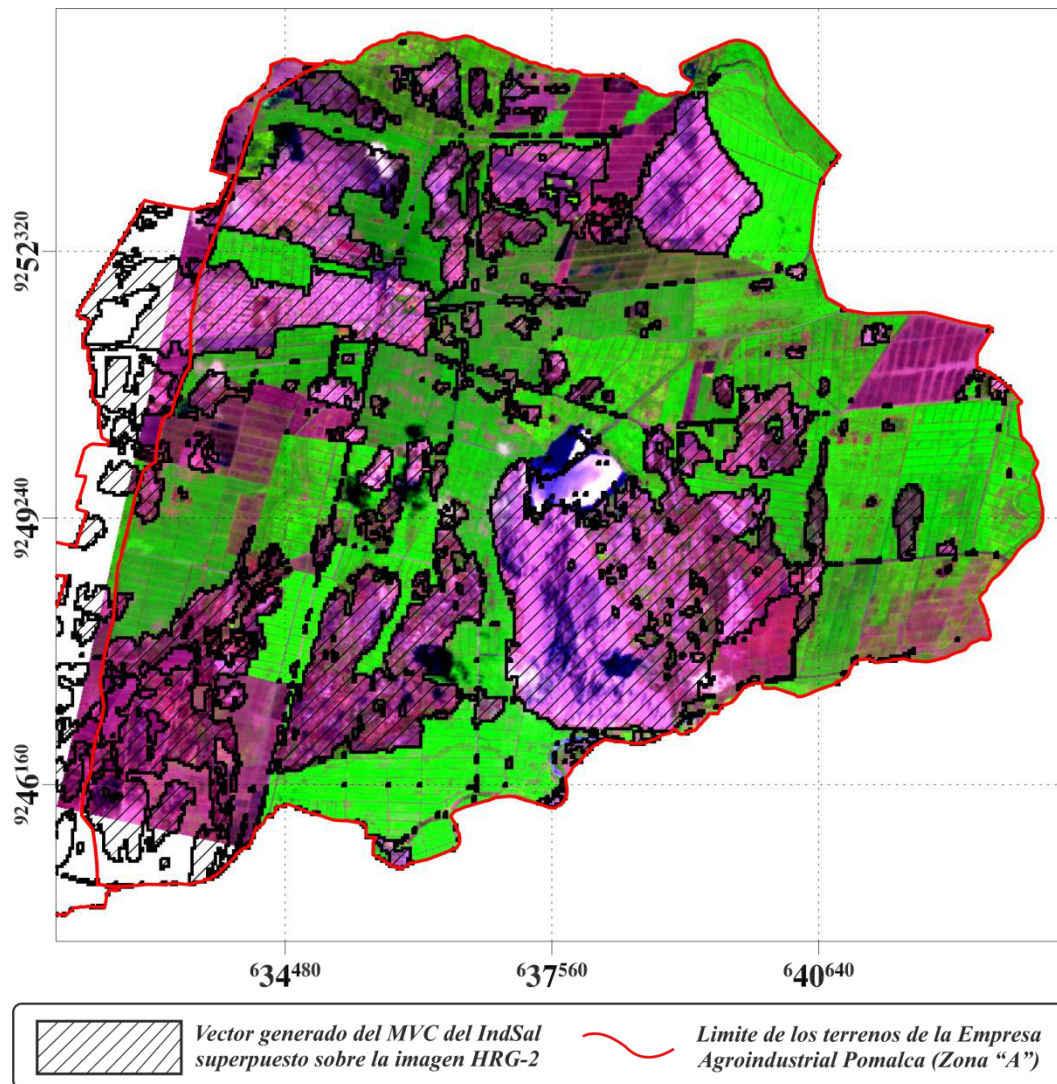


Figura 5.11. Imagen RGB=432 del sensor HRG-2 superpuesta con el vector generado del MVC IndSal (zona “A”). Proyección UTM, coordenadas en metros.

5.2.4 Variación del NDVI en el tiempo para la zona “A”

La variación temporal de imágenes de satélite Landsat de alta resolución espacial es una solución rentable y de alta calidad para evaluar la dinámica o seguimiento de la producción agrícola, por esta razón analizamos la variación del NDVI en el tiempo en áreas con problemas de salinidad detectadas por el máximo valor compuesto del IndSal y en áreas no afectadas, las imágenes utilizadas fueron de los satélites Landsat-5 y Landsat-7 un total de 74 imágenes desde el año de 1999 a 2012 mostrada en la Tabla 3.1 y se calculó el NDVI de cada imagen utilizando la ecuación (4.6). Para cuyo efecto se ubicaron 7 puntos de forma al azar como se muestra en la Figura 5.12 cuyas coordenadas UTM aproximadas se muestran en la siguiente Tabla 5.1. Los valores del NDVI,

para analizar la variación en el tiempo fueron extraídos de un promedio de 3×3 píxeles, donde las coordenadas mencionadas en la Tabla 5.1 corresponden al píxel central.

Punto	E(m)	N(m)
A	632955.00	9246145.00
B	634245.00	9252205.00
C	638475.00	9253465.00
D	633915.00	9250705.00
E	637575.00	9251845.00
F	639255.00	9248605.00
G	637635.00	9249955.00

Tabla 5.1. Coordenadas UTM de los puntos en la zona “A”.

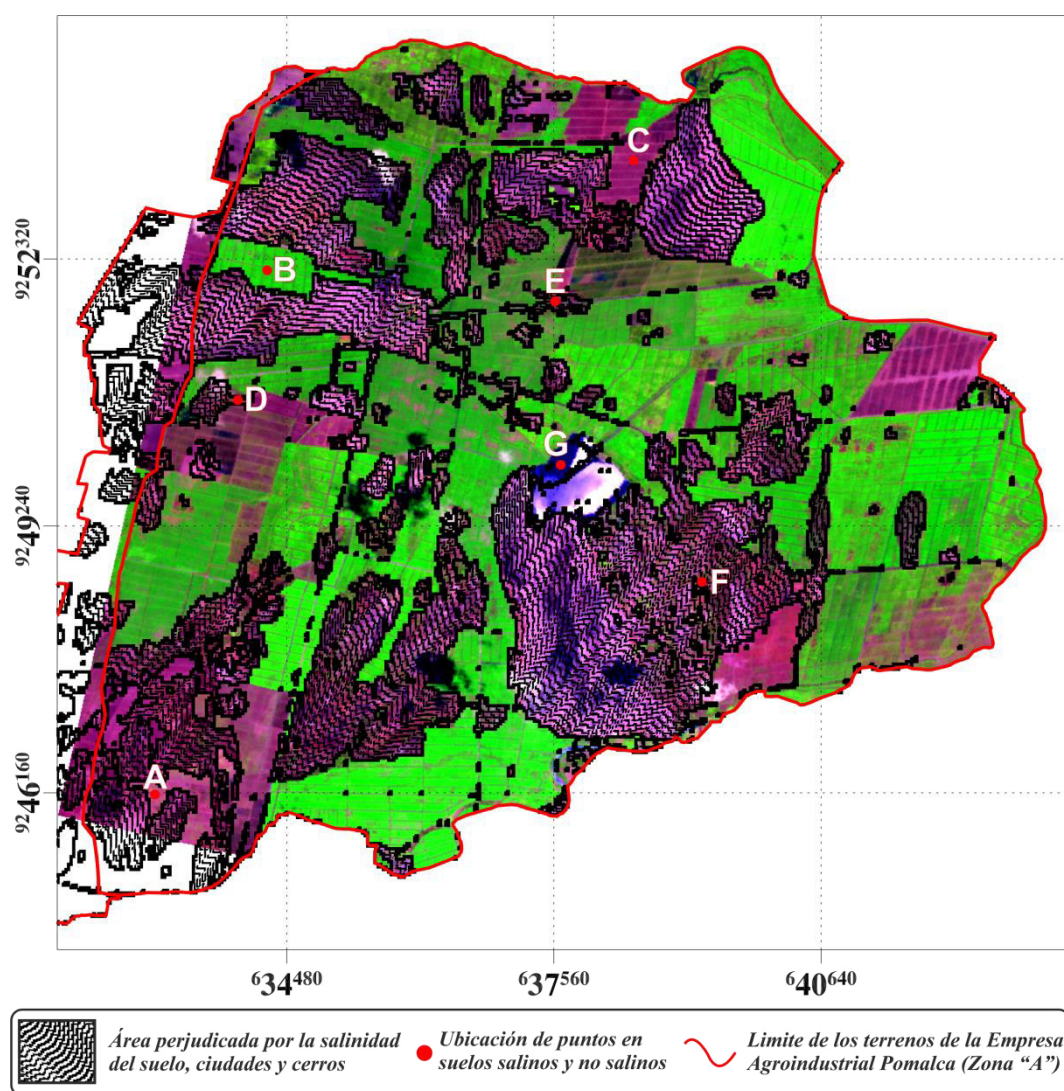


Figura 5.12. Ubicación de puntos en suelos salinos y no salinos en la imagen HRG-2 detectados por el MVC del IndSal (zona “A”). Proyección UTM, coordenadas en metros.

Los puntos **A**, **B** y **C** de la Figura 5.12, se tomaron en áreas de cultivo de caña de azúcar sin problemas de salinidad donde **A** y **C** corresponden a suelos desnudos sin cultivo de caña de azúcar como se muestra en la Figura 5.12, al analizar la variación del NDVI en el tiempo de estos puntos mostrados en la Figura 5.13 el NDVI toma valores altos superando la línea de color rojo, ubicada a 0.35 NDVI. Este nivel de NDVI indica que la producción de caña de azúcar se encuentra en buenas condiciones, por lo tanto, el suelo no presenta problemas de salinidad. El punto **B** se tomó en un área con cultivo de caña de azúcar. Al analizar la variación del NDVI en el tiempo se muestra el mismo comportamiento que los puntos **A** y **C**. La línea de color rojo (ubicada a un valor de 0.35) indica que superior a ella podemos hablar de buenos cultivos de caña de azúcar e inferior a ellas cultivos de caña de azúcar en mal estado.

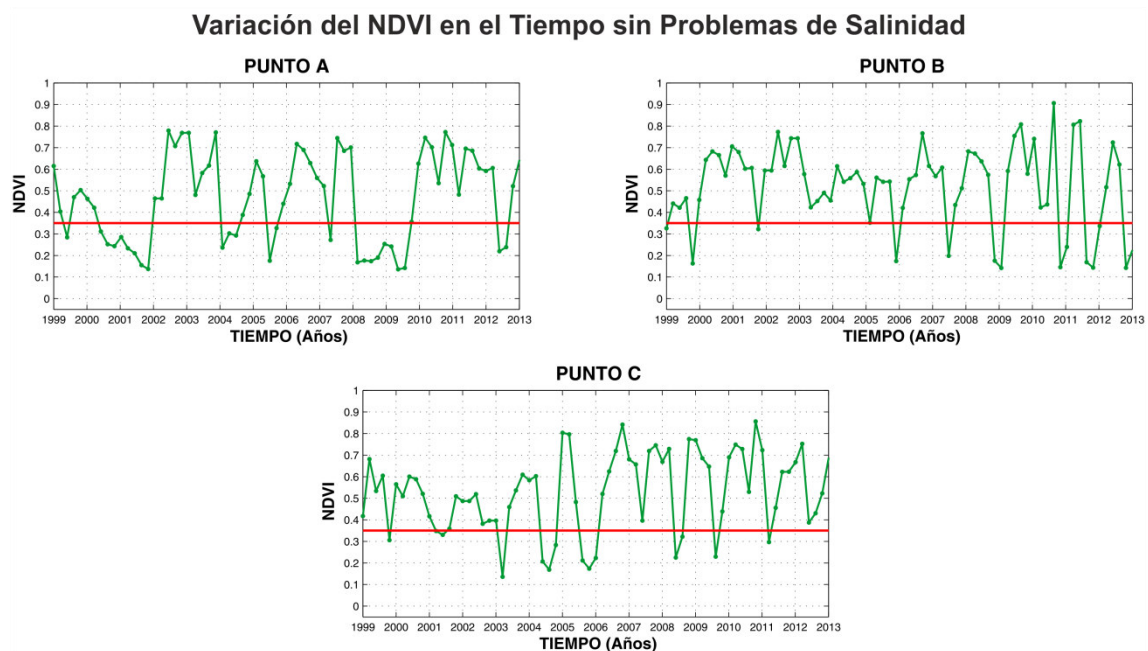


Figura 5.13. Variación mensual del NDVI (1999 - 2013) de los puntos **A**, **B** y **C** de la Figura 5.12. La línea roja, ubicada a 0.35 NDVI. Valores superiores a la línea roja, son cultivos de caña de azúcar en buen estado y valores inferiores son cultivos en mal estado o suelos en descanso para la fecha (zona “A”).

Los puntos **D**, **E** y **F** de la Figura 5.12, corresponden a áreas con problemas de salinidad. En la Figura 5.14, se muestran valores mensuales del NDVI para el periodo 1999 – 2013. Los valores del NDVI en el punto **D** superan la línea de color rojo que se encuentra a 0.35 NDVI pero inferior a 0.6 esto indica que el cultivo no es óptimo. Es un cultivo en regular estado. En el caso de los puntos **E** y **F** los valores de NDVI no supera la línea de color roja ubicada a 0.35 NDVI,

esto indica que no hay cultivos de caña de azúcar y en los últimos años el NDVI disminuye, esto indica que el problema de la salinidad del suelo es progresivo en el tiempo.

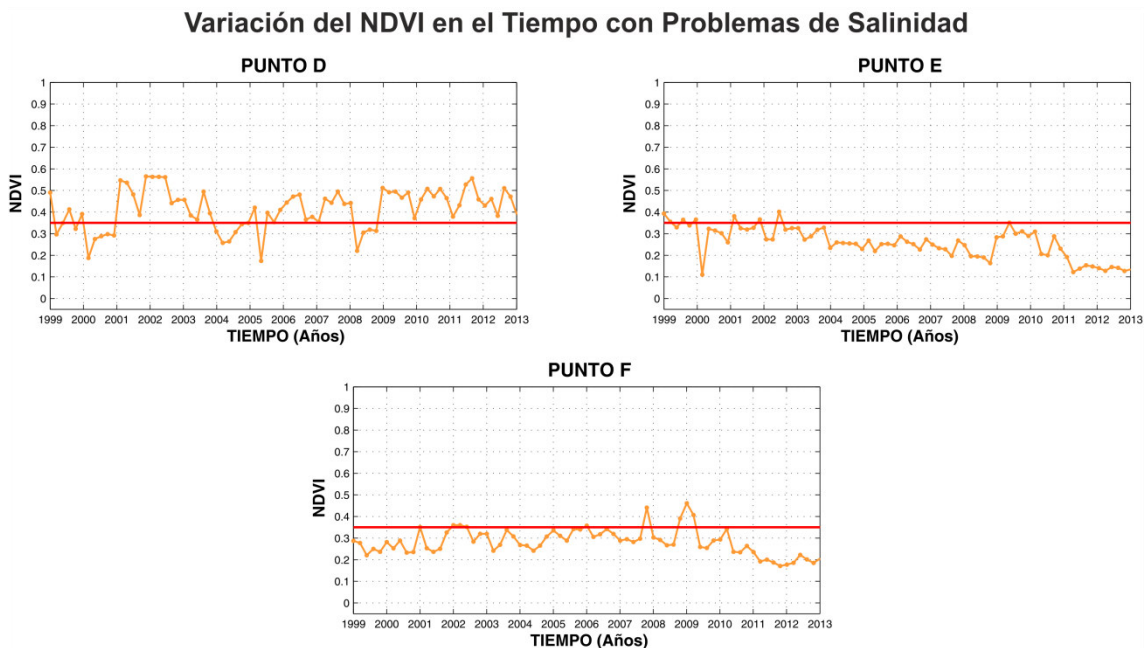


Figura 5.14. Variación mensual del NDVI (1999 - 2013) de los puntos **D**, **E** y **F** de la Figura 5.12. La línea roja, ubicada a 0.35 NDVI. Valores inferiores a la línea roja, carecen de cultivos de caña de azúcar a causa de la salinidad del suelo (zona “A”).

El punto **G** de la Figura 5.12, fue ubicado en el reservorio Boro con la finalidad de ver el comportamiento del NDVI en cuerpos de agua. La Figura 5.15 muestra que el NDVI toma valores negativos que es acorde a la literatura según *Gilabert et al.* (1997).

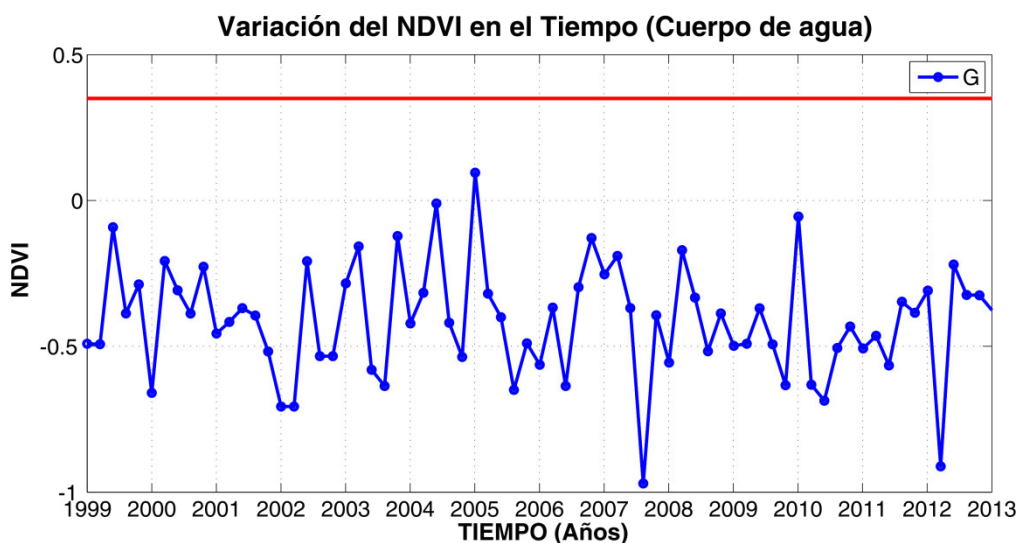


Figura 5.15. Variación del NDVI en el tiempo del puntos **G** de la Figura 5.12, que corresponde a un cuerpo de agua, toma valores negativos.

5.2.5. Máximo valor compuesto de 15 imágenes de NDVI 2007 a 2010 para la zona “B”

Se realizó el mismo procedimiento que en la zona “A”, la Figura 5.16 representa el máximo valor compuesto del NDVI de la zona “B”, para poder observar las tierras cultivadas y no cultivadas durante el periodo de 2007 a 2010. Mediante un análisis visual del máximo valor compuesto los valores más altos del NDVI representan a cultivos de caña de azúcar en un buen estado con suelos sin problemas de salinidad y los valores bajos del NDVI representan áreas de cultivo con problemas de salinidad del suelo o puede ser poblaciones.

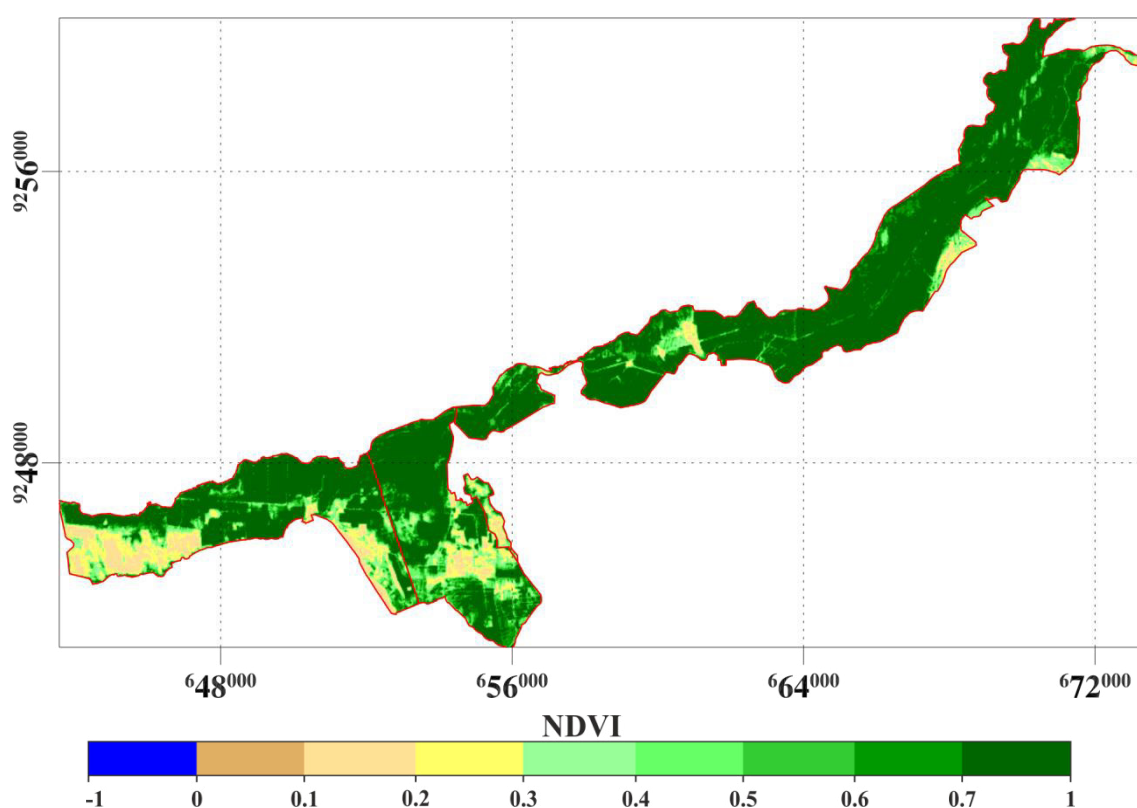


Figura 5.16. Máximo valor compuesto del INDVI periodo 2007-2010 (zona “B”).
Proyección UTM, coordenadas en metros.

5.2.6. Máximo valor compuesto de 15 imágenes de IndSal 2007 a 2010 para la zona “B”

La Figura 5.17 muestra el máximo valor compuesto de las 15 imágenes de IndSal. Se observa en la imagen dos tipos de coberturas la parte más clara representa a tierras de cultivo de la caña de azúcar y las manchas oscuras representan tierras afectadas por la salinidad del suelo o áreas sin presencia de vegetación como cerros, ciudades y caminos.

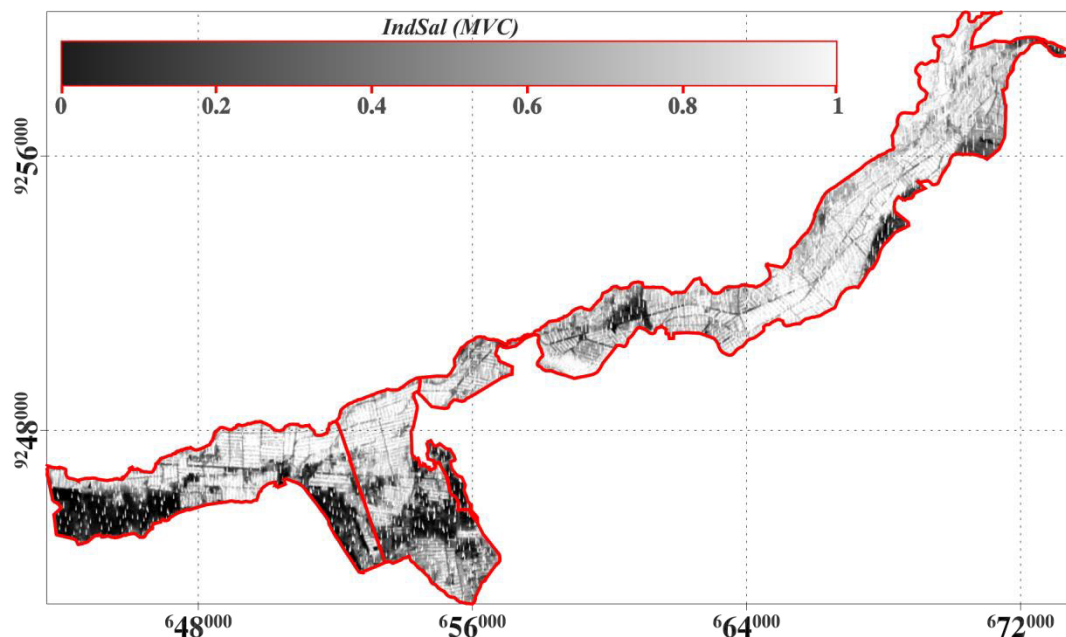


Figura 5.17. Máximo valor compuesto de IndSal periodo 2007 - 2010 (zona "B"). Proyección UTM, coordenadas en metros.

En la Figura 5.18 se clasificó en dos clases a la imagen del máximo valor compuesto de IndSal uno de color rojo a un umbral de 0 a 0.25 que representan a áreas perjudicadas por la salinidad, poblaciones, caminos y cerros que representa aproximadamente 1701.45 ha (24.42 %), y la parte más clara que representa las parcelas de los cultivos de la caña de azúcar que representan un aproximado de 5265 ha (75.585 %).

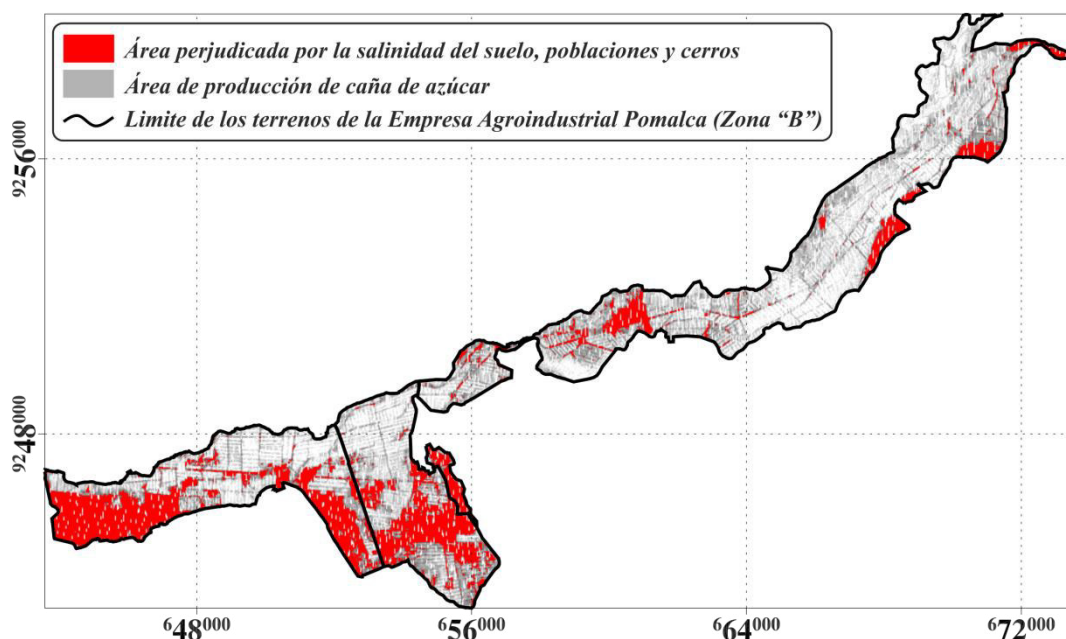


Figura 5.18. Detección de las áreas salinas, cerros y ciudades a un rango de 0 a 0.25 del MVC de IndSal (zona "B"). Proyección UTM, coordenadas en metros.

A partir de la Figura 5.18, se generó un vector (*Shapefile*) a un rango de 0 a 0.25, que representan a las áreas perjudicadas por la salinidad, suelos en descanso, poblaciones y caminos. Para poder identificar con mayor detalle se da uso de la imagen de alta resolución ($10\text{ m} \times 10\text{ m}$) del sensor HRG-2 del satélite SPOT-5 para cuyo propósito se superpuso el vector generado sobre la imagen de alta resolución HRG-2, de este modo se distingue las áreas del cultivo de la caña de azúcar en buen estado, áreas afectados por la salinidad y poblaciones como se ilustra en la Figura 5.19.

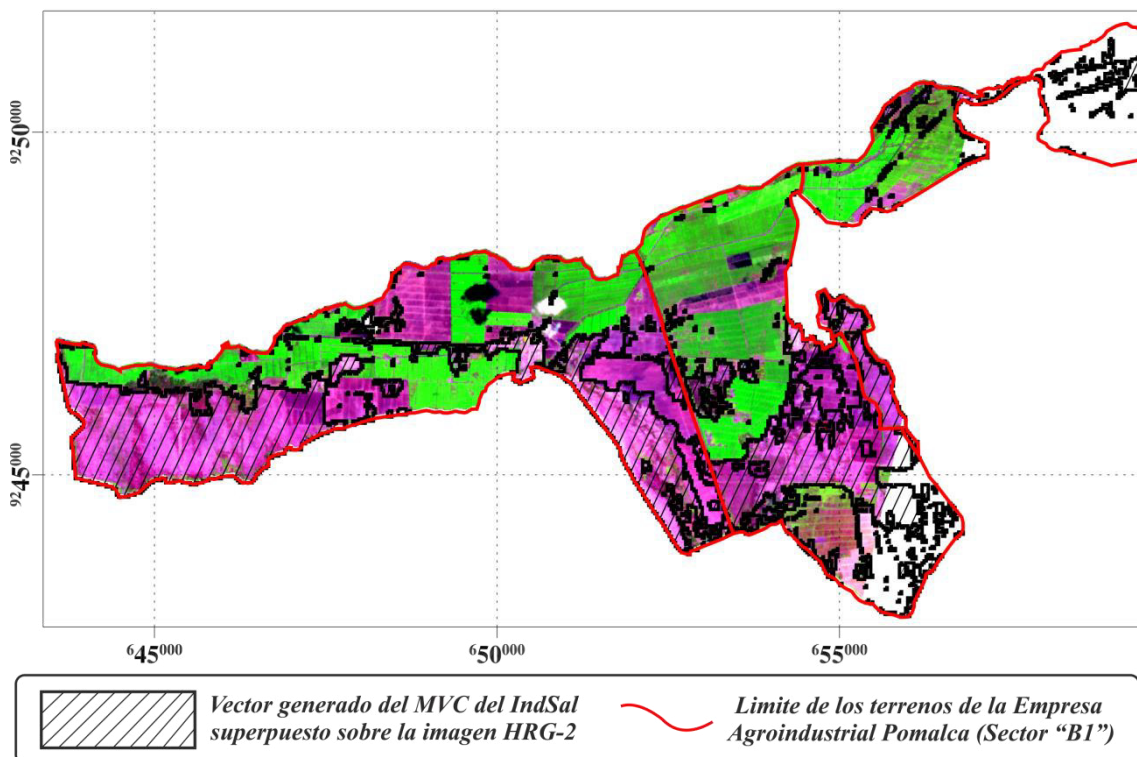


Figura 5.19. Imagen RGB=432 del sensor HRG-2 superpuesta con el vector generado del MVC de IndSal (sector "B1", Figura 5.5). Proyección UTM, coordenadas en metros.

5.2.7. Variación del NDVI en el tiempo para la zona "B"

De forma similar que en la zona "A", se analiza la variación del NDVI a partir de imágenes de alta resolución espacial para el seguimiento de la dinámica del cultivo de la caña de azúcar. Por esta razón, se analiza la variación del NDVI en el tiempo en áreas con problemas de salinidad del suelo y en suelos óptimos para el cultivo, detectadas por el máximo valor compuesto (MVC) del IndSal. Mediante este procedimiento, se analiza el estado de las tierras de cultivo agrícola. Las imágenes utilizadas fueron del sensor TM y ETM+ un total

de 74 imágenes desde el año de 1999 a 2012 que se muestra en la Tabla 3.1 y se calculó el NDVI de cada imagen utilizando la ecuación (4.6). Para cuyo efecto se ubicaron 8 puntos en suelo salino y no salino como se muestra en la Figura 5.20 cuyas coordenadas UTM aproximadas se muestran en la Tabla 5.2. Los valores del NDVI, para analizar la variación en el tiempo fueron extraídos de un promedio de 3×3 píxeles, donde las coordenadas mencionadas en la Tabla 5.2 corresponden al píxel central.

Punto	E(m)	N(m)
A	652254.937	9247199.114
B	655234.937	9245039.114
C	655164.937	9247289.114
D	655714.937	9250299.114
E	646264.937	9246679.114
F	652214.937	9246469.114
G	654914.937	9244309.114
H	654894.937	9249209.114

Tabla 5.2. Coordenadas UTM de los puntos del sector “B1”.

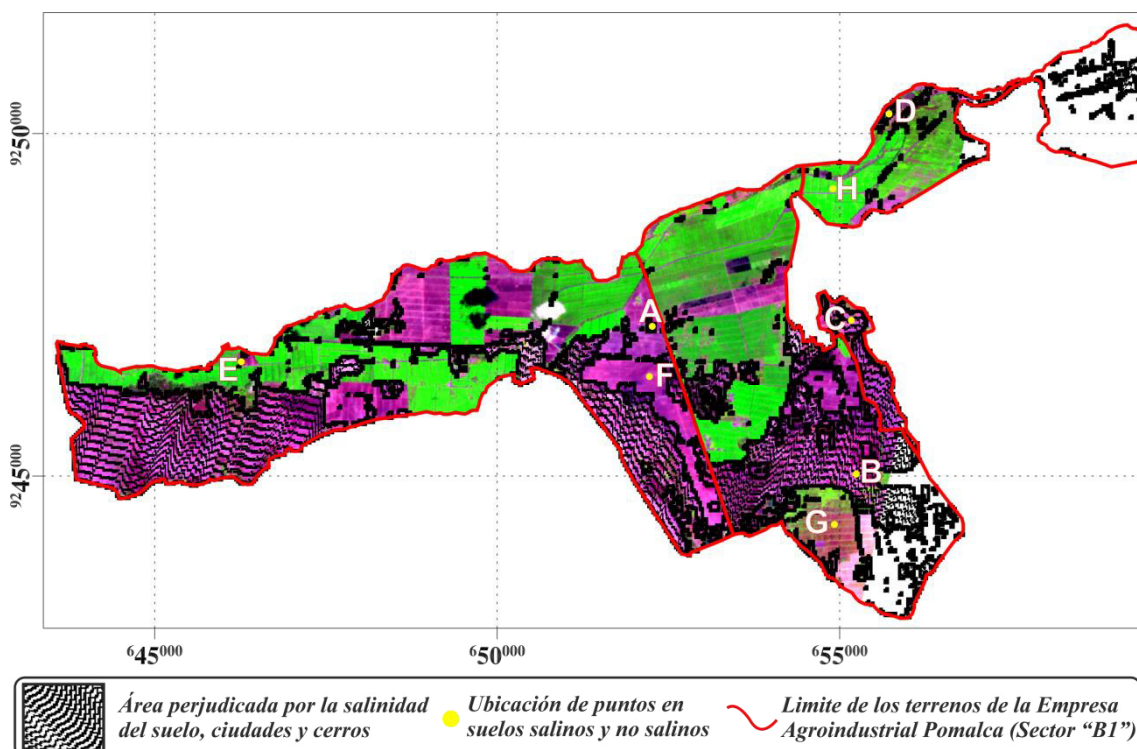


Figura 5.20. Ubicación de los puntos en áreas salinas y no salinas en la imagen HRG-2 detectado por el MVC del IndSal (sector “B1”, Figura 5.5). Proyección UTM, coordenadas en metros.

Los puntos **A**, **B**, **C** y **D** de la Figura 5.20, se tomaron en áreas clasificadas con problemas de salinidad del suelo. Los valores del NDVI en el tiempo de los puntos **A**, **B** y **C**, mostradas en la Figura 5.21, no superan la línea de color roja ubicado a 0.35 NDVI, por esta razón estos suelos presentan problemas de salinidad. Para el caso del punto **D** los valores de NDVI superan la línea de color roja en algunos meses, con poca frecuencia esto muestra que la producción del cultivo de la caña de azúcar no es óptima es decir que los suelos presentan un elevado grado de salinidad.

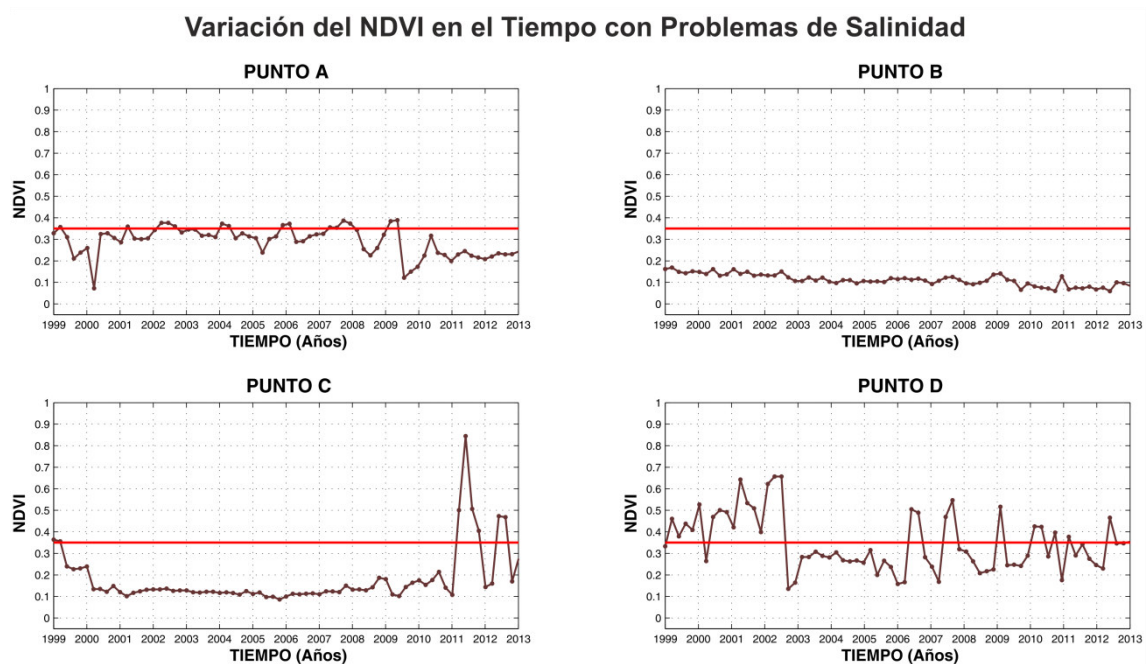


Figura 5.21. Variación mensual del NDVI (1999 - 2013) de los puntos **A**, **B**, **C** y **D** de la Figura 5.20. La línea roja, ubicada a 0.35 NDVI indica valores inferiores a ella, no hay cultivos de caña de azúcar o cultivos de caña de azúcar en mal estado a causa de la salinidad del suelo (sector “B1”, Figura 5.5).

Los puntos **E**, **F**, **G** y **H** de la Figura 5.20, corresponden a áreas de cultivo sin problemas de salinidad. En la Figura 5.22, se muestra la variación del NDVI en el tiempo. Los valores de NDVI superan la línea de color rojo que se encuentra a 0.35 NDVI, esto indica que el cultivo es óptimo por lo tanto las tierras no presentan problemas de salinidad. En el punto **G** la variación del NDVI cuenta con dos intervalos que no superan la línea de color rojo, esto puede ser debido a que las tierras de cultivo se encuentran en descanso o presentan problemas de salinidad.

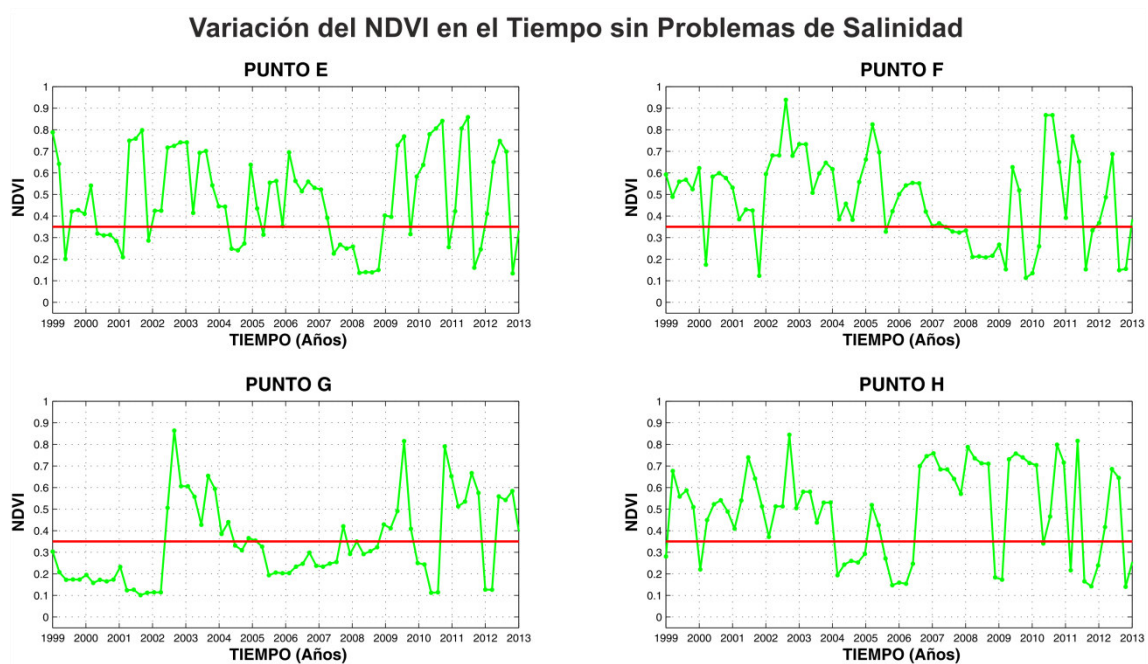


Figura 5.22. Variación mensual del NDVI (1999 - 2013) de los puntos **E**, **F**, **G** y **H** de la Figura 5.20. La línea roja, ubicada a 0.35 NDVI indica valores superiores a ella son cultivos de caña de azúcar en buen estado e inferior cultivos en mal estado a causa de la salinidad del suelo (sector “B1”, Figura 5.5).

5.3. Histograma de frecuencia de la conductividad eléctrica del suelo

En la Figura 5.23 se presenta el histograma de los 1108 datos de conductividades eléctricas del suelo, analizadas en el laboratorio de suelos de la Empresa Agroindustrial Pomalca, las muestras de campo se tomaron en los años 2008 y 2009. La salinidad se clasificó según la Tabla 1.1 en 5 clases. Para la clase No Salina se obtuvo 889 muestras, para la clase Ligeramente Salino se obtuvo de 126 muestras, para la clase Moderadamente Salino se obtuvo 57 muestras, para la clase Fuertemente Salino se obtuvo 26 muestras y para la clase Extremadamente Salino se obtuvo 10 muestras.

Del histograma mostrado, se observa que el 82.23% de muestras extraídas de suelo de las parcelas de cultivo de caña de azúcar fueron de suelos no salinos, es decir de suelos óptimos para la producción de la caña de azúcar.

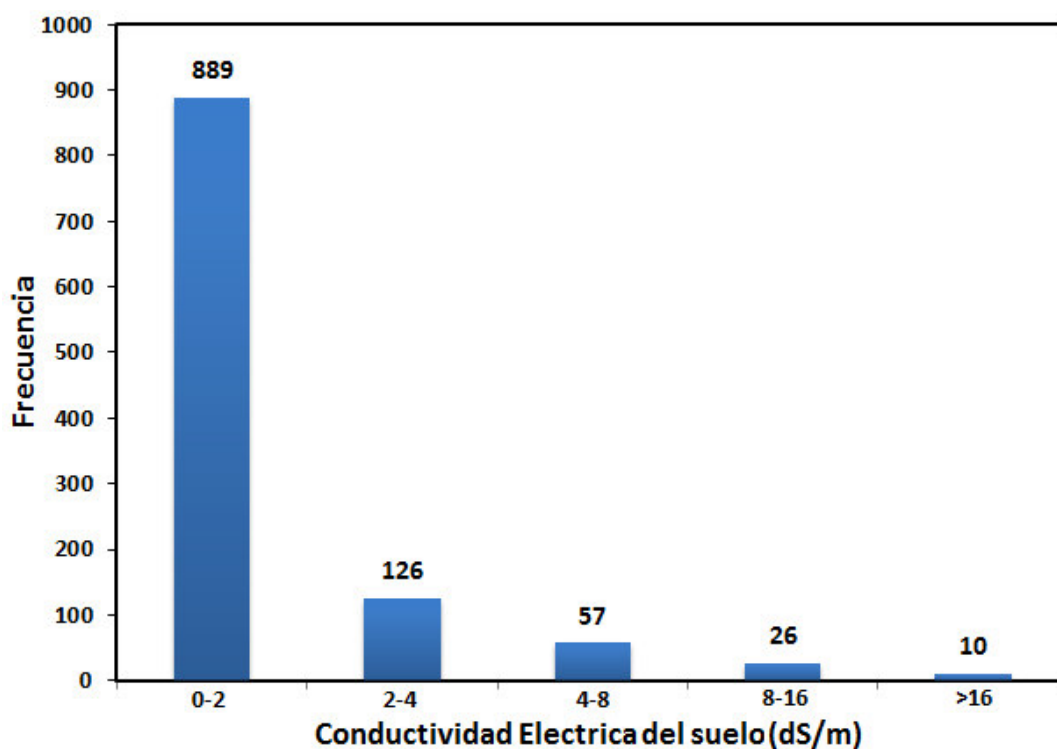


Figura 5.23. Histograma de las 1108 muestras de CE del suelo analizadas en laboratorio de suelos.

En la Tabla 5.3 se representa la clasificación de la salinidad del suelo según el rango de CE del suelo y su representación porcentual de las muestras de suelo analizadas en el laboratorio de suelos según el rango de CE del suelo.

CE (dS/m)	Clase de salinidad	Representación porcentual	N° de muestras
0-2	No salino	80.23%	889
2-4	Ligeramente salino	11.37%	126
4-8	Moderadamente salinos	5.14%	57
8-16	Fuertemente salinos	2.35%	26
>16	Extremadamente salinos	0.90%	10

Tabla 5.3. Representación porcentual de los datos de CE del suelo.

5.4. Estimación de la salinidad a partir de los valores de reflectancia espectral de las bandas B1, B2, B3 y B4 de la imagen del sensor TM del satélite Landsat-5 de fecha 20/04/2008

Para estimar la salinidad del suelo, se correlacionaron los valores de reflectancia espectral de las bandas B1, B2, B3 y B4 del sensor TM con los valores de CE (dS/m) del suelo determinadas en el laboratorio de suelos,

generando modelos de regresión lineal simple y múltiple, de esta forma poder clasificar por rangos de salinidad del suelos a la imagen generada por la regresión lineal múltiple.

La Figura 5.24 muestra la ubicación de sitios de las muestras de suelos extraídas para su análisis de la CE del suelo en el laboratorio; tomadas en los meses de Marzo, Abril y Mayo del 2008 (Anexo C – Tabla C.2). La ubicación de los puntos de muestreo se representa en una imagen del sensor TM del satélite Landsat-5 de fecha 20/04/2008 en una combinación de color verdadero RGB-321 (bandas 3, 2, y 1). Estos puntos de muestreo se ubicaron en la imagen por sus coordenadas UTM de cada muestra de suelo extraída, con la ayuda del software ENVI.

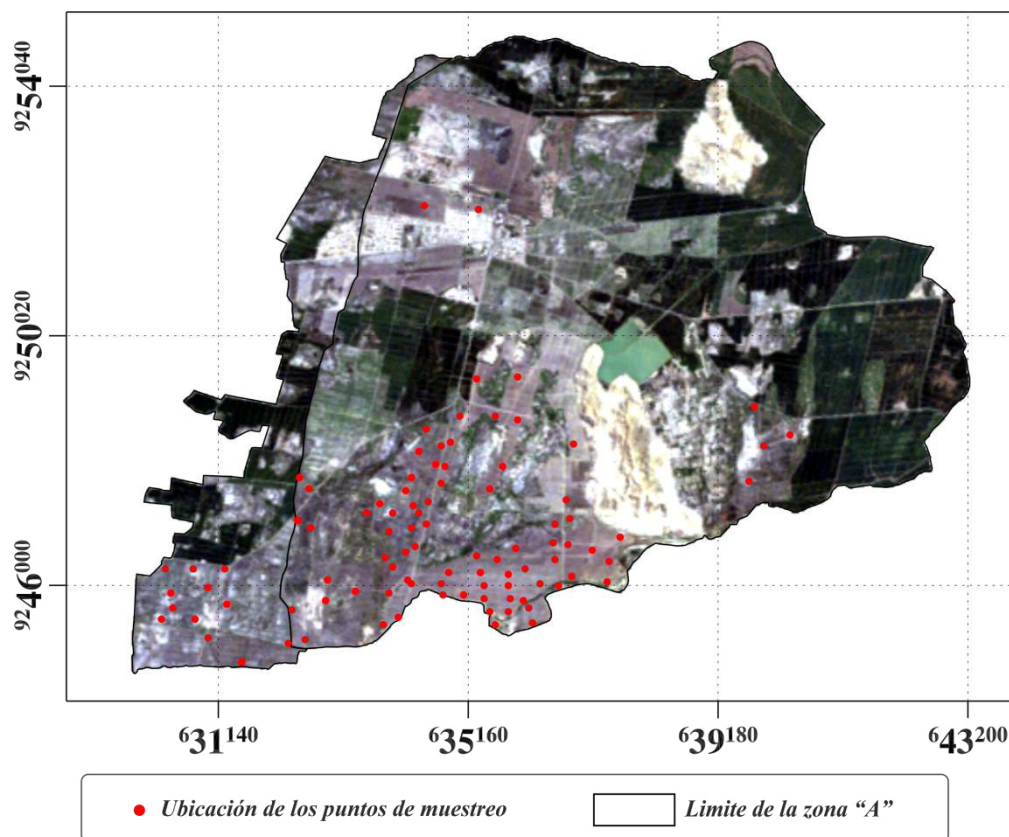


Figura 5.24. Ubicación de los puntos de muestreo del suelo (rojo) extraídas para el análisis de la CE del suelo en el laboratorio para la zona “A”, en Imagen RGB=321 del sensor TM de fecha 20/04/2008. Proyección UTM, coordenadas en metros.

Extracción de los valores de reflectancia espectral

Para obtener los valores de reflectancia espectral del suelo (ρ_{suelo}) de cada punto de muestreo, se utilizó las coordenadas UTM de cada muestra de campo

tomados en los meses de Marzo, Abril y Mayo del 2008 que se muestra en el Anexo C (Tabla C.2), de esta forma se ubicaron en la imagen de reflectancia para luego extraer los valores de los píxeles que representan la ubicación de estos puntos, este proceso fue realizado con la ayuda del lenguaje de programación IDL. La metodología tomada para la extracción de los valores de la reflectancia fue de un promedio de 3×3 píxeles donde las coordenadas de las muestras corresponden al pixel central, el resultado se muestra en el Anexo C de la Tabla C.2.

La Figura 5.25, muestra cuatro imágenes de reflectancia espectral del suelo de las bandas 1, 2, 3 y 4 del sensor TM/Landsat-5 de fecha 20/04/2008 con sus respectivos histogramas de frecuencia, para la zona "A". En a) de la Figura 5.25 muestra la banda 1, que corresponde a la longitud de onda $0.45 - 0.52 \mu m$ (Azul) con valor mínimo de 0.005, valor máximo de 0.188 y describe una distribución bimodal con valor medio de la primera modal de 0.023 que representan a cultivos de caña de azúcar y valor medio de la segunda modal de 0.063 que corresponden a tierras sin cultivo; b) de la Figura 5.25 muestra la banda 2, que corresponde a la longitud de onda $0.52 - 0.60 \mu m$ (Verde) con valor mínimo de 0.021, valor máximo de 0.284 y describe una distribución bimodal con valor medio de la primera modal de 0.052 que corresponden a cultivos de caña de azúcar y valor medio de la segunda modal de 0.087 que representan tierras sin cultivo; c) de la Figura 5.25 muestra la banda 3, que corresponde a la longitud de onda $0.63 - 0.69 \mu m$ (Rojo) con valor mínimo de 0.015, valor máximo de 0.344 y describe una distribución bimodal con valor medio de la primera modal de 0.040 que corresponden a cultivos de caña de azúcar y valor medio de la segunda modal de 0.107 que representan tierras sin cultivo; d) de la Figura 5.25 muestra la banda 4 que corresponde a la longitud de onda $0.76 - 0.90 \mu m$ (Infrarrojo cercano) con valor mínimo de 0.019, valor máximo de 0.527 y describe una distribución trimodal con valor medio de la primera modal de 0.026 que representan cuerpos de agua, valor medio de la segunda modal de 0.175 que corresponden a tierras sin cultivo y valor medio de la tercera modal es 0.334 que representan a cultivos de caña de azúcar.

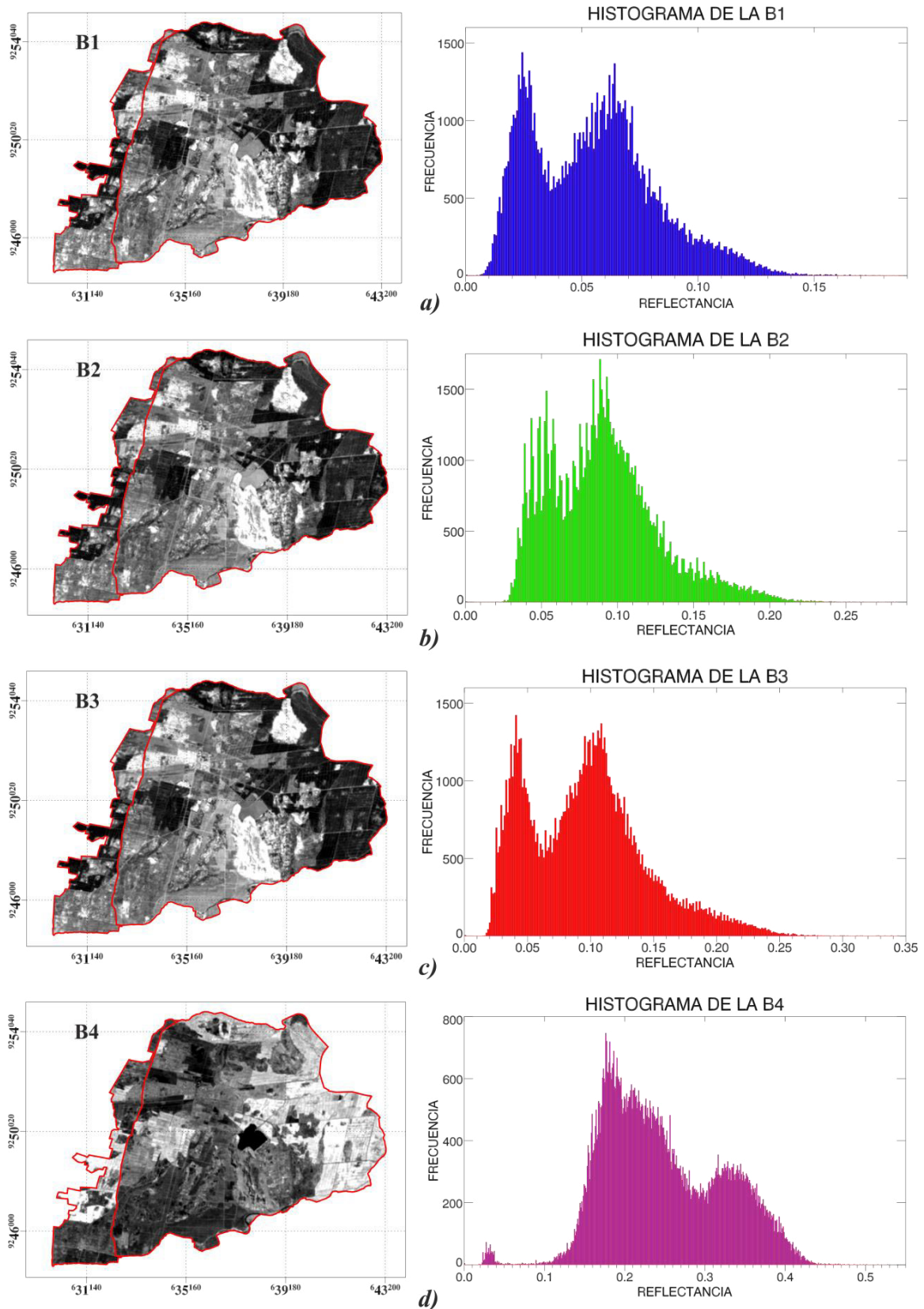


Figura 5.25. a), b), c) y d) Imágenes de reflectancia de la superficie para las banda 1, 2, 3 y 4 del sensor TM del satélite Landsat-5 de fecha 20/04/2008 con sus respectivas histogramas de frecuencia. Proyección UTM, coordenadas en metros (zona "A").

Modelos de regresión lineal simple entre la CE del suelo vs los valores de reflectancia de las bandas B1, B2, B3 y B4 del sensor TM.

A partir de los valores de la conductividad eléctrica (CE) del suelo analizados en el laboratorio y los valores de reflectancia espectral del suelo extraídas de las imágenes de reflectancia de las bandas 1, 2, 3 y 4 del sensor TM del satélite Landsat-5 de fecha 20/04/2008, se desarrollaron los modelos estadísticos de regresión lineal simple para estimar la salinidad de los suelos. Los datos de conductividad eléctrica del suelo tomados para las regresiones lineales fueron en el rango de 0.288 dS/m a 14.3 dS/m y para los valores de reflectancia espectral del suelo extraídos de las bandas de la imagen TM, fueron tomados en un rango de: 0.044 a 0.097 (banda 1), 0.071 a 0.140 (banda 2), 0.081 a 0.163 (banda 3) y 0.124 a 0.239 (banda 4); de esta manera no se tomaron en cuenta 7 datos atípicos para las regresiones lineales simple. Con respecto a las bandas 5 y 7 no se muestran, por tener un coeficiente de determinación (R^2) menor a 0.3.

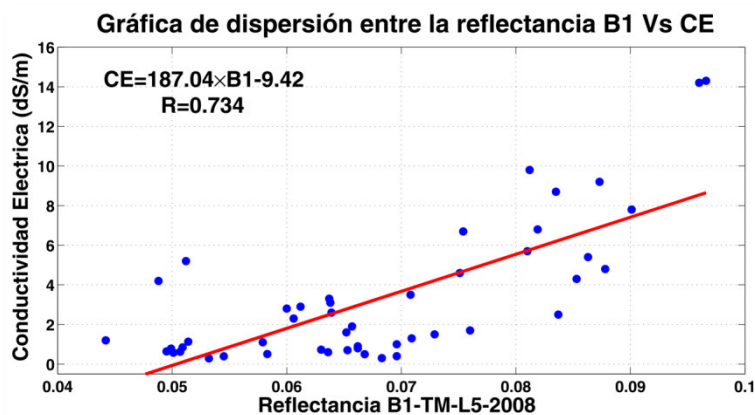
La Tabla 5.4, muestra los modelos de regresión lineal simple obtenidos a partir de los valores de CE del suelo frente a los valores de reflectancia de las bandas 1, 2, 3 y 4 mediante el método de mínimos cuadrados.

Ec.	Correlación	Modelo de regresión	R	N° de muestras	Fig. 5.26
1	CE vs Reflectancia B1	$CE = 187.04 \times B1 - 9.42$	0.734	48	a)
2	CE vs Reflectancia B2	$CE = 137.53 \times B2 - 10.72$	0.721	48	b)
3	CE vs Reflectancia B3	$CE = 115.05 \times B3 - 10.12$	0.677	48	c)
4	CE vs Reflectancia B4	$CE = 74.20 \times B4 - 10.14$	0.592	48	d)

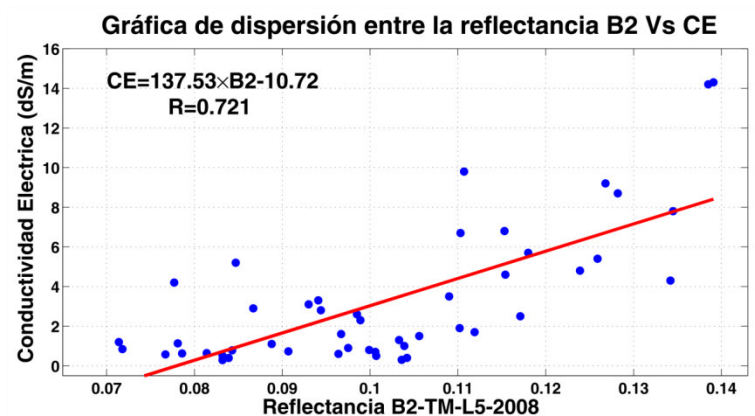
Tabla 5.4. Modelos de regresión lineal entre la reflectancia de las bandas 1, 2, 3, y 4 del sensor TM - Landsat-5 en relación a los datos de CE del suelo, mediante el método de mínimos cuadrados.

La Figura 5.26, muestra las gráficas de dispersión de la reflectancia de las bandas 1, 2, 3 y 4 del sensor TM y los valores de la CE del suelo (dS/m). Los diagramas de dispersión muestran las nubes de puntos dispersos a causa de que las tierras de estudio son muy heterogéneas y que la salinidad del suelo es muy dinámica en espacio y tiempo.

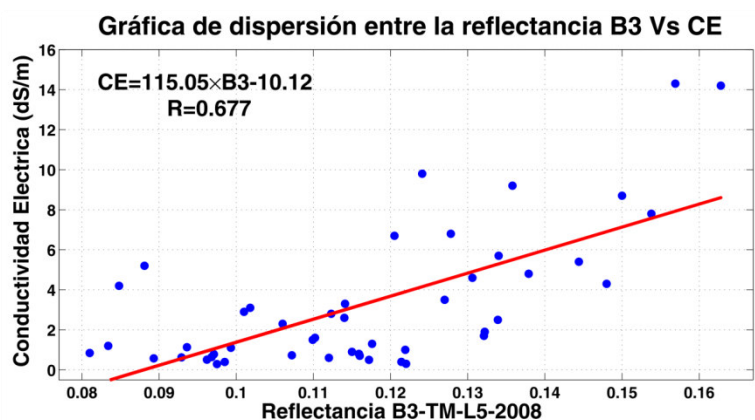
a)



b)



c)



d)

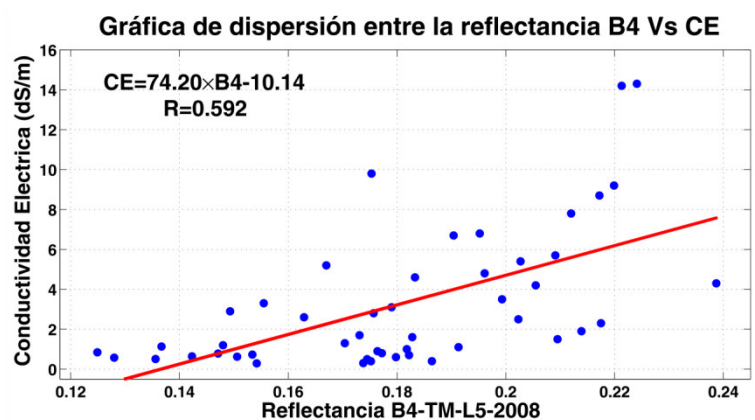


Figura 5.26. a), b), c) y d) Gráficas de dispersión entre la reflectancia de las bandas 1, 2, 3, y 4 del sensor TM del satélite Landsat-5 (20/04/2008) y la conductividad eléctrica del suelo (zona A).

Modelos de regresión lineal múltiple de la CE del suelo vs los valores de reflectancia de las bandas B1, B2, B3 y B4 del sensor TM - Landsat-5

Se elaboraron modelos de regresión lineal múltiple empleando mínimos cuadrados, para correlacionar los valores de reflectancia del suelo de las bandas B1, B2, B3 y B4 del sensor TM del satélite landsat-5 (20/04/2008). Los modelos fueron diferentes en cuanto a la magnitud de los coeficientes de las bandas y a los valores de los interceptos, con respecto a los valores de los coeficientes de correlación presentan similitud como se detalla en la Tabla 5.5.

Ec.	Ecuación	R^2	R	N°
1	$CE = 159.06 \times B1 + 21.49 \times B2 - 9.71$	0.52	0.72	48
2	$CE = 242.36 \times B1 - 38.79 \times B3 - 8.66$	0.52	0.72	48
3	$CE = 168.49 \times B1 + 12.21 \times B3 - 10.37$	0.52	0.72	48
4	$CE = 288.34 \times B2 - 137.04 \times B3 - 10.11$	0.52	0.72	48
5	$CE = 143.06 \times B1 + 172.03 \times B2 - 126.16 \times B3 - 9.25$	0.53	0.73	48
6	$CE = 191.16 \times B1 - 20.79 \times B2 + 15.10 \times B4 - 10.31$	0.51	0.71	48
7	$CE = 233.65 \times B1 - 49.96 \times B3 + 16.23 \times B4 - 9.69$	0.52	0.72	48
8	$CE = 344.27 \times B2 - 167.37 \times B3 - 18.04 \times B4 - 9.01$	0.52	0.72	48
9	$CE = 134.75 \times B1 + 189.70 \times B2 - 132.71 \times B3 - 3.52 \times B4 - 9.09$	0.52	0.72	48

Tabla 5.5. Modelos de regresión lineal múltiple para estimar la conductividad eléctrica del suelo (dS/m), a partir de la imagen de reflectancia del suelo (B1, B2, B3 y B4 del sensor TM - Landsat-5) y datos de campo de CE.

Mapa temático de la salinidad del suelo a partir de la regresión lineal múltiple

Para generar el mapa temático de la salinidad del suelo se utilizó la ecuación 5 de la Tabla 5.5 por tener el coeficiente de correlación de $R = 0.73$ y mediante el software ENVI, se asignaron a cada píxel de las sub imágenes un valor de conductividad eléctrica del suelo. Se generó una máscara de las áreas cubierta por los cultivos de caña de azúcar a partir del NDVI con un umbral mayor o igual a 0.35, luego esta mascar se aplicó a la imagen generada de la ecuación 5 de la Tabla 5.5 de esta forma solo se quedó con suelos desnudos, suelos en

barbecho o descanso, poblaciones y caminos. Para un mejor estudio se clasifico en 5 rangos según la Tabla 1.1, el área total cartografiada fue aproximadamente de 8545.05 hectáreas (ha) de los cuales se han encontrado 2561.94 ha con cultivo de caña de azúcar que es representado de color verde en la Figura 5.27, 1631.16 ha con suelo No Salino ($0 - 2 \text{ dS/m}$) que es representado de color marrón, 2179.71 ha con suelo Ligeramente Salino ($2 - 4 \text{ dS/m}$) que es representado por color azul marino, 1341.9 ha con suelo Moderadamente Salino ($4 - 8 \text{ dS/m}$) que es representado por color amarillo, 730.17 ha con suelos Fuertemente Salino ($8 - 16 \text{ dS/m}$) que es representado de color magenta, 26.91 ha con suelos Extremadamente Salino ($> 16 \text{ dS/m}$) que es representado de color rojo y 73.26 ha que representa al reservorio Boro que es representado de color cian (celeste).

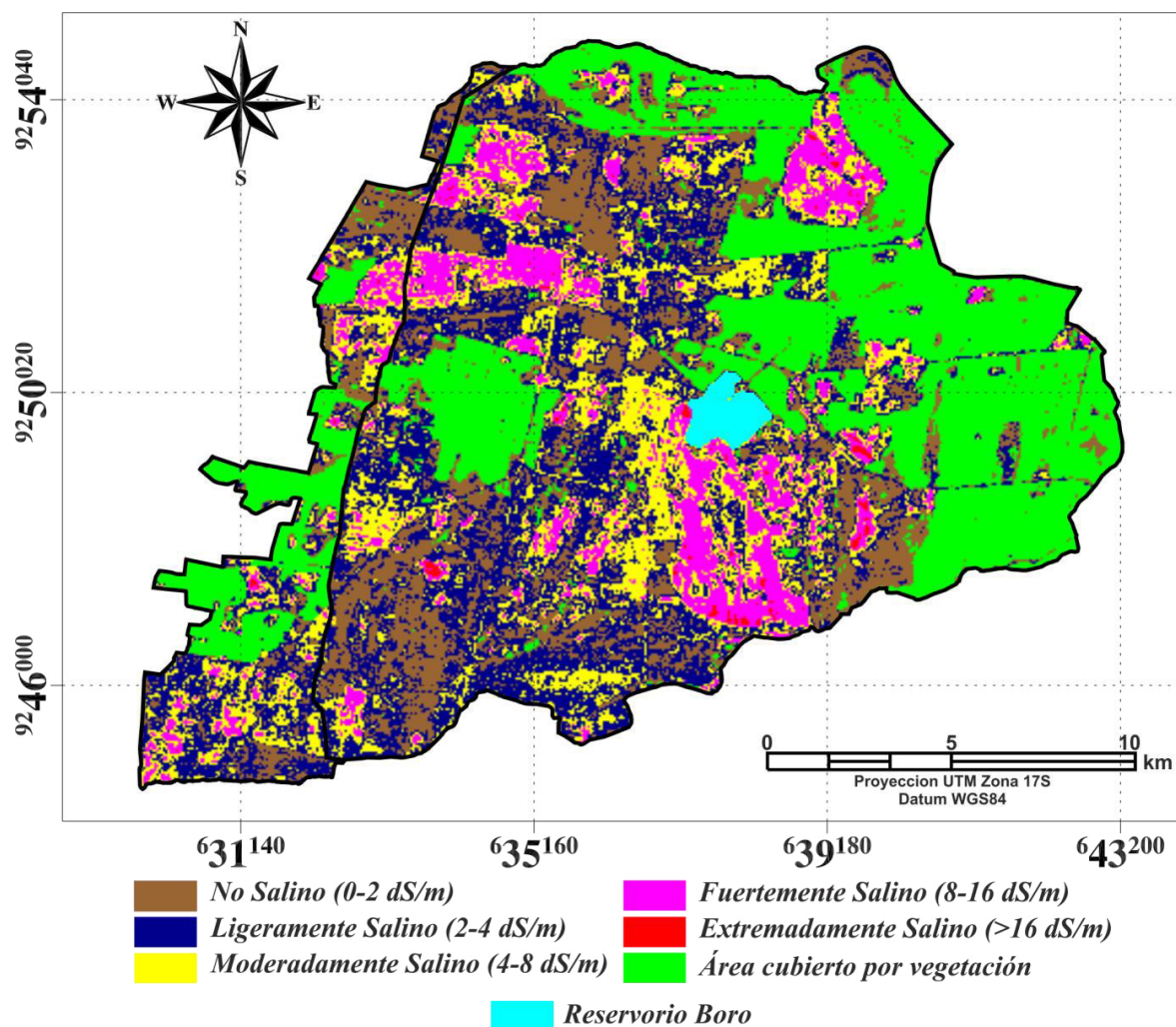


Figura 5.27. Mapa temático de la distribución de la salinidad del suelo para la zona "A". Proyección UTM, coordenadas en metros.

5.5. Análisis del mapa temático de la distribución de la salinidad mediante la variación del NDVI en el tiempo

En la Figura 5.28 se muestra la ubicación de un punto en el mapa temático de la distribución de la salinidad del suelo, cuyas coordenadas en UTM es aproximadamente (E=631305.00 m – N=9247405.00 m) que pertenece a un suelo Extremadamente Salino. Para extraer los valores del NDVI fue tomado de un promedio de 3x3 pixeles de las imágenes del NDVI y cuya coordenada mencionada corresponde al pixel central. Se observa que los valores del NDVI en el tiempo son bajos que oscilan entre los valores de 0.1 y 0.2 y no supera la línea de color rojo que indica que superior a ella son cultivos de caña de azúcar en buen estado, que está ubicado a un valor de 3.5.

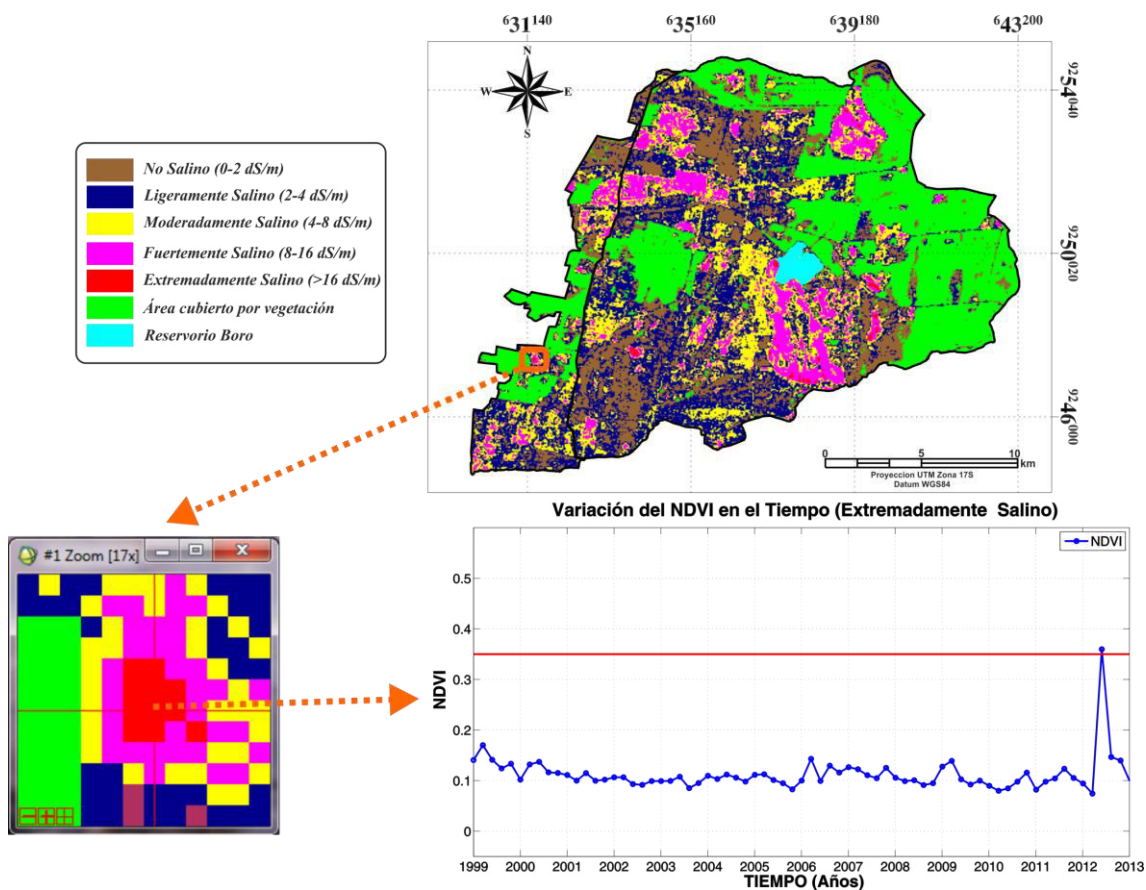


Figura 5.28. Ubicación de un área extremadamente salina de coordenadas (E=631305.00 m – N=9247405.00 m).

En la Figura 5.29 se muestra la ubicación de un punto en el mapa temático de la distribución de la salinidad del suelo, cuyas coordenadas en UTM es aproximadamente (E=639855.00 m – N=9250645.00 m) que pertenece a un suelo Fuertemente Salino. Los valores del NDVI en el tiempo oscilan entre los valores de 0.14 y 0.6, en los periodos de 1999 a 2008 el NDVI se encuentra en regular estado, pero a partir del 2008 no supera la línea de color rojo, esto indica que los cultivos se encuentran afectados por la salinidad del suelo.

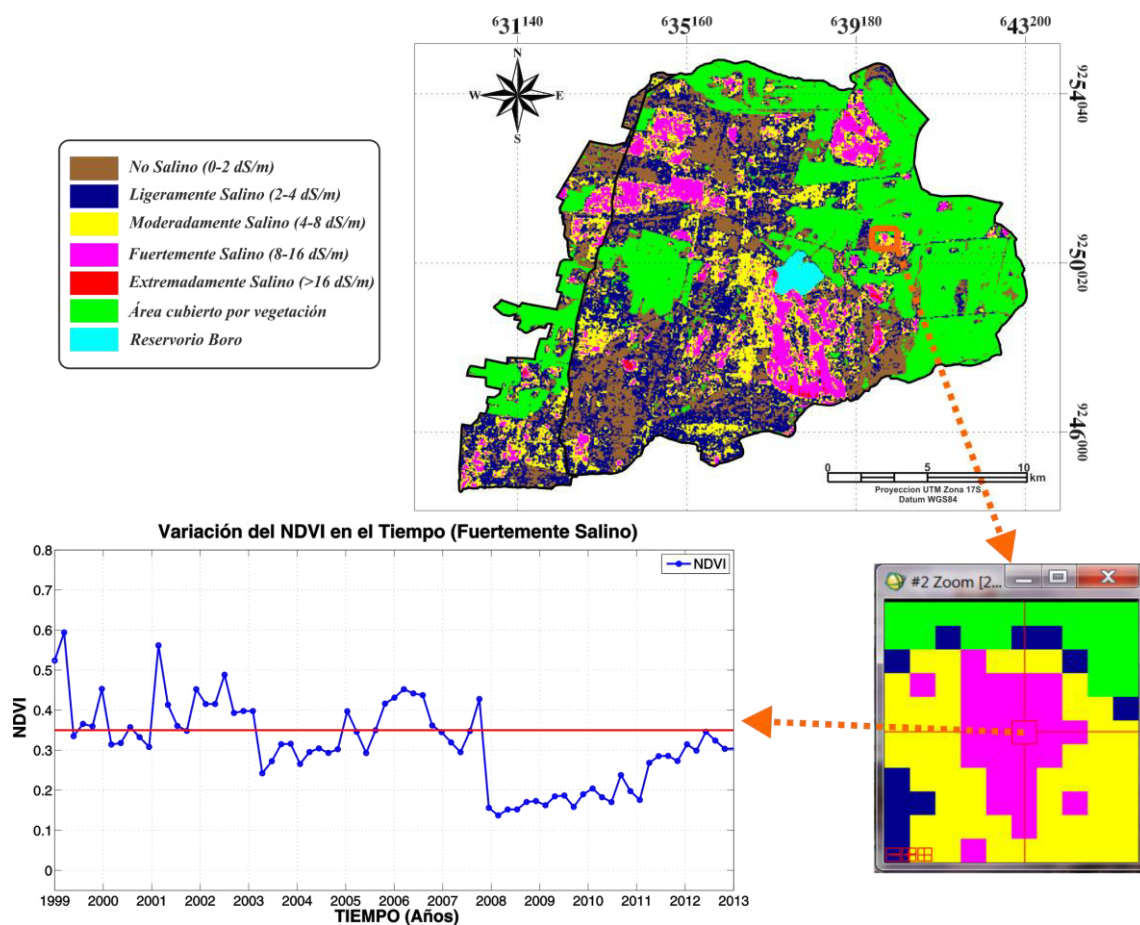


Figura 5.29. Ubicación de un área fuertemente salina de coordenadas (E=639855.00 m - N=9250645.00 m).

En la Figura 5.30 se muestra la ubicación de un punto en el mapa temático de la distribución de la salinidad del suelo, cuyas coordenadas en UTM es aproximadamente (E=632145.00 m – N=9245245.00 m), que pertenece a un suelo Moderadamente Salino. Los valores del NDVI en el tiempo oscilan entre los valores de 0.12 y 0.78, en los periodos de 1999 a 2003 el NDVI se

encuentra en buen estado, en los años de 2003 a 2010 fue muy bajo sin superar la línea de color rojo, pero a partir de 2010 hasta 2012 el NDVI se encuentra en buen estado de esto podemos afirmar que los cultivos de caña de azúcar se puede producir normalmente en un rango de 4 a 8 dS/m de conductividad eléctrica del suelo.

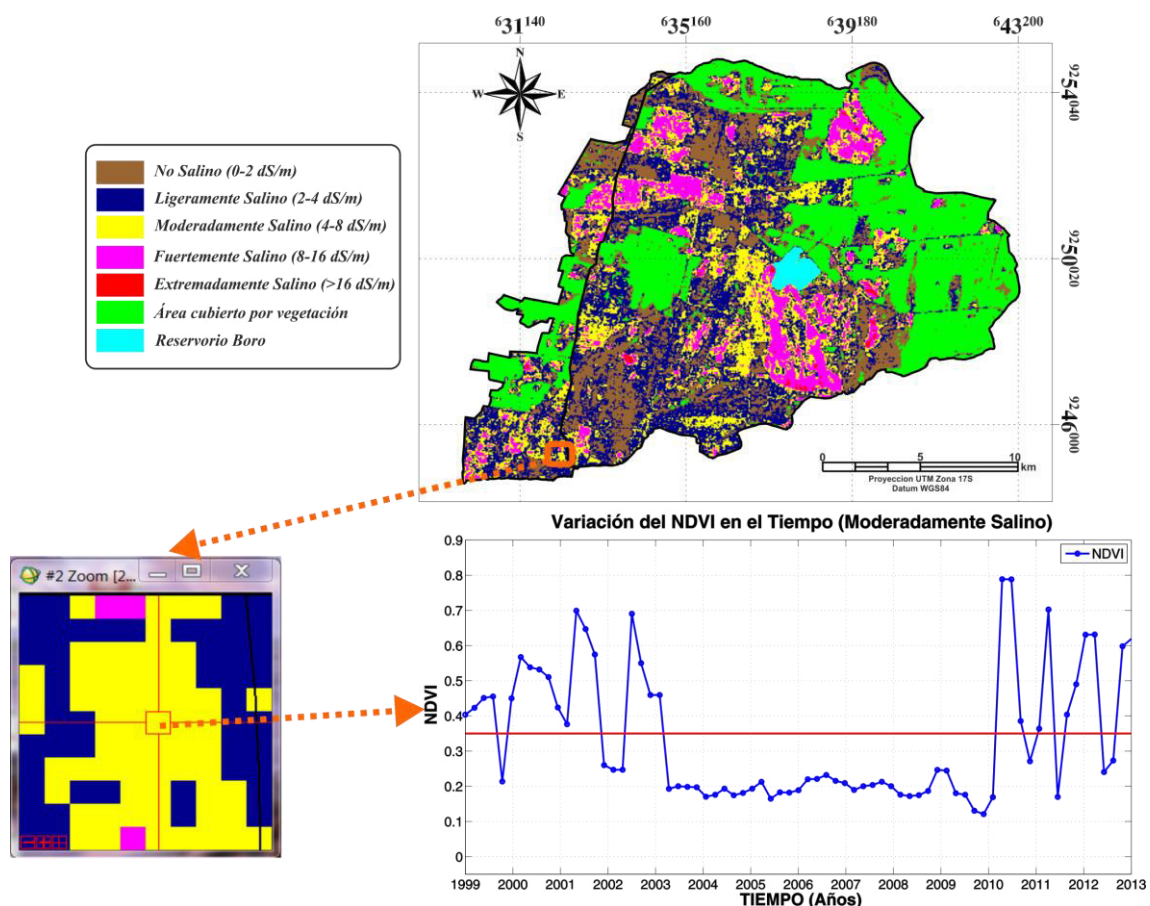


Figura 5.30. Ubicación de un área moderadamente salina de coordenadas (E=632145.00 m - N=9245245.00 m).

En la Figura 5.31 se muestra la ubicación de un punto en el mapa temático de la distribución de la salinidad del suelo, cuyas coordenadas en UTM es aproximadamente (E=636075.00 m – N=9249055.00 m), que pertenece a un suelo Ligeramente Salino. Los valores del NDVI en el tiempo oscilan entre los valores de 0.1 y 0.9 superando la línea de color rojo, es una muestra que los cultivos de caña de azúcar se desarrollan sin ningún tipo de problemas con un rango de conductividad eléctrica del suelo de 2 a 4 dS/m .

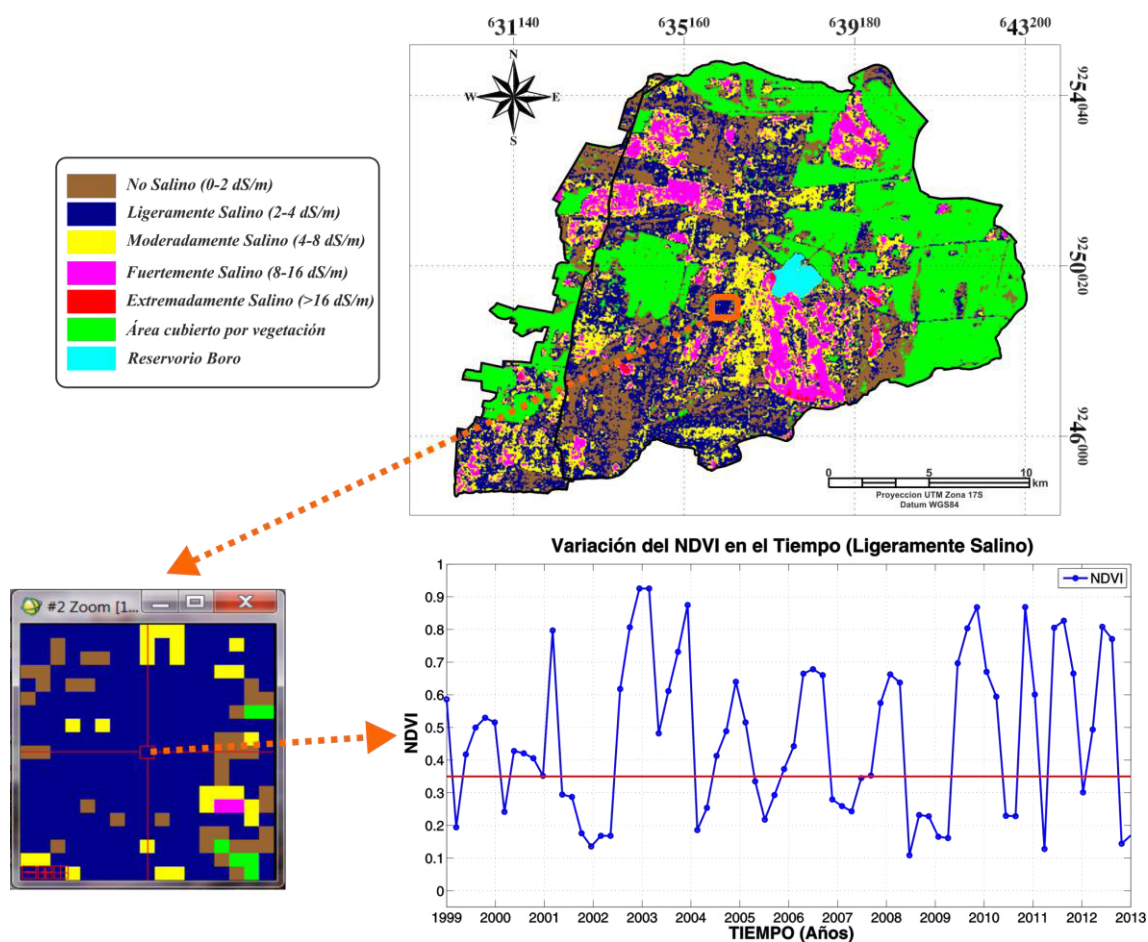


Figura 5.31. Ubicación de un área Ligeramente salina de coordenadas (E=636075.00 m - N=9249055.00 m).

En la Figura 5.32 se muestra la ubicación de un punto en el mapa temático de la distribución de la salinidad del suelo, cuyas coordenadas en UTM es aproximadamente (E=634155.00 m - N=9252175.00 m), que pertenece a un suelo No Salino. Los valores del NDVI en el tiempo oscilan entre los valores de 0.12 y 0.9 superando la línea de color rojo. En este rango de conductividad eléctrica del suelo de 0 a 2 dS/m los cultivos de caña de azúcar se desarrollan sin ningún tipo de problemas, es decir los cultivos de caña de azúcar se encuentran en muy buen estado.

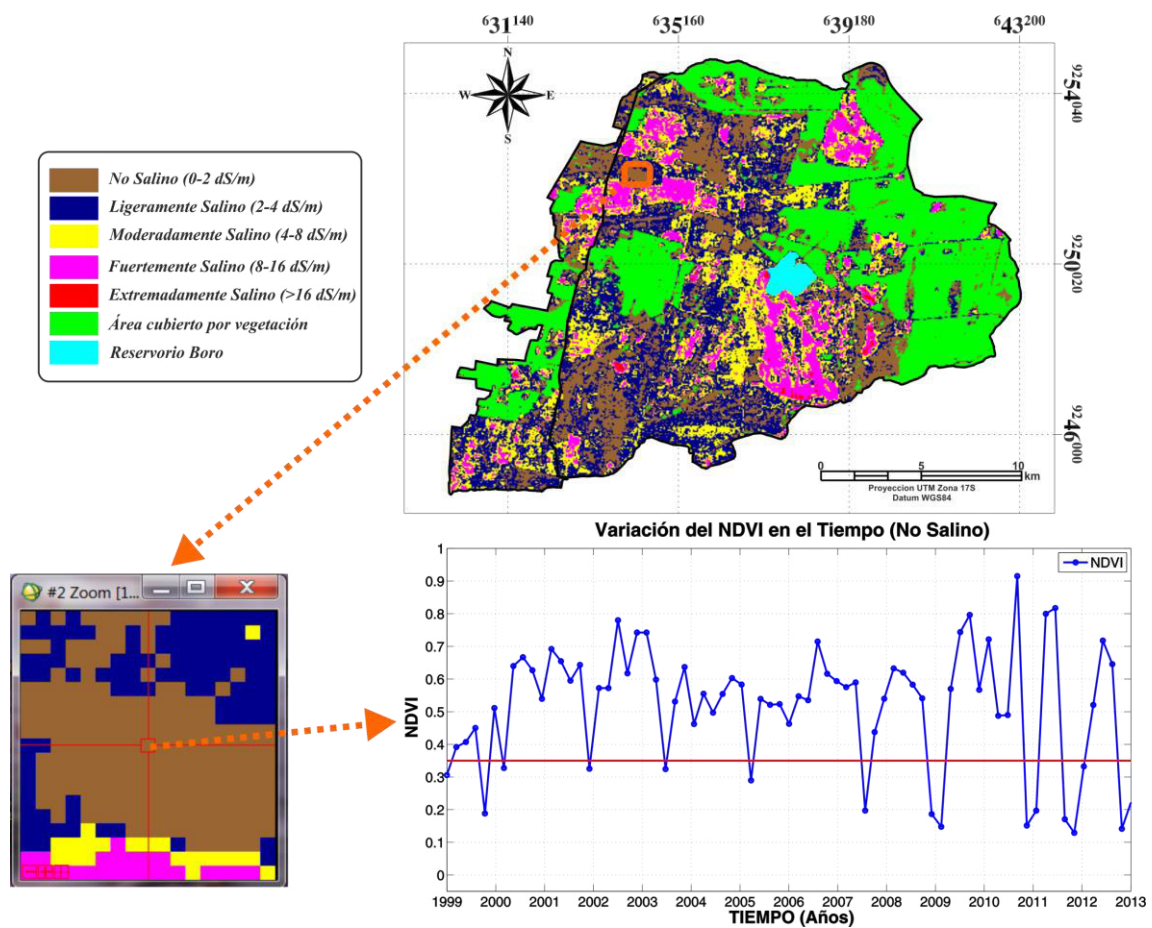


Figura 5.32. Ubicación de un área No salina con coordenadas (E=634155.00 m – N=9252175.00 m).

Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

Los resultados presentados demuestran que la metodología aplicada cumplió con los objetivos de identificar, detectar y cuantificar las tierras degradadas por la salinidad del suelo, mediante el uso de datos de campo de conductividad eléctrica del suelo, sistema de posicionamiento global (GPS) y las imágenes del sensor TM (Landsat-5), ETM+ (Landsat-7) y HRG-2 (Spot-5) que gracias a su resolución espacial y espectral permitió obtener información de la superficie terrestre relacionando con la presencia de la salinidad del suelo. Sin embargo, los resultados obtenidos no son determinantes debido a que la salinidad del suelo es dinámica en espacio y tiempo.

El NDVI es un parámetro físico muy utilizado y confiable para el estudio de los cultivos de caña de azúcar. Mediante este parámetro se observó la dinámica de producción de la caña de azúcar durante el periodo de 2007 a 2010 para la zona “A”, además mediante el máximo valor compuesto de las imágenes de NDVI (2007 a 2010) se pudo identificar a un rango de 0.57 a 1 con certeza las áreas de buena producción de caña de azúcar y suelos con baja calidad agrícola, cerros y ciudades con valores inferiores a 0.57, para las zonas “A” y “B”.

El Índice de Salinidad (IndSal) ha demostrado ser importante para detectar suelos salinos, ciudades, cerros y caminos a un rango de 0 a 0.25, al realizar el máximo valor compuesto de las 15 imágenes de IndSal del periodo 2007 a 2010. De esta forma se clasificó en dos clases, áreas que no son aptos para el cultivo de caña de azúcar que representa aproximadamente a 3168.63 ha y 5303.61 ha que representan a las parcelas de producción de caña de azúcar sin problemas de salinidad para la zona “A”, mientras que para la zona “B” 1701.45 ha representan áreas no aptos para el cultivo y 5265 ha para la producción de la caña de azúcar.

La imagen HRG-2 de alta resolución espacial ($10\text{ m} \times 10\text{ m}$) fue importante para identificar áreas salinas, ciudades y cerros al ser superpuesto por el vector (*Shapefile*) generado a partir del máximo valor compuesto del IndSal a un rango de 0 a 0.25.

La variación del NDVI en el tiempo permitió la visualización y el análisis de la dinámica del cultivo de caña de azúcar en tierras con problemas de sales y tierras en buen estado sin problemas de salinidad del suelo.

Los modelos estadísticos de regresión lineal elaborados para estimar la salinidad del suelo haciendo uso de la reflectancia de las bandas del sensor TM (20/04/2008) transportado por el satélite Landsat-5 frente a los valores de conductividad eléctrica del suelo presentaron coeficientes de correlación de alta significancia para las bandas B1(azul), B2(verde), B3(rojo) y B4(infrarrojo cercano), siendo las bandas del visible (B1 y B2), las de mayor relación con la conductividad eléctrica del suelo. Además, se generó los modelos de regresión lineal múltiple por mínimos cuadrados, siendo la ecuación $CE = 143.06 \times B1 + 172.03 \times B2 - 126.16 \times B3 - 9.25$ de la Tabla 5.5 con mayor coeficiente de correlación ($R = 0.73$) la que se utilizó para cartografiar la distribución de la salinidad del suelo para la zona “A”.

Los resultados de este trabajo pueden ser de utilidad para fines de planeación de programas de rehabilitación de suelos y selección de un patrón de cultivo que considere la siembra de especies tolerantes a las sales en las áreas afectadas, ya que la salinidad afecta en forma diferencial a cada cultivo.

El mapa temático de la salinidad del suelo generado de la regresión múltiple entre los datos de campo (conductividad eléctrica) y valores de reflectancia de las imágenes, muestra la salinidad del suelo de la zona de las raíces del cultivo de caña de azúcar.

La Teledetección es una herramienta fundamental para el estudio de la salinidad del suelo, lo cual proporciona resultados a corto plazo sobre la ubicación de las áreas afectadas.

Los procesos de salinidad del suelo son muy dinámicos. Por lo tanto, el método de detección de la salinidad del suelo también debe ser dinámico.

6.2. Recomendaciones.

La etapa de la extracción de las muestras de suelo, en los terrenos de cultivo y la toma de las imágenes se deben realizar en la misma fecha o fechas muy cercanas para tener buenos resultados.

La extracción de las muestras de suelo, en los terrenos de cultivo de caña de azúcar se deben de realizar a una profundidad de 0.40 *m* para tener buenos resultados, debido que las raíces de la caña de azúcar se concentran más abundantes a la profundidad de 0.40 *m*.

Esta clase de investigación se debe realizar en coordinación con los agricultores responsables para que realicen un adecuado tratamiento a los cultivos en estudio a fin de tener resultados óptimos.

Los valores de la conductividad eléctrica del suelo, determinados en el laboratorio de suelos, se debe registrar con tres cifras decimales.

Referencias

- Abraham, E. M and L. M. Torres (2007), Estado del arte en el uso de indicadores y puntos de referencia en la lucha contra la desertificación y la sequía en América latina y el Caribe, *Inerciencia*, v. 32 (12), pp. 827- 833.
- Alarcón, M. J. (1982), Diagnostico de los Problemas de Salinidad en los Suelos del Valle de El Tocuyo, Tesis de Maestría, Centro Interamericana de Desarrollo Integral de Agua y Tierra – Universidad de los Andes, Mérida – Venezuela.
- Al-Khaier, F. (2003), Soil Salinity Detection Using Satellite Remote Sensing. Thesis of M.Sc. in Geo-Information Science and Earth Observation, Watershed Management, Conservation and River Basin Planning Specialization. International Institute for Geo-Information Science and Earth observation, Enschede, the Netherlands, pp. 61.
- Alva, C. A., J. G. van Alphen, A. de la Torre and L. Manrique (1976), Problema de Drenaje y Salinidad en la Costa Peruana, Boletín 16, International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI P. O. Box 45 – Wageningen/The Netherlands, pp. 1-118.
- Andrades, R. M. (2012), Prácticas de Edafología y Climatología, Universidad de La Rioja, España, pp. 70.
- Arefi H., and P. Reinartz (2011), Accuracy Enhancement of ASTER Global Digital Elevation Models Using ICESat Data, Remote Sensing, v. 3, pp. 1323-1343, doi:10.3390/rs3071323.
- Athmania, D., and H. Achour (2014), External Validation of the ASTER GDEM2, GMTED2010 and CGIAR-CSI-SRTM v4.1 Free Access Digital Elevation Models (DEMs) in Tunisia and Algeria, Remote Sensing, v. 6, pp. 4600-4620, doi:10.3390/rs6054600.
- Badaracco, M. R. R. (2012), Detección de la Salinidad en los suelos de Cultivos de Algodón usando Imágenes de Satélite en la Costa Norte del Perú, Tesis de Licenciatura para optar el título de Licenciado en Física, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Perú.
- Bai, Z. G., D. L. Dent, H. Bartholomeus and M. E. Schaepman (2005), Assessing land degradation and improvement using NASA GIMMS, Shaanxi, China, *Remote sensing and geoinformation processing in the assessment and monitoring of land degradation and desertification*, Trier, Germany, pp. 128-135.
- Barrena, A. V., J. Gianella, H. Garcia, N. Flores, E. Rubin, J. C. Ocaña, and R. Guillén (2010), Metodología Aplicada en el Análisis de Recursos de Biomasa Leñosa y de Residuos para uso Combustible, en Bioenergía y Seguridad Alimentaria “BEFS”, FAO-Roma, pp. 1-180.

- Borengasser, M., Hungate W. S., and Watkins (2008), *Hyperspectral Remote Sensing Principles and Applications*, CRC Press Taylor & Francis Group – Boca Raton London New York, pp. 119.
- Canty, M. J. (2007), *Image Analysis Classification and Change Detection in Remote Sensing, With Algorithms for ENVI/IDL*, Taylor & Francis Group – Boca Raton London New York, pp. 1-343.
- Caro, F. M. (1966), *Suelos Salinos y Procesos de Salinización en el Sureste Español*, Tesis doctoral, Universidad de Murcia – España.
- Carrow, N. R., and R. R. Duncan (2012), *Saline and Sodic Turfgrass Soils*, CRC Press Taylor & Francis Group Boca Raton London New York, pp. 1-415.
- Chander, G., B. L. Markham, and D. L. Helder (2009), Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors, *Remote Sensing of Environment*, v. 113, pp. 893-903.
- Chandrasekhar, S. (1960), *Radiative Transfer*, Dover Publications, INC. New York – EEUU. pp. 1-393.
- Corwin, D. L., and S. M. Lesch (2005), Apparent soil electrical conductivity measurement in agricultura, *Computers and electronics in agricultura*, v. 46, pp. 11-43.
- Cook A. J., T. Murray, A. Luckman, D. G. Vaughan, and N. E. Barrand (2012), A new 100-m Digital Elevation Model of the Antarctic Peninsula derived from ASTER Global DEM: methods and accuracy assessment, *Earth System Science Data*, v. 4, pp. 129-142, doi: 10.5194/essd-4-129-2012.
- Cuartero, S. A. (2003), *Análisis de Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) generados con imágenes SPOT-HRV y TERRA-ASTER*, Tesis Doctoral, Desarrollada en el programa de Doctorado de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría del Dpto. de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría de la Universidad de Jaén, España.
- Cuartero, A., and Felicísimo, A. M. (2003), Rectificación y ortorrectificación de imágenes de satélite: análisis comparativo y discusión, *GeoFocus (Artículos)*, Nº 3, 2003, pp. 45-57. ISSN: 1578-5157.
- Dimap Dictionary (2006), SPOT Scene profile, Version 1.1.2, pp. 166-169.
- Eguren, F. (2003), La Agricultura de la Costa Peruana, en Debate Agrario: Análisis y Alternativas Nº 35, Centro Peruano de Estudios Sociales CEPES, Lima-Perú. [Consulta: 5 de junio 2014 - Web: <http://www.cepes.org.pe/debate/debate35/debate.htm>]

- Eldeiry, A. A. and L. A., Garcia (2008), Detecting Soil Salinity in Alfalfa Fields using Spatial Modeling and Remote Sensing. *Soil Science Society of America*, v. 72, pp. 201-211.
- FAO - Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación (1987), Estado Mundial de la Agricultura y la Alimentación, Colección FAO: Agricultura, N° 21, Roma-Italia.
- Feliciísimo, A. M. (1994). Modelos digitales del terreno: principios y aplicaciones en las ciencias ambientales. Oviedo, España: Pentalfa Ediciones. pp. 222, ISBN: 84-7848-475-2.
- Fernández, V. R., y J. C. Pérez D. (2012), Gerente de Campo de la Empresa Agroindustrial Pomalca S.A.A. y Jefe de Ingeniería y Proyectos Agrícolas de la Empresa Agroindustrial Pomalca S.A.A. respectivamente, Comunicación personal.
- Forrester, C. B. J (2010), Enhanced processing of SPOT multispectral satellite imagery for environmental monitoring and modelling , Department of Geosciences and Geography Faculty of Science University of Helsinki, Finland.
- Forestier, G., J. Inglada, C. Wemmert, P. Gancarski. (2009). Mining spectral libraries to study sensors' discrimination ability. Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology IX. V. 7478 pp. 1-9.
- García, A. (2002), Manejo de Suelos con Acumulación de Sales, VIII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo, Universidad Nacional, Sede Palmira. A. A. 237, Palmira-Colombia. [Consulta: 20 de mayo 2014 - Web: <http://www.secsuelo.org/ssuelos.html>]
- Gilabert, M. A., Gonzáles-Piqueros, J., García-Haro, J. (1997). Acerca de los Índices de Vegetación, Revista de Teledetección, Departamento de Termodinámica, Facultad de Física, Universidad de Valencia, pp. 1-10.
- Guo, Y., and F. Zeng (2012), atmospheric correction comparison of spot-5 image based on model flaash and model quac , XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B7.
- Heidinger, A. H., (2008), Detección de Salinidad de los Suelos en el Altiplano Peruano – Boliviano Mediante Percepción Remota, Inducción Electromagnética y Sistema de Información Geográfica, Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Agraria la Molina – Facultad de Ciencias, Lima-Perú.
- Hill, J., and D. Aifodopoulou (1990), Comparative Analysis of Landsat-5 TM and SPOT HRV-1 Data for Use in Multiple Sensor Approaches, Remote Sensing of Environment, v. 34, pp. 55-70.

- Huete, A., K. Didan, T. Miura, E.P. Rodriguez, X.Gao and L.G. Ferreira (2002), Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* v. 83, pp. 195–213.
- Iqbal, M. (1983). An introduction to solar radiation. Academic Press. New York, pp. 30.
- ITT Visual Information Solutions (2009), ENVI- Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide, Version 4.7, pp. 44.
- Jackson, R. D., and A. R. Huete (1991), Interpreting vegetation indices, *Preventive Veterinary Medicine*, v. 11, pp. 185-200.
- James, C. M. (1998), Linear Semi-Empirical Kernel-Driven Bidirectional Reflectance Distribution Function Models in Monitoring Semi-Arid Grasslands from Space, Tesis Doctoral, University of Nottingham.
- Kawishwar, P. (2007), Atmospheric Correction Models for Retrievals of Calibrated Spectral Profiles from Hyperion EO-1 Data, Master's thesis, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Enschede, the Netherlands and Indian Institute of Remote Sensing, National Remote Sensing Agency (NRSA), Department of Space, Government of India, Dehra Dun, India.
- Lang, H., Welch, R., (1999), "ATBD-AST-08 Algorithm Theoretical Basis Document for ASTER Digital Elevation Models" (Standard Product AST14). V.3.0, revised february 1999. [Consulta: 8 de mayo 2014 – Web: <http://eospsso.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/atbd/atbd-ast-14.pdf>]
- La desertificación en el Perú (2011), Cuarta Comunicación Nacional del Perú a la Convención de Lucha contra la Desertificación y la Sequía. Ministerio del Ambiente del Perú
- Lau, Q. A., S. Lhermitte, S. Gilliams and M. E. Ruiz (2003), Relación de la salinidad del suelo con la reflectancia multispectral de la caña de azúcar cultivada en condiciones extremas, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, v. 12(3), pp. 19-29.
- Lau, Q. A., E. Garea L. y M. E. Ruiz (2005), Estimación de la salinidad de los suelos utilizando una imagen espectrozonal y el sistema de información geográfica Telemap, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, v. 14(1), pp. 47-54.
- Liou, K. N. (2002), *An Introduction to atmospheric Radiation* - Second Edition, Academic Press – An imprint of Elsevier Science, San Diego, v. 84, pp. 44-51.
- Manual de uso Giovanni Online (2014), NASA – GES DISC (Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center). [Consulta: 20 de julio 2014 - Web: <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/additional/users-manual>]

- Mekeberaw, A. (2009), Analysis and Mapping of Soil Salinity levels in Metehara Sugarcane Estate Irrigation Farm using Different Models, Master Thesis, Addis Ababa University, Ethiopia.
- METADATA.DIM, Formato *.DIM que contiene información detallada sobre el satélite en órbita, la adquisición y el procesamiento de imagen. Archivo que viene junto con la imagen al ser adquirida.
- Ministerio de Agricultura - Perú (2010), Plan Estratégico Sectorial Multianual Actualizado del Ministerio de Agricultura 2007-2011, Unidad de Política Sectorial Oficina de Planeamiento y Presupuesto, MINAG, Lima, Agosto de 2010.
- NASA - National Aeronautics and Space Administration (2011), Landsat 7 Science Data Users Handbook. [Consulta: 2 de Agosto 2014 - Web: http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/Landsat7_Handbook.pdf]
- Pérez, G. C. y A. L. Muñoz N. (2006), Teledetección Nociones y Aplicaciones, Copyrighted Material- España, pp. 359.
- Porta, J., M., Lopez y C., Roquero (1994), Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi-Presa, Madrid-España, pp. 807.
- Pulido, M. L., H. S. Sanvicente, C. L. Wiegand and G. L. Anderson (1995), Estimación de pérdidas de cosecha en suelos ensalitrados mediante imágenes de satélite. En memorias del VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remoto. Puerto Vallarta, México, 5-10 de noviembre de 1995.
- Pulido, M. L., C. L. Wiegand, C. Rodrigues Z. and S. Neck (1997), Imágenes de Satélite para Identificar la Salinidad del Suelo en los Distritos de Riego, *Terra*, v. 15, pp. 201-210.
- Pulido, M. L., J. L. López de Santa Ana R., J. Gonzáles M., O. X. Cisneros E. and B. Robles R. (1999), Aplicación de imágenes de satélite, inducción electromagnética y sistemas de información geográfica para estudiar la salinidad del suelo, el drenaje y el rendimiento en el distrito de riego 075 río fuerte, Sin. IX Congreso Nacional de Irrigación. Culicán, Sinaloa, México, 27-29/10/1999. Simposio 2.
- Rahman, H., and G. Dedieu (1994), SMAC: a simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum, *International Journal of Remote Sensing*, v. 15, N°. 1, pp. 123-143.
- Reis, C. E., M. A. de Oliveira, P. E. Neves and A. J. Machado (2007), Ortorretificação: um passo a mais no processamento de imagens CBERS, Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, pp. 827-833.
- Reyes, P. S. (2010), Análisis y descripción general de la Plataforma GIOVANNI, Tesis de Master en Geofísica y Meteorología, Universidad de Granada – España, pp. 1-124.

- Reynolds, J. M. (1997), *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester New York. Weinheim. Brisbane Singapore Toronto, pp. 1-796.
- Rhoades, J. D., F. Chanduvi, and S. Lesch (1999), *Soil Salinity Assessment: Methods and interpretation of electrical conductivity measurements*, FAO Irrigation and Drainage paper 57, Roma-Italy, pp. 1-165.
- Richards, L. A. (1954), *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*, United States Salinity Laboratory Staff, Agriculture Handbook No. 60, pp. 1-160.
- Richard, J. A. and X. Jia (2006), *Remote Sensing Digital Image Analysis*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 4th Edition, pp. 46-50.
- Rojas, A. J. y E. Rufasto C. (2011), Relación de la Conductividad Eléctrica de los Suelos con la Reflectancia de Imágenes de Satélite en la región de Lambayeque-Perú, *Revista de Investigación de Física* 14, 111402402.
- Rudjord and Due (2012), Evaluation of FLAASH atmospheric correction, SAMBA/10/12, Norsk Regnesentral - Norwegian Computing Center, pp. 24.
- Sobrino, J. A. (2000), Teledetección, Servicio de publicaciones, Universidad de Valencia (ISBN 84-370-4220-8), Valencia (España), pp. 78-81.
- Spot Image (2002), Información Técnica. [Consulta: 5 de Agosto 2014 - Web: <http://www.astrium-geo.com/es/611-los-satelites-spot>]
- Tanré, D., Deroo, C., Duhaut, P., Herman, M., Morcrette, J. J., Perbos, J., and Deschamps, P. Y. (1990), Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: the 5S code, *International Journal of Remote Sensing*, v. 11, pp. 659-668.
- Teillet, P. M. (1990), Rayleigh optical depth comparisons from various sources, *Applied Optics*, v. 29, N° 13, pp. 1897-1900.
- Vermote E., D. Tanré, J. L. Deuzé, M. Herman, J. J. Morcrette, and S. Y. Kotchenova (2006), Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum - Vector (6SV), *6S User Guide Version 3*, part 1, pp. 1-55.
- Wiegand, C. L., J. D. Rhoades, D. E. Escobar and J. H. Everitt (1994), Photographic and Videographic Observations for Determining and Mapping the Response of Cotton to Soil salinity, *Remote Sens. Environ*, v. 49, pp. 212-223.

A.1. Magnitudes radiométricas básicas

Se presenta los principales conceptos que permiten entender de qué modo puede utilizarse la radiación electromagnética en teledetección para obtener información sobre los sistemas en estudio. Expondremos los aspectos básicos relacionados con el transporte, por parte de las ondas electromagnéticas, de la energía radiante y se introducen las características radiativas de la materia (Sobrino, 2000).

- ✓ **Campo radiativo.** Es el campo electromagnético transportado por las ondas entre el emisor y el receptor. La energía asociada con la onda electromagnética se denomina energía radiante (Q).
- ✓ **Emisividad** (ε). Las leyes de Planck, Stefan y Wien permiten obtener cómo sería la radiación de un cuerpo a una temperatura dada, si su eficiencia fuera de 100% . en realidad este no suele ser el caso, sino que todos los cuerpos tienen una emisividad algo inferior a 1. En función de la emisividad, los cuerpos pueden dividirse en:
 - **Cuerpo negro o radiador perfecto.** El que emite radiación máxima de sus posibilidades ($\varepsilon = 1$).
 - **Cuerpo gris.** Aquel en el que $0 < \varepsilon < 1$.
 - **Reflector perfecto,** $\varepsilon = 0$
 - **Radiador selectivo,** $\varepsilon_\lambda = f(\lambda)$, es decir la emisividad depende de la longitud de onda que se considere.
- ✓ **Energía radiante,** Q , total de energía radiada por un cuerpo en todas direcciones, se mide en Julios (J).
- ✓ **Flujo radiante,** Φ , es la energía transferida por radiación de una superficie a otra por unidad de tiempo, se mide en $J s^{-1} = W$.

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (A.1)$$

- ✓ **Intensidad radiante,** I , es el flujo radiante procedente de una fuente de radiación por unidad de ángulo sólido (Ω) y en una dirección concreta, se mide en $W sr^{-1} = J s^{-1} sr^{-1}$.

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (A.2)$$

- ✓ **Ángulo sólido o ángulo cónico,** Ω , es el ángulo tridimensional formado en el vértice de un cono. La unidad del ángulo sólido es el estereoradian (sr) y se define como el ángulo sólido para el que la superficie S es igual a r^2 donde r

es el radio de la esfera. Puesto que el área de una esfera es $4\pi r^2$, en una esfera completa hay 4π .

- ✓ **Emitancia radiante**, M , energía emitida por radiación desde una superficie por unidad de tiempo y de superficie, se mide $J s^{-1} m^{-2} = W m^{-2}$. A veces se habla de la emitancia espectral M_λ para hacer referencia a la emitancia en una longitud de onda concreta, en cuyo caso las unidades son $J s^{-1} m^{-2} \mu^{-1} = W m^{-2} \mu^{-1}$.

$$M = \frac{d\Phi}{dS} \quad (A.3)$$

- ✓ **Irradiancia**, E , concepto similar al de emitancia pero ahora referido a la energía que llega a un cuerpo a través del espacio procedente de otro (que ha emitido). Tiene las mismas unidades que la emitancia, análogamente puede hablarse también de irradiancia espectral, unidad $W m^{-2}$.

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad (A.4)$$

- ✓ **Radiancia**, L es el flujo radiante Φ que abandona una unidad de área en una dirección particular siguiendo un ángulo sólido particular. Las unidades en que se mide son $W m^{-2} sr^{-1}$. Su importancia estriba en que es la magnitud que detecta el sensor. Cuando la radiación se refiere a una porción concreta del espectro electromagnético se le denomina radiancia espectral (L_λ).

$$L = \frac{dI}{dS \cos \theta} = \frac{d\Phi}{d\Omega dS \cos \theta} \quad (A.5)$$

Donde θ es el ángulo formado por la dirección del flujo radiante y el vector perpendicular a la superficie receptora de tamaño S .

A.2. Características radiativas de la materia.

Cuando un flujo de energía radiante, Φ_i , alcanza la superficie de cualquier material, una parte de esta radiación es reflejada y, por tanto, es devuelta al medio del que procede, originando así un flujo reflejado, Φ_r . Otra parte es absorbida por el propio objeto, constituyendo un flujo Φ_a . Por último, una fracción del flujo incidente será transmitida Φ_t , normalmente en otras formas de energía. Figura A.1, presentada a continuación, muestra un esquema de la transformación que sufre el flujo incidente al interaccionar con la superficie (Sobrino, 2000).

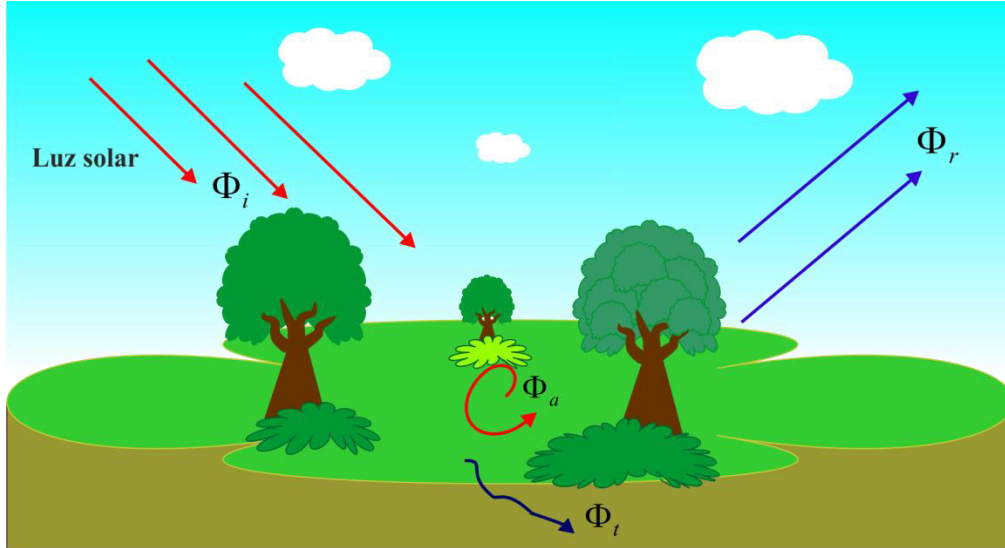


Figura A.1. Flujos en la incidencia.

De este modo la radiación que recibe la superficie puede descomponerse en tres términos:

$$\Phi_i = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t \quad (A.6)$$

Sin embargo, es habitual expresar la ecuación (A.6) en unidades relativas, para ello se divide por el flujo incidente, de forma que se llega a la relación:

$$1 = \frac{\Phi_r}{\Phi_i} + \frac{\Phi_a}{\Phi_i} + \frac{\Phi_t}{\Phi_i} = \rho + \alpha + \tau \quad (A.7)$$

donde

$$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_i} \rightarrow \text{Reflectividad o reflectancia}$$

$$\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi_i} \rightarrow \text{Absortividad o absorbancia.}$$

$$\tau = \frac{\Phi_t}{\Phi_i} \rightarrow \text{Transmisividad o transmitancia.}$$

El interés en la interacción solar con las superficies naturales está orientado al análisis de los datos que capta un sensor exterior a ellas, que opera habitualmente en el intervalo espectral de 0.3 a 3 μm , nos centraremos en la radiación reflejada en dicho intervalo por los distintos tipos de superficie (*Sobrino, 2000*).

A.3. Reflectividad (ρ):

La reflexión puede ser especular, en el límite entre dos medios de índices de refracción distinta, en cuyo caso sigue las leyes de Fresnel. Definimos la reflectividad como:

$$\rho = \frac{d\Phi_r}{d\Phi_i} \quad (A.8)$$

donde Φ_r es el flujo radiante reflejado y Φ_i es el flujo radiante incidente.

La medida de la reflectividad puede hacerse considerando toda la semiesfera superior de una determinada superficie, en este caso se habla de reflectividad hemisférica (ρ_h). De este modo si se considera una superficie elemental lambertiana (dS), Figura A.2, iluminado por una irradiancia (E), el flujo difundido por ello bajo la dirección (θ), se puede expresar como (Sobrino, 2000).

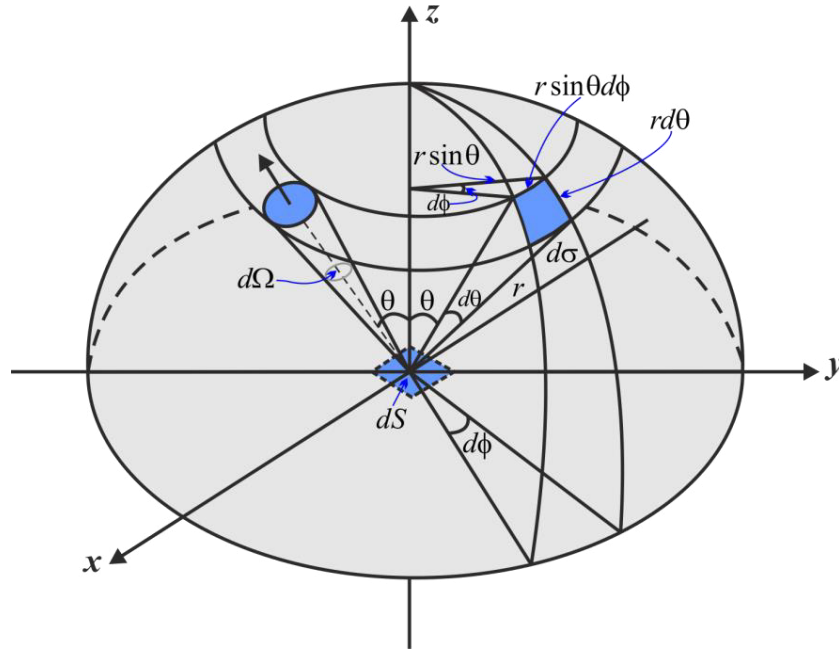


Figura.A.2. Ilustración de un ángulo sólido diferencial y su representación en coordenadas polares (Liou, 2002).

$$d^2\Phi = L d\Omega dS \cos \theta \quad (A.9)$$

donde L es la radiancia y Ω es el ángulo sólido.

El ángulo sólido está definida como la razón del área total (σ), de una superficie esférica al cuadrado del radio de la esfera (r), Figura A.3.

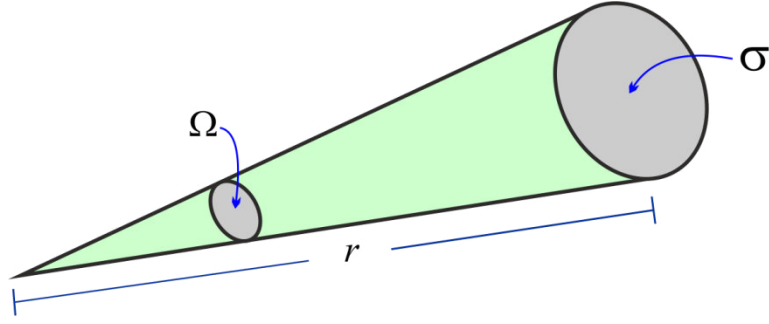


Figura. A.3. Definición del ángulo sólido Ω , donde σ denota el área y r es la distancia (Liou, 2002).

$$\Omega = \frac{\sigma}{r^2} \quad (\text{A. 10})$$

En forma diferencial

$$d\Omega = \frac{d\sigma}{r^2} \quad (\text{A. 11})$$

de la Figura.A.2 se puede observar que

$$d\sigma = (r \sin \theta d\phi)(r d\theta) \quad (\text{A. 12})$$

reemplazando (A. 12) en (A. 11) obtenemos

$$d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi \quad (\text{A. 13})$$

dónde θ es el ángulo cenit y ϕ es el ángulo acimut.

Para el flujo total hemisférico difundido por la superficie ($d\Phi_h$), se tiene

$$\begin{aligned} d^2\Phi_h &= L(\sin \theta d\theta d\phi) dS \cos \theta \\ \int d^2\Phi_h &= Lds \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta \\ d\Phi_h &= Lds(2\pi) \left(\frac{1}{2}\right) \\ d\Phi_r &= d\Phi_h = \pi L dS \end{aligned} \quad (\text{A. 14})$$

como se sabe que la irradiancia esta expresada como

$$E = \frac{d\Phi}{dS}$$

y para el flujo incidente lo podemos expresar como

$$d\Phi_i = E dS$$

por la reflectividad hemisférica de una superficie lambertiana.

$$\rho_h = \frac{d\Phi_r = d\Phi_h}{d\Phi_i}$$

Finalmente obtenemos la reflectividad hemisférica de una superficie lambertiana.

$$\rho_h = \frac{\pi L}{E} \quad (A.15)$$

La cantidad πL es la densidad de flujo radiante reflejado desde la superficie, que es equivalente a la excitación radiante M de la fuente auto emisora.

$$M = \pi L$$

En caso general la reflectividad hemisférica es función de los ángulos cenit (θ) y acimut (ϕ); es decir que la radiancia L depende de θ y ϕ ($L(\theta, \phi)$). Por lo tanto la reflectividad hemisférica se expresa como (Sobrino, 2000).

$$\rho_h = \frac{d\Phi_r = d\Phi_h}{d\Phi_i} = \frac{\int L dS \sin \theta \cos \theta d\theta d\phi}{EdS}$$

$$\rho_h = \frac{\int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} L(\theta, \phi) dS \sin \theta \cos \theta d\theta d\phi}{EdS} \quad (A.16)$$

La ecuación (A.16) es la reflectividad hemisférica espectral de la superficie.

En teledetección las radiaciones espectrales que son reflejadas desde la superficie hacia el sensor dependen de muchos factores entre ellos:

- La variación de la irradiación solar.
- Las condiciones atmosféricas
- Meteorología (temperatura, viento, precipitación)
- Las propiedades reflectivas de la superficie (a nivel espacial y espectral).
- Las condiciones de observación del sensor.

La radiación que llega al exterior de la atmosfera es de la forma

$$E = E_0 \varepsilon_0 \quad (A.17)$$

donde ε_0 es el factor de corrección de la excentricidad de la órbita de la Tierra.

Distancia Tierra-Sol

La distancia Tierra-Sol posee una magnitud que varía con la posición de la Tierra en la órbita para un instante de tiempo.

La distancia Tierra-Sol promedio (r_0) es llamada como una unidad astronómica que es igual a (Iqbal, 1983).

$$1UA = 1.496 \times 10^8 km \quad (A.18)$$

n	a_n	b_n	c_n	h_n
0	1.000110	0	0.006918	0
1	0.034221	0.001280	-0.399912	0.070257
2	0.000719	0.000077	-0.006758	0.000907
3	-----	-----	-0.002697	0.000148

Tabla A.1: Coeficientes del cálculo de la distancia Tierra – Sol y el ángulo de declinación (*Liou*, 2002).

La distancia Tierra-Sol en función de la excentricidad está dada por (*Liou*, 2002).

$$\varepsilon_0 = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = \sum_{n=0}^2 (a_n \cos nt + b_n \sin nt) \quad (A.19)$$

donde r es la distancia entre la Tierra y el Sol en cualquier día del año y t es expresado de la forma

$$t = \frac{2\pi(d_n - 1)}{365} \quad (A.20)$$

donde d_n es el número del día del año, que va desde 1 de enero hasta 365 el 31 de diciembre.

El ángulo de declinación puede evaluarse a partir de (*Liou*, 2002)

$$\delta = \sum_{n=0}^3 (c_n \cos nt + h_n \sin nt) \quad (A.21)$$

La distancia Tierra – Sol actual en un tiempo dado también puede ser expresada de la siguiente forma

$$r = d = (1 - 0.01672 \cos(\text{radian}(0.9856(d_n - 4)))) \quad (A.22)$$

de esta forma tenemos que

$$\varepsilon_0 = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = \left(\frac{1}{d}\right)^2 = \frac{1}{d^2} \quad (A.23)$$

La irradiancia solar extraterrestre (E) es definida como la energía incidente sobre la unidad de superficie en el borde exterior de la atmósfera en la unidad del tiempo, cuya unidad normalmente empleada es en (Wm^{-2}).

$$E = \varepsilon_0 E_0 \sin \alpha = \varepsilon_0 E_0 \cos \theta_s \quad (A.24)$$

donde E es la irradiancia solar extraterrestre sobre un plano horizonte, E_0 es la constante solar, ε_0 es el factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre, θ_s es el ángulo cenit y α es el ángulo altitud solar.

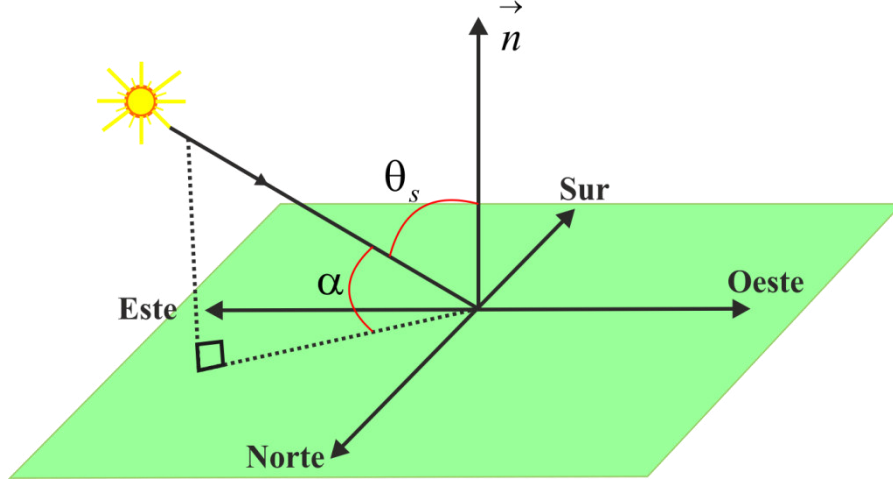


Figura A.4. Esquema gráfico de la posición del Sol con respecto a una superficie horizontal (Adaptado de *Iqbal*, 1983).

Reemplazando (A.17) en (A.16) obtenemos la reflectancia planetaria, es dada por la siguiente expresión.

$$\rho_p = \frac{\int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} L(\theta, \phi) dS \sin \theta \cos \theta d\theta d\phi}{\varepsilon_0 E_0 \cos \theta_s dS} \quad (\text{A.25})$$

En caso general la radiancia $L(\theta, \phi)$ depende de θ y ϕ es muy poco conocido, y por consiguiente, en la ausencia de modelos angulares teóricos satisfactorios o resultados observados, se asume la isotropía, es decir, $L(\theta, \phi) = L$ por tanto (*Sobrino*, 2000):

$$\rho_p = \frac{\pi L}{\varepsilon_0 E_0 \cos \theta_s} \quad (\text{A.26})$$

y en función de la distancia Tierra – Sol sería

$$\rho_p = \frac{\pi L d^2}{E_0 \cos \theta_s} \quad (\text{A.27})$$

Programas desarrolladas durante la elaboración de la tesis, para el pre-procesamiento de las imágenes HRG-2, TM y ETM+ de los satélites Spot-5, Landsat-5 y Landsat-7 respectivamente, utilizando el lenguaje de programación IDL.

Programa B.1

```
;#####
; NOMBRE DEL PROGRAMA: ND_A_RADIANCIA.PRO
; PROPÓSITO: CONVIERTE DE NÚMEROS DIGITALES A RADIANCIA ESPECTRAL DE
; IMÁGENE HRG-2 DEL SATÉLITE SPOT-5
;#####
PRO ND_A_RADIANCIA
dirname=dialog_pickfile(/directory,title="Seleccionar la carpeta de,$
las imagenes TIFF.")
cd,dirname
file_mkdir,'RADIANCIA'
mtlfile=findfile('METADATA.DIM')
header = strarr(600)
openr, lun, mtlfile, /get_lun
readf, lun, header
junk=""
DIA=0.0
MES=0.0
ANO=0.0
HORA=0.0
MINUTOS=0.0
SEGUNDOS=0.0
BIAS1=0.0
BIAS2=0.0
BIAS3=0.0
BIAS4=0.0
GAIN1=0.0
GAIN2=0.0
GAIN3=0.0
GAIN4=0.0
azimut=0.0
elevation=0.0
reads, header(8), junk, DIA, FORMAT='(A37,x,F8.3)'
reads, header(8), junk, MES, FORMAT='(A35,x,F8.3)'
reads, header(8), junk, ANO, FORMAT='(A32,x,F8.3)'
reads, header(8), junk, HORA, FORMAT='(A40,x,F8.3)'
reads, header(8), junk, MINUTOS,FORMAT='(A43,x,F8.3)'
reads, header(8), junk, SEGUNDOS,FORMAT='(A46,x,F8.3)'
reads, header(307), junk, BIAS1, FORMAT='(A14,x,F8.3)'
reads, header(308), junk, GAIN1, FORMAT='(A14,x,F8.3)'
reads, header(315), junk, BIAS2, FORMAT='(A14,x,F8.3)'
reads, header(316), junk, GAIN2, FORMAT='(A14,x,F8.3)'
reads, header(323), junk, BIAS3, FORMAT='(A14,x,F8.3)'
reads, header(324), junk, GAIN3, FORMAT='(A14,x,F8.3)'
reads, header(331), junk, BIAS4, FORMAT='(A14,x,F8.3)'
reads, header(332), junk, GAIN4, FORMAT='(A14,x,F8.3)'
reads, header(190), junk, azimut, FORMAT='(A12,x,F8.5)'
reads, header(191), junk, elevation, FORMAT='(A14,x,F8.5)'
images=findfile('*.tif',count=Images_Num)
ok = QUERY_TIFF(images,s)
```

```

IF (ok) THEN BEGIN
FOR i=0,s.NUM_IMAGES-1 DO BEGIN
  imp = QUERY_TIFF(images,t,IMAGE_INDEX=i)
  img = READ_TIFF(images,IMAGE_INDEX=i,GEOTIFF=GTMODELTYPEGEOKEY)
ENDFOR
ENDIF
image = Read_Tiff(images, GEOTIFF=geotag)
image = Reverse(image, 2)
L1 = fltarr(2763,2579)
L2 = fltarr(2763,2579)
L3 = fltarr(2763,2579)
L4 = fltarr(2763,2579)
L1 = temporary(img[0,*,*]/GAIN1 + bias1)
L2 = temporary(img[1,*,*]/GAIN2 + bias2)
L3 = temporary(img[2,*,*]/GAIN3 + bias3)
L4 = temporary(img[3,*,*]/GAIN4 + bias4)
WRITE_TIFF,dirname+path_sep()+'RADIANCIA',$
+path_sep()+'RADIANCIA_1'+'.tif',L1,geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY,/FLOAT
WRITE_TIFF,dirname+path_sep()+'RADIANCIA',$
+path_sep()+'RADIANCIA_2'+'.tif',L2,geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY,/FLOAT
WRITE_TIFF,dirname+path_sep()+'RADIANCIA',$
+path_sep()+'RADIANCIA_3'+'.tif',L3,geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY,/FLOAT
WRITE_TIFF,dirname+path_sep()+'RADIANCIA',$
+path_sep()+'RADIANCIA_4'+'.tif',L4,geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY,/FLOAT
print, 'FIN DEL PROCESO'
END

```

Programa B.2

```

;#####
; NOMBRE DEL PROGRAMA: RADIANCIA A TOA.PRO
; PROPÓSITO: CONVIERTE RADIANCIA ESPECTRAL A REFLECTANCIA APARENTE
; (TOA) DE IMÁGENE HRG-2 DEL SATÉLITE SPOT-5
;#####
PRO RADIANCIA_A_TOA
dirname=dialog_pickfile(/directory,title="Seleccionar Metadato")
cd,dirname
mtlfile=findfile('METADATA.DIM')
header = strarr(213972)
openr, lun, mtlfile, /get_lun
readf, lun, header
junk=""
ESUN1=0.0
ESUN2=0.0
ESUN3=0.0
ESUN4=0.0
elevation=0.0
reads, header(213953), junk, ESUN1, FORMAT='(A23,x,F8.3)'
reads, header(213958), junk, ESUN2, FORMAT='(A23,x,F8.3)'
reads, header(213963), junk, ESUN3, FORMAT='(A23,x,F8.3)'
reads, header(213968), junk, ESUN4, FORMAT='(A23,x,F8.3)'
reads, header(191), junk, elevation, FORMAT='(A14,x,F8.5)'
dirname=dialog_pickfile(/directory,title="Seleccionar la carpeta de,$
las imagenes TIFF.")
cd,dirname
file_mkdir, 'RTOA'
images1=findfile('RADIANCIA_1.tif')
images2=findfile('RADIANCIA_2.tif')
images3=findfile('RADIANCIA_3.tif')
images4=findfile('RADIANCIA_4.tif')

```

```

img1 = READ_TIFF(images1,GEOTIFF=GTMODELTYPEGEOKEY)
img2 = READ_TIFF(images2,GEOTIFF=GTMODELTYPEGEOKEY)
img3 = READ_TIFF(images3,GEOTIFF=GTMODELTYPEGEOKEY)
img4 = READ_TIFF(images4,GEOTIFF=GTMODELTYPEGEOKEY)
d=0.98877; calculada según la Ecuación (4.3) del capítulo 4.
RTOA1 = fltarr(2763,2579)
RTOA2 = fltarr(2763,2579)
RTOA3 = fltarr(2763,2579)
RTOA4 = fltarr(2763,2579)
RTOA1=(!PI*img1*d^2)/(ESUN1*COS((90-ELEVATION)*!PI/180))
RTOA2=(!PI*img2*d^2)/(ESUN2*COS((90-ELEVATION)*!PI/180))
RTOA3=(!PI*img3*d^2)/(ESUN3*COS((90-ELEVATION)*!PI/180))
RTOA4=(!PI*img4*d^2)/(ESUN4*COS((90-ELEVATION)*!PI/180))
WRITE_TIFF,dirname+path_sep()+ 'RTOA',$
+path_sep()+ 'RTOA_1'+'.tif',RTOA1,geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY, /FLOAT
WRITE_TIFF,dirname+path_sep()+ 'RTOA',$
+path_sep()+ 'RTOA_2'+'.tif',RTOA2,geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY, /FLOAT
WRITE_TIFF,dirname+path_sep()+ 'RTOA',$
+path_sep()+ 'RTOA_3'+'.tif',RTOA3,geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY, /FLOAT
WRITE_TIFF,dirname+path_sep()+ 'RTOA',$
+path_sep()+ 'RTOA_4'+'.tif',RTOA4,geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY, /FLOAT
print,'FIN DEL PROCESO'
end

```

Programa B.3

```

;#####
; NOMBRE DEL PROGRAMA: TOA_A_REFLECTANCIA_SUPERFICIE.PRO
; PROPÓSITO: SMAC - CONVIERTE REFLECTANCIA APARENTE (TOA) A LA
; REFLECTANCIA DE LA SUPERFICIE DE IMÁGENE HRG-2 DEL SATÉLITE SPOT-5
; AUTOR: Beatrice Berthelot CESBIO DICIEMBRE 1998 (Hecho en C)
;#####
PRO TOA_A_REFLECTANCIA_SUPERFICIE
dirname1=dialog_pickfile(/directory,title="Seleccionar la carpeta de;$
las imagenes TIFF.")
cd,dirname1
file_mkdir,'SMAC'
images1=findfile('RTOA_1.tif')
images2=findfile('RTOA_2.tif')
images3=findfile('RTOA_3.tif')
images4=findfile('RTOA_4.tif')
rtoa1 = READ_TIFF(images1,geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)
rtoa2 = READ_TIFF(images2,geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)
rtoa3 = READ_TIFF(images3,geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)
rtoa4 = READ_TIFF(images4,geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)
;Los Coeficientes 'coef_SPOT5_XS1_HRG2_DES.dat' fueron descargado de:
; http://www.cesbio.ups-tlse.fr/us/serveurs4.htm
dirname2=dialog_pickfile(/directory,title="Seleccionar Metadato")
cd,dirname2
file_coef1=findfile('coef_SPOT5_XS1_HRG2_DES.dat')
file_coef2=findfile('coef_SPOT5_XS2_HRG2_DES.dat')
file_coef3=findfile('coef_SPOT5_XS3_HRG2_DES.dat')
file_coef4=findfile('coef_SPOT5_XS4_HRG2_DES.dat')
rsup1=fltarr(2763,2579)
rsup2=fltarr(2763,2579)
rsup3=fltarr(2763,2579)
rsup4=fltarr(2763,2579)
thetas=90.0-62.769764 ; Ángulo cenit solar
thetav=20.678864 ; ángulo cenit sensor
phis=101.238012 ; Ángulo acimut solar

```

```

phiv=282.230340      ; Ángulo acimut sensor
uh2o=4.354           ; concentración de vapor de agua
uo3=0.237            ; ozono
presion=1013.25      ; Presión sobre el suelo (hPa)
tau550=0.288         ; espesor óptico
rsup1=smac_spot(thetas,thetav,phis,phiv,uh2o,uo3,tau550,presion,$
rtoa1,file_coef1)
rsup2=smac_spot(thetas,thetav,phis,phiv,uh2o,uo3,tau550,presion,$
rtoa2,file_coef2)
rsup3=smac_spot(thetas,thetav,phis,phiv,uh2o,uo3,tau550,presion,$
rtoa3,file_coef3)
rsup4=smac_spot(thetas,thetav,phis,phiv,uh2o,uo3,tau550,presion,$
rtoa4,file_coef4)
WRITE_TIFF,dirname1+path_sep()+'SMAC',$
+path_sep()+'SMAC_1'+'.tif',rsup1,geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY, /FLOAT
WRITE_TIFF,dirname1+path_sep()+'SMAC',$
+path_sep()+'SMAC_2'+'.tif',rsup2,geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY, /FLOAT
WRITE_TIFF,dirname1+path_sep()+'SMAC',$
+path_sep()+'SMAC_3'+'.tif',rsup3,geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY, /FLOAT
WRITE_TIFF,dirname1+path_sep()+'SMAC',$
+path_sep()+'SMAC_4'+'.tif',rsup4,geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY, /FLOAT
print,'FIN DEL PROCESO'
END
function smac_spot,tetas,tetav,phis,phiv,uh2o,uo3,taup550,pression,$
rtoa,file_coef
ca=leer_coef_smac(file_coef)
Dims=fltarr(2121,2121)
crd=180.0/!PI;
cdr=!PI/180.0;
us = cos(tetas*cdr)
uv = cos(tetav*cdr)
dphi=(phis-phiv)*cdr
Peq=pression/1013.0
m = 1./us + 1./uv
taup = (ca.a0taup)+(ca.a1taup)*taup550
to3 = 1.
th2o= 1.
to2 = 1.
tco2= 1.
tch4= 1.
uo2= (Peq^(ca.po2))
uco2= (Peq^(ca.pco2))
uch4= (Peq^(ca.pch4))
uno2= (Peq^(ca.pno2))
uco = (Peq^(ca.pco))
if (uh2o gt 0.) or (uo3 gt 0.) then begin
to3 = exp ((ca.ao3)*((uo3*m)^(ca.no3)))
th2o = exp ((ca.ah2o)*((uh2o*m)^(ca.nh2o)))
to2 = exp ((ca.ao2)*((uo2*m)^(ca.no2)))
tco2 = exp ((ca.aco2)*((uco2*m)^(ca.nco2)))
tch4 = exp ((ca.ach4)*((uch4*m)^(ca.nch4)))
tno2 = exp ((ca.ano2)*((uno2*m)^(ca.nno2)))
tco = exp ((ca.aco)*((uco*m)^(ca.nco)))
endif
ttetas = (ca.a0T) + (ca.a1T)*taup550/us + ((ca.a2T)*Peq +,$
(ca.a3T))/(1.+us)
ttetav = (ca.a0T) + (ca.a1T)*taup550/uv + ((ca.a2T)*Peq +,$
(ca.a3T))/(1.+uv)
s = (ca.a0s)*Peq+(ca.a3s)+(ca.a1s)*taup550+(ca.a2s)*(taup550^2)
cksi = - ((us*uv)+(sqrt(1.-us*us)*sqrt(1.-uv*uv)*cos(dphi)))
if cksi lt -1 then cksi=-1.0

```

```

ksiD = crd*acos(cksi)
ray_phase = 0.7190443*(1.+(cksi*cksi))+ 0.0412742
taurz=(ca.taur)*Peq
ray_ref=(taurz*ray_phase)/(4.*us*uv)
Res_ray=(ca.Resr1)+(ca.Resr2)*taurz*ray_phase/(us*uv)+(ca.Resr3)*,$
((taurz*ray_phase/(us*uv))^2)
; Reflectancia Atmosférica de Aerosoles
aer_phase =,$
(ca.a0P)+(ca.a1P)*ksiD+(ca.a2P)*ksiD*ksiD+(ca.a3P)*(ksiD^3)+,$
(ca.a4P)*(ksiD^4)
ak2 = (1. - (ca.wo))*(3.-(ca.wo)*3*(ca.gc))
ak = sqrt(ak2)
e = -3.*us*us*(ca.wo)/(4.*(1. - ak2*us*us))
f = -(1.-(ca.wo))*3.*(ca.gc)*us*us*(ca.wo)/(4.*(1. - ak2*us*us))
dp = e/(3.*us)+us*f ;
d = e+f
b = 2.*ak/(3.-(ca.wo)*3*(ca.gc))
del = exp( ak*taup)*(1.+b)*(1.+b) - exp(-ak*taup)*(1.-b)*(1.-b)
ww = (ca.wo)/4.
ss = us / (1. - ak2*us*us)
q1 = 2. + 3.*us + (1.-(ca.wo))*3.*(ca.gc)*us*(1.+2.*us)
q2 = 2. - 3.*us - (1.-(ca.wo))*3.*(ca.gc)*us*(1.-2.*us)
q3 = q2*exp(-taup/us)
c1 = ((ww*ss)/del) * ( q1*exp(ak*taup)*(1. + b) + q3*(1. - b))
c2 = -((ww*ss)/del) * (q1*exp(-ak*taup)*(1. - b) + q3*(1. + b))
cp1 = c1*ak / (3. - (ca.wo)*3.*(ca.gc))
cp2 = -c2*ak / (3. - (ca.wo)*3.*(ca.gc))
z = d - (ca.wo)*3.*(ca.gc)*uv*dp + (ca.wo)*aer_phase/4.
x = c1 - (ca.wo)*3.*(ca.gc)*uv*cp1
y = c2 - (ca.wo)*3.*(ca.gc)*uv*cp2
aa1 = uv / (1. + ak*uv)
aa2 = uv / (1. - ak*uv)
aa3 = us*uv / (us + uv)
aer_ref = x*aa1* (1. - exp( -taup/aa1))
aer_ref = aer_ref + y*aa2*( 1. - exp( -taup / aa2))
aer_ref = aer_ref + z*aa3*( 1. - exp( -taup / aa3))
aer_ref = aer_ref / ( us*uv )
Res_aer = ((ca.Resa1)+(ca.Resa2)*(taup*m*cksi)+(ca.Resa3)*,$
((taup*m*cksi)^2))+(ca.Resa4)*((taup*m*cksi)^3)
tautot=taup+taurz;
Res_6s = ((ca.Rest1)+(ca.Rest2)*(tautot*m*cksi )+,$
(ca.Rest3)*((tautot*m*cksi)^2))+(ca.Rest4)*((tautot*m*cksi)^3)
atm_ref = ray_ref - Res_ray + aer_ref - Res_aer + Res_6s
tg = th2o * to3 * to2 * tco2 * tch4* tco * tno2
r_surf=fltarr(2763,2579)
for i=0, 2762 do begin
r_surf(i,*) = rtoa(i,*)-(atm_ref*tg)
r_surf(i,*) = r_surf(i,*)/((tg*ttetas*ttetav)+(r_surf(i,*)*s))
endfor
return, r_surf
end
function leer_coef_smac, file_coef
data = {
ah2o:0d,nh2o:0d,ao3:0d,no3:0d,ao2:0d,no2:0d,po2:0d,aco2:0d,nco2:0d,$
pco2:0d,ach4:0d,nch4:0d,pch4:0d,ano2:0d,nno2:0d,pno2:0d,aco:0d,$
nco:0d,pco:0d,a0s:0d,a1s:0d,a2s:0d,a3s:0d,a0T:0d,a1T:0d,a2T:0d,$
a3T:0d,taur:0d,sr:0d,a0taup:0d,a1taup:0d,wo:0d,gc:0d,a0P:0d,a1P:0d,$
a2P:0d,a3P:0d,a4P:0d,Resa1:0d,Resa2:0d,Resa3:0d,Resa4:0d,Resr1:0d,$
Resr2:0d,Resr3:0d,Rest1:0d,Rest2:0d,Rest3:0d,Rest4:0d}
OpenR, lun, file_coef, /GET_LUN
ReadF, lun, data

```

```

Free_Lun, lun
return, data
end

```

Programa B.4

```

;#####
; NOMBRE DEL PROGRAMA: ND_A_RADIANCIA.PRO
; PROPÓSITO: CONVIERTE DE NÚMEROS DIGITALES A RADIANCIA ESPECTRAL DE
; IMÁGENES TM Y ETM+.
;#####
PRO ND_A_RADIANCIA
dirname=dialog_pickfile(/directory,title="Seleccionar la carpeta de
las imágenes TIFF.")
cd,dirname
file_mkdir,'RADIANCIA'
mtlfile=findfile('*MTL.txt')
header = strarr(100)
openr, lun, mtlfile, /get_lun
readf, lun, header
junk=""
reads, header(60), junk, Lmax1, FORMAT='(A16,x, F8.3)'
reads, header(61), junk, Lmin1, FORMAT='(A16,x, F8.3)'
reads, header(62), junk, Lmax2, FORMAT='(A16,x, F8.3)'
reads, header(63), junk, Lmin2, FORMAT='(A16,x, F8.3)'
reads, header(64), junk, Lmax3, FORMAT='(A16,x, F8.3)'
reads, header(65), junk, Lmin3, FORMAT='(A16,x, F8.3)'
reads, header(66), junk, Lmax4, FORMAT='(A16,x, F8.3)'
reads, header(67), junk, Lmin4, FORMAT='(A16,x, F8.3)'
reads, header(68), junk, Lmax5, FORMAT='(A16,x, F8.3)'
reads, header(69), junk, Lmin5, FORMAT='(A16,x, F8.3)'
reads, header(72), junk, Lmax7, FORMAT='(A16,x, F8.3)'
reads, header(73), junk, Lmin7, FORMAT='(A16,x, F8.3)'
Lmax=[Lmax1, Lmax2, Lmax3, Lmax4, Lmax5, Lmax7]
Lmin=[Lmin1, Lmin2, Lmin3, Lmin4, Lmin5, Lmin7]
print, Lmax
print, Lmin
Qcalmax=255.0
Qcalmin=1.0
Gain=fltarr(6)
for nm=0,n_elements(Gain)-1 do begin
Gain[nm]=(Lmax[nm]-Lmin[nm])/(Qcalmax-Qcalmin)
endfor
print, Gain
free_lun,lun
lista=findfile('*.tif')
print,n_elements(lista)
for num=0, n_elements(lista)-1 do begin
B=read_tiff(dirname+lista[num],geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)
img_tmp=read_tiff(dirname+lista[0],geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)
dimension=size(img_tmp)
ny=dimension[1]
nx=dimension[2]
L=bytarr(ny,nx)
L=temporary((Gain[num])*(B-Qcalmin) + Lmin[num])
WRITE_TIFF,dirname+path_sep()+ 'RADIANCIA'+path_sep()+ 'RAD_'+$,
strtrim(string(num+1),1)+'.tif',L,geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY,/FLOAT
endfor
print, '##### FIN DEL PROCESO #####'
END

```

Anexo C

Tabla C.1. Muestras in-situ tomadas del cultivo de caña de azúcar en diferentes condiciones agroecológicas.

N°	WGS 84 UTM ZONA 17S		FECHA	CE(1:1) dS/m	Descripción
Muestra	ESTE(m)	NORTE(m)			
1	642750.13	9249341.81	10/01/2009	0.6	Con cultivo, en regular estado
2	646791.08	9246883.84	02/02/2009	3.1	Con cultivo, en buen estado
3	647837.06	9246464.84	09/02/2009	9.2	Con cultivo, en mal estado
4	648363.06	9246454.84	23/02/2009	1.2	Con cultivo, en muy buen estado
5	648333.05	9246036.85	09/02/2009	0.8	Sin cultivo, en preparación
6	645683.09	9245872.85	16/02/2009	2.5	Sin cultivo, en preparación
7	654525.98	9245138.85	16/03/2009	7.4	En preparación

Tabla C.2. Extracción de los valores de reflectancia para las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7.de la imagen TM.

N°	WGS 84 UTM Zona 17S		FECHA	CE1:1 dS/m	Descripción	Columna y Fila de la Imagen		Reflectancia de la Imagen TM (20/04/2008)					
Muestra	ESTE(m)	NORTE(m)				X	Y	B1	B2	B3	B4	B5	B7
1	633830.0	9246434.0	04/03/2008	0.8	sin cultivo, en preparación	663	862	0.0490	0.0802	0.0924	0.1695	0.2440	0.2023
2	633344.0	9245916.0	04/03/2008	0.6	sin cultivo, en preparación	647	880	0.0564	0.0838	0.0982	0.1584	0.2452	0.2134
3	632903.0	9246081.0	04/03/2008	0.4	sin cultivo, en preparación	632	874	0.0638	0.0961	0.1114	0.1846	0.2521	0.2154
4	632853.0	9245768.0	04/03/2008	0.7	sin cultivo, en preparación	631	885	0.0645	0.1014	0.1152	0.1868	0.2569	0.2204
5	632549.0	9245138.0	04/03/2008	0.6	sin cultivo, en preparación	620	906	0.0698	0.0993	0.1093	0.1852	0.2377	0.1940
6	632330.0	9245592.0	04/03/2008	1.1	sin cultivo, en preparación	613	890	0.0655	0.0979	0.1098	0.1936	0.2478	0.2026
7	631505.2	9244759.6	04/03/2008	1.1	Por Preparar	586	918	0.0471	0.0800	0.0844	0.2244	0.2296	0.1557
8	630978.9	9245143.2	04/03/2008	0.7	Por Preparar	568	905	0.0616	0.0960	0.1053	0.1737	0.2391	0.1953
9	631288.6	9245689.2	04/03/2008	1.5	Por Preparar	578	887	0.0729	0.1056	0.1099	0.2095	0.2404	0.1922
10	632250.0	9245071.4	04/03/2008	1.1	Por Preparar	611	908	0.0712	0.1080	0.1212	0.2176	0.2492	0.2054
11	636855.9	9248266.5	05/03/2008	0.4	sin cultivo, en preparación	764	801	0.0836	0.1293	0.1551	0.2214	0.2745	0.2383
12	636745.3	9247371.7	05/03/2008	0.5	sin cultivo, en preparación	760	831	0.0545	0.0878	0.1054	0.1517	0.2100	0.1718
13	646223.5	9246586.0	11/03/2008	4.3	con cultivo, recién sembrado	1076	857	0.0853	0.1342	0.1480	0.2387	0.2794	0.2310
14	645835.9	9246494.7	11/03/2008	5.7	con cultivo, recién sembrado	1063	860	0.0880	0.1288	0.1490	0.2239	0.2806	0.2393
15	660308.3	9250619.5	11/03/2008	0.6	En preparación	1546	723	0.0640	0.0964	0.1133	0.1717	0.2418	0.2141
16	660067.0	9250911.5	11/03/2008	1.6	En preparación	1538	713	0.0566	0.0978	0.1254	0.1799	0.2613	0.2351
17	659915.2	9250582.4	11/03/2008	1.2	En preparación	1533	724	0.0312	0.0594	0.0738	0.1287	0.1824	0.1571
18	659616.2	9250807.6	11/03/2008	2.8	En preparación	1523	717	0.0384	0.0751	0.0944	0.1630	0.2240	0.1923
19	635021.0	9248733.0	12/03/2008	0.8	sin cultivo, en preparación	703	786	0.0705	0.1047	0.1218	0.1955	0.2628	0.2203
20	634876.0	9248316.9	12/03/2008	0.4	sin cultivo, en preparación	698	800	0.0693	0.1039	0.1182	0.1863	0.2544	0.2202
21	634521.5	9247344.4	12/03/2008	1	sin cultivo, en preparación	686	832	0.0595	0.0951	0.1084	0.1900	0.2489	0.2017
22	634244.9	9247727.5	12/03/2008	0.5	sin cultivo, en preparación	677	819	0.0577	0.0900	0.1042	0.1809	0.2575	0.2151

23	635310.3	9252067.5	12/03/2008	0.8	sin cultivo, en preparación	713	675	0.0722	0.1059	0.1239	0.1753	0.2238	0.1988
24	634459.1	9252111.6	12/03/2008	1.3	sin cultivo, en preparación	684	673	0.0589	0.0913	0.1041	0.1459	0.2116	0.1861
25	644326.6	9246360.5	12/03/2008	1	sin cultivo, en preparación	1013	865	0.0953	0.1397	0.1612	0.2358	0.2958	0.2530
26	644261.9	9246244.0	12/03/2008	0.3	sin cultivo, en preparación	1011	869	0.0848	0.1272	0.1523	0.2012	0.2846	0.2591
27	634029.1	9245484.6	17/03/2008	0.7	sin cultivo, en preparación	670	894	0.0744	0.1182	0.1358	0.2010	0.2497	0.2108
28	634277.8	9247297.5	17/03/2008	0.5	sin cultivo, en preparación	678	834	0.0562	0.0863	0.0986	0.1740	0.2362	0.1948
29	634244.2	9246912.4	17/03/2008	4.2	sin cultivo, en preparación	677	846	0.0488	0.0777	0.0848	0.2055	0.2189	0.1565
30	634158.8	9246526.7	17/03/2008	0.5	sin cultivo, en preparación	674	859	0.0558	0.0862	0.0927	0.1906	0.2356	0.1782
31	633887.2	9245881.4	17/03/2008	0.7	sin cultivo, en preparación	665	881	0.0774	0.1106	0.1267	0.1966	0.2597	0.2275
32	653699.8	9246319.7	17/03/2008	0.8	sin cultivo, en preparación	1325	866	0.0873	0.1257	0.1451	0.1947	0.2491	0.2099
33	653605.7	9245702.5	17/03/2008	4.6	En preparación	1322	887	0.0751	0.1154	0.1306	0.1833	0.2522	0.2199
34	636088.5	9246250.6	18/03/2008	0.4	sin cultivo, en preparación	738	868	0.0734	0.1067	0.1224	0.1734	0.2551	0.2316
35	635632.1	9246403.4	18/03/2008	0.4	sin cultivo, en preparación	723	863	0.0611	0.0931	0.1106	0.1627	0.2265	0.2012
36	636525.0	9246671.1	18/03/2008	0.4	sin cultivo, en preparación	753	854	0.0602	0.0903	0.1061	0.1681	0.2244	0.1931
37	634858.9	9246191.8	18/03/2008	0.4	sin cultivo, en preparación	697	870	0.0669	0.1005	0.1162	0.1811	0.2414	0.2040
38	635803.5	9245576.9	18/03/2008	0.7	sin cultivo, en preparación	729	891	0.0751	0.1093	0.1279	0.1836	0.2540	0.2198
39	637602.8	9246762.2	24/03/2008	0.7	sin cultivo, en preparación	789	851	0.0754	0.1195	0.1446	0.1973	0.3009	0.2792
40	637427.9	9246382.1	24/03/2008	0.6	sin cultivo, en preparación	783	864	0.0622	0.0949	0.1155	0.1553	0.2465	0.2314
41	636760.4	9246663.9	24/03/2008	1	sin cultivo, en preparación	761	855	0.0640	0.0934	0.1161	0.1620	0.2690	0.2538
42	636812.4	9246135.2	24/03/2008	0.5	sin cultivo, en preparación	763	872	0.0630	0.0944	0.1132	0.1621	0.2722	0.2507
43	640324.0	9248412.0	25/03/2008	7.8	sin cultivo, en preparación	880	796	0.0901	0.1345	0.1538	0.2120	0.2764	0.2454
44	639770.0	9248864.0	25/03/2008	0.6	sin cultivo, en preparación	861	781	0.0491	0.0814	0.0887	0.2092	0.2343	0.1781
45	639904.0	9248241.0	25/03/2008	1.6	sin cultivo, en preparación	866	802	0.0517	0.0795	0.0898	0.1767	0.2256	0.1729
46	639680.0	9247664.0	25/03/2008	0.8	sin cultivo, en preparación	858	821	0.0713	0.1046	0.1200	0.1689	0.2597	0.2302
47	639271.0	9247119.0	25/03/2008	1.1	sin cultivo, en preparación	845	840	0.0403	0.0708	0.0783	0.2123	0.2033	0.1427
48	654923.1	9246690.2	31/03/2008	2.6	sin cultivo, en preparación	1366	854	0.0639	0.0985	0.1140	0.1629	0.2230	0.1915
49	655410.3	9245765.8	31/03/2008	3.3	sin cultivo, en preparación	1383	885	0.0637	0.0941	0.1141	0.1555	0.2167	0.1878
50	654331.7	9246444.0	31/03/2008	5.7	sin cultivo, en preparación	1347	862	0.0740	0.1072	0.1190	0.1944	0.2266	0.1886

51	654608.6	9246214.8	31/03/2008	0.9	sin cultivo, en preparación	1356	870	0.0611	0.0949	0.1120	0.1667	0.2208	0.1866
52	654867.5	9245764.7	31/03/2008	3.5	sin cultivo, en preparación	1364	885	0.0708	0.1090	0.1270	0.1993	0.2405	0.2023
53	654369.3	9246022.0	31/03/2008	8.7	sin cultivo, en preparación	1348	876	0.0835	0.1282	0.1500	0.2172	0.2580	0.2115
54	635962.3	9249369.3	01/04/2008	1	sin cultivo, en preparación	734	765	0.0697	0.1078	0.1317	0.1836	0.2699	0.2493
55	635288.7	9249326.6	01/04/2008	0.6	sin cultivo, en preparación	712	766	0.0700	0.1067	0.1240	0.1825	0.2576	0.2344
56	635953.8	9248660.1	01/04/2008	0.6	sin cultivo, en preparación	734	788	0.0712	0.1017	0.1244	0.1712	0.2749	0.2492
57	635599.4	9248735.6	01/04/2008	0.9	sin cultivo, en preparación	722	786	0.0622	0.0901	0.1108	0.1738	0.2413	0.2079
58	635702.1	9247903.4	01/04/2008	0.6	sin cultivo, en preparación	726	813	0.0673	0.0970	0.1153	0.1672	0.2445	0.2190
59	635519.9	9247545.2	01/04/2008	0.5	sin cultivo, en preparación	719	825	0.0587	0.0920	0.1087	0.1605	0.2473	0.2264
60	652206.3	9246661.6	08/04/2008	0.8	sin cultivo, en preparación	1276	855	0.0653	0.0987	0.1071	0.2087	0.2211	0.1804
61	652056.5	9246334.9	08/04/2008	0.8	sin cultivo, en preparación	1271	866	0.0785	0.1065	0.1226	0.1727	0.2309	0.2000
62	652217.1	9246130.8	08/04/2008	5.4	sin cultivo, en preparación	1276	872	0.0863	0.1259	0.1444	0.2027	0.2389	0.2053
63	651194.4	9246607.5	08/04/2008	2.8	sin cultivo, en preparación	1242	857	0.0816	0.1136	0.1302	0.1884	0.2347	0.1984
64	651502.0	9246413.8	08/04/2008	1.7	sin cultivo, en preparación	1252	863	0.0837	0.1171	0.1346	0.1774	0.2510	0.2272
65	652452.7	9246216.6	08/04/2008	1.6	sin cultivo, en preparación	1284	870	0.0871	0.1152	0.1294	0.1840	0.2276	0.1950
66	652292.8	9246261.0	08/04/2008	1.1	sin cultivo, en preparación	1279	868	0.0760	0.1075	0.1216	0.1637	0.2262	0.1957
67	636622.0	9245981.4	14/04/2008	0.6	sin cultivo, en preparación	756	877	0.0739	0.1195	0.1371	0.2151	0.2562	0.2162
68	636129.1	9245640.6	14/04/2008	0.5	sin cultivo, en preparación	740	889	0.0813	0.1098	0.1277	0.1827	0.2754	0.2493
69	636189.9	9245385.8	14/04/2008	0.8	sin cultivo, en preparación	742	897	0.0528	0.0907	0.1020	0.1963	0.2190	0.1759
70	652454.5	9246137.7	14/04/2008	9.8	sin cultivo, en preparación	1284	872	0.0812	0.1107	0.1241	0.1753	0.2228	0.1918
71	652300.1	9245969.1	14/04/2008	1.3	sin cultivo, en preparación	1279	878	0.0697	0.1010	0.1109	0.1823	0.2153	0.1753
72	652674.2	9245721.4	14/04/2008	1	sin cultivo, en preparación	1291	886	0.0838	0.1190	0.1355	0.1879	0.2428	0.2141
73	651807.2	9246228.4	14/04/2008	1.3	sin cultivo, en preparación	1262	869	0.0882	0.1252	0.1434	0.2103	0.2407	0.2072
74	637400.7	9246069.4	21/04/2008	1.9	sin cultivo, en preparación	782	875	0.0657	0.1102	0.1322	0.2139	0.2448	0.2168
75	637169.7	9246576.9	21/04/2008	0.7	sin cultivo, en preparación	774	858	0.0719	0.1118	0.1351	0.1891	0.2850	0.2624
76	632408.5	9247055.5	22/04/2008	1.1	sin cultivo, en preparación	616	842	0.0573	0.0837	0.0932	0.1831	0.2376	0.1824
77	632610.4	9246920.4	22/04/2008	0.7	sin cultivo, en preparación	623	846	0.0496	0.0787	0.0866	0.1875	0.2151	0.1658
78	632446.2	9247747.4	22/04/2008	2.3	sin cultivo, en preparación	617	819	0.0606	0.0989	0.1060	0.2175	0.2144	0.1600

79	632584.3	9247546.8	22/04/2008	5.2	sin cultivo, en preparación	622	825	0.0512	0.0847	0.0881	0.1670	0.2048	0.1649
80	636560.7	9246985.5	28/04/2008	0.5	sin cultivo, en preparación	754	844	0.0621	0.0942	0.1136	0.1633	0.2417	0.2110
81	636310.7	9246032.5	28/04/2008	0.4	sin cultivo, en preparación	746	876	0.0739	0.1124	0.1310	0.1919	0.2612	0.2305
82	635090.6	9245857.0	28/04/2008	0.3	sin cultivo, en preparación	705	882	0.0654	0.1029	0.1227	0.1785	0.2410	0.2045
83	634257.1	9246031.9	28/04/2008	0.5	sin cultivo, en preparación	677	876	0.0784	0.1155	0.1352	0.1844	0.2555	0.2197
84	635424.8	9245988.7	28/04/2008	0.4	sin cultivo, en preparación	716	877	0.0822	0.1145	0.1355	0.1828	0.2655	0.2377
85	636551.7	9246406.4	28/04/2008	0.8	sin cultivo, en preparación	754	863	0.0632	0.0981	0.1162	0.1643	0.2378	0.2142
86	635304.8	9246487.8	28/04/2008	0.3	sin cultivo, en preparación	712	861	0.0667	0.0995	0.1150	0.1607	0.2297	0.2025
87	636052.9	9245764.9	28/04/2008	0.4	sin cultivo, en preparación	737	885	0.0654	0.1016	0.1154	0.2144	0.2478	0.1991
88	634737.9	9246021.5	28/04/2008	0.6	sin cultivo, en preparación	693	876	0.0617	0.0940	0.1092	0.1694	0.2294	0.1958
89	635799.4	9245994.6	28/04/2008	0.4	sin cultivo, en preparación	729	877	0.0834	0.1179	0.1371	0.1846	0.2714	0.2446
90	634743.0	9245846.9	28/04/2008	0.6	sin cultivo, en preparación	694	882	0.0712	0.1122	0.1316	0.2313	0.2386	0.1942
91	635821.3	9245785.1	28/04/2008	1.3	sin cultivo, en preparación	730	884	0.0731	0.1049	0.1246	0.1653	0.2489	0.2260
92	635349.9	9246210.7	28/04/2008	0.4	sin cultivo, en preparación	714	870	0.0748	0.1103	0.1274	0.1766	0.2606	0.2333
93	635406.7	9245774.4	28/04/2008	0.9	sin cultivo, en preparación	716	884	0.0751	0.1101	0.1306	0.1875	0.2480	0.2177
94	635506.4	9245586.4	28/04/2008	0.5	sin cultivo, en preparación	719	891	0.0747	0.1215	0.1389	0.2118	0.2316	0.1957
95	635812.1	9246176.4	28/04/2008	0.5	sin cultivo, en preparación	729	871	0.0845	0.1213	0.1377	0.1861	0.2768	0.2522
96	635915.4	9246600.6	28/04/2008	2.9	sin cultivo, en preparación	733	857	0.0612	0.0867	0.1010	0.1493	0.2269	0.1976
97	654500.6	9246723.7	29/04/2008	1.7	sin cultivo, en preparación	1352	853	0.0727	0.1086	0.1315	0.1732	0.2337	0.1989
98	655276.7	9246223.9	29/04/2008	0.6	sin cultivo, en preparación	1378	869	0.0613	0.1031	0.1220	0.1757	0.2190	0.1832
99	655274.8	9245842.8	29/04/2008	1.7	sin cultivo, en preparación	1378	882	0.0715	0.1100	0.1300	0.1686	0.2359	0.2069
100	654413.8	9246394.6	29/04/2008	1.3	sin cultivo, en preparación	1349	864	0.0702	0.1014	0.1101	0.1653	0.2125	0.1729
101	654981.1	9245816.7	29/04/2008	0.8	sin cultivo, en preparación	1368	883	0.0728	0.1131	0.1388	0.1862	0.2459	0.2109
102	654490.1	9245895.9	29/04/2008	14.2	sin cultivo, en preparación	1352	880	0.0960	0.1385	0.1628	0.2213	0.2612	0.2185
103	634788.8	9247921.6	05/05/2008	0.4	sin cultivo, en preparación	695	813	0.0664	0.1001	0.1184	0.1764	0.2592	0.2240
104	634721.3	9247654.5	05/05/2008	0.8	sin cultivo, en preparación	693	822	0.0621	0.0940	0.1123	0.1775	0.2563	0.2134
105	634487.7	9246977.1	05/05/2008	0.6	sin cultivo, en preparación	685	844	0.0692	0.1020	0.1190	0.1777	0.2636	0.2211
106	634724.0	9248251.0	05/05/2008	0.7	sin cultivo, en preparación	693	802	0.0625	0.0995	0.1111	0.1856	0.2508	0.2030

107	634626.0	9247932.6	05/05/2008	1	sin cultivo, en preparación	690	812	0.0616	0.0902	0.1025	0.1684	0.2505	0.2050
108	634492.6	9248500.5	05/05/2008	0.6	sin cultivo, en preparación	685	793	0.0577	0.0880	0.0977	0.1908	0.2352	0.1878
109	634376.5	9248164.1	05/05/2008	0.4	sin cultivo, en preparación	681	805	0.0591	0.0877	0.1006	0.1762	0.2517	0.2043
110	634375.6	9247174.2	05/05/2008	1.2	sin cultivo, en preparación	681	838	0.0573	0.0834	0.0930	0.1672	0.2311	0.1868
111	634315.3	9246619.1	05/05/2008	0.6	sin cultivo, en preparación	679	856	0.0706	0.1033	0.1156	0.1810	0.2603	0.2262
112	634187.9	9246074.1	05/05/2008	0.5	sin cultivo, en preparación	675	874	0.0772	0.1098	0.1297	0.1799	0.2665	0.2359
113	634162.3	9247518.4	05/05/2008	0.8	sin cultivo, en preparación	674	826	0.0707	0.1071	0.1209	0.1883	0.2634	0.2312
114	633958.8	9247157.2	05/05/2008	6.7	sin cultivo, en preparación	667	838	0.0754	0.1103	0.1205	0.1904	0.2439	0.2053
115	633724.6	9247304.8	05/05/2008	0.4	sin cultivo, en preparación	660	833	0.0685	0.1012	0.1143	0.1873	0.2511	0.2097
116	633522.9	9247158.5	05/05/2008	0.6	sin cultivo, en preparación	653	838	0.0505	0.0731	0.0827	0.1624	0.2246	0.1777
117	633880.0	9246853.5	05/05/2008	0.9	sin cultivo, en preparación	665	848	0.0547	0.0804	0.0898	0.1653	0.2312	0.1889
118	633942.0	9246289.8	05/05/2008	0.7	sin cultivo, en preparación	667	867	0.0621	0.0914	0.1035	0.1767	0.2384	0.1973
119	633788.9	9245375.7	05/05/2008	0.4	sin cultivo, en preparación	662	898	0.0622	0.0960	0.1065	0.2067	0.2494	0.2004
120	664027.5	9252157.3	12/05/2008	1.13	en preparación	1670	672	0.0514	0.0781	0.0936	0.1367	0.2070	0.1822
121	664308.1	9251846.5	12/05/2008	0.621	En preparación	1679	682	0.0507	0.0786	0.0929	0.1506	0.2113	0.1821
122	664098.9	9251975.8	12/05/2008	0.51	En preparación	1672	678	0.0583	0.0832	0.0962	0.1356	0.2126	0.1899
123	664216.4	9251692.2	12/05/2008	0.574	En preparación	1676	687	0.0501	0.0767	0.0893	0.1280	0.1862	0.1638
124	663965.0	9251874.9	12/05/2008	0.84	En preparación	1668	681	0.0509	0.0718	0.0810	0.1249	0.2052	0.1820
125	664093.5	9251561.7	12/05/2008	0.288	En preparación	1672	691	0.0532	0.0832	0.0975	0.1542	0.2044	0.1755
126	663795.7	9251479.6	12/05/2008	0.392	En preparación	1662	694	0.0545	0.0839	0.0985	0.1752	0.2157	0.1749
127	663854.9	9251679.1	12/05/2008	0.73	En preparación	1664	688	0.0630	0.0907	0.1072	0.1534	0.2356	0.2102
128	663779.3	9251916.3	12/05/2008	0.78	En preparación	1661	680	0.0499	0.0843	0.0971	0.1471	0.2191	0.1942
129	663827.9	9252138.3	12/05/2008	0.641	En preparación	1663	672	0.0495	0.0814	0.0968	0.1423	0.2169	0.1952
130	631236.4	9246257.1	13/05/2008	2.5	Por Preparar	577	868	0.0837	0.1171	0.1339	0.2023	0.2542	0.2117
131	630983.2	9245957.1	13/05/2008	1.6	Por Preparar	568	878	0.0662	0.0981	0.1076	0.1821	0.2302	0.1867
132	630723.6	9246269.8	13/05/2008	4.8	Por Preparar	560	868	0.0878	0.1239	0.1379	0.1961	0.2442	0.2102
133	630414.5	9245641.0	13/05/2008	3.1	Por Preparar	549	889	0.0638	0.0930	0.1018	0.1790	0.2149	0.1754
134	630757.1	9245452.9	13/05/2008	14.3	Por Preparar	561	895	0.0966	0.1391	0.1569	0.2241	0.2592	0.2259

135	630217.2	9245460.0	13/05/2008	9.2	Por Preparar	543	895	0.0873	0.1268	0.1358	0.2199	0.2467	0.1983
136	630295.8	9246269.6	13/05/2008	1.6	Por Preparar	545	868	0.0646	0.0930	0.0989	0.1913	0.2164	0.1733
137	630374.2	9245869.3	13/05/2008	6.8	Por Preparar	548	881	0.0819	0.1153	0.1278	0.1952	0.2410	0.2011
138	663705.5	9251573.9	19/05/2008	0.7	En preparación	1659	691	0.0525	0.0828	0.0982	0.1546	0.2086	0.1772
139	663511.9	9251569.4	19/05/2008	1	En preparación	1653	691	0.0533	0.0824	0.0980	0.1449	0.2101	0.1833
140	663296.2	9251613.1	19/05/2008	0.8	En preparación	1645	690	0.0565	0.0843	0.0988	0.1466	0.2125	0.1859
141	663033.5	9251649.5	19/05/2008	1.1	En preparación	1637	689	0.0482	0.0738	0.0866	0.1446	0.2008	0.1746
142	663612.7	9251889.2	19/05/2008	0.7	En preparación	1656	681	0.0571	0.0876	0.1024	0.1533	0.2231	0.1951
143	663295.8	9251889.9	19/05/2008	0.6	En preparación	1645	681	0.0544	0.0817	0.0999	0.1519	0.2429	0.2134
144	663036.3	9251930.1	19/05/2008	0.3	En preparación	1637	679	0.0564	0.0846	0.0981	0.1546	0.2178	0.1815
145	663695.0	9252057.4	19/05/2008	0.8	En preparación	1659	675	0.0596	0.0876	0.1036	0.1573	0.2254	0.1980
146	663410.9	9252025.6	19/05/2008	0.5	En preparación	1649	676	0.0604	0.0880	0.1016	0.1530	0.2496	0.2180
147	655125.7	9246638.5	26/05/2008	0.9	sin cultivo, en preparación	1373	856	0.0674	0.0991	0.1184	0.1688	0.2212	0.1880
148	654708.3	9246770.9	26/05/2008	0.5	sin cultivo, en preparación	1359	851	0.0646	0.1014	0.1232	0.1616	0.2256	0.1956
149	654655.0	9246613.7	26/05/2008	0.5	sin cultivo, en preparación	1357	856	0.0723	0.1116	0.1282	0.1742	0.2254	0.1965
150	654631.2	9246556.9	26/05/2008	0.8	sin cultivo, en preparación	1357	858	0.0609	0.0970	0.1131	0.1556	0.2086	0.1825
151	654597.0	9246481.5	26/05/2008	1.3	sin cultivo, en preparación	1355	861	0.0654	0.0963	0.1122	0.1531	0.2147	0.1885
152	654183.1	9245858.4	26/05/2008	0.9	sin cultivo, en preparación	1342	882	0.0766	0.1107	0.1284	0.1963	0.2346	0.1889
153	664812.5	9251912.0	26/05/2008	0.423	En preparación	1696	680	0.0312	0.0601	0.0576	0.3039	0.1862	0.0924
154	664590.6	9252047.7	26/05/2008	0.468	En preparación	1689	675	0.0247	0.0531	0.0478	0.3115	0.1822	0.0826
155	664416.7	9252132.8	26/05/2008	0.525	En preparación	1683	672	0.0313	0.0607	0.0538	0.2847	0.1928	0.0938
156	664629.6	9251842.8	26/05/2008	0.408	En preparación	1690	682	0.0357	0.0697	0.0726	0.3017	0.2270	0.1214
157	664386.5	9252009.5	26/05/2008	0.535	En preparación	1682	677	0.0672	0.1107	0.1337	0.3188	0.3439	0.2160
158	664201.2	9252107.3	26/05/2008	0.775	En preparación	1676	673	0.0694	0.1181	0.1430	0.3166	0.3475	0.2245