



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DEL POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PERCEPCIÓN REMOTA Y TÉCNICAS GEOFÍSICAS DE
PROSPECCIÓN PARA EL ESTUDIO DE UN ASENTAMIENTO
DEL FORMATIVO EN LA LAGUNA TLAXCALA, MÉXICO.

T E S I S

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA

JORGE ESTANISLAO BLANCAS VÁZQUEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. LUIS ALBERTO BARBA PINGARRÓN

UNAM
POSGRADO
Ciencias de la Tierra



MÉXICO D. F. MAYO 2012.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS:

Mi más sincero agradecimiento a todas las personas que me apoyaron para la realización de este trabajo:

A mi esposa Yolanda Leticia por su comprensión, colaboración y apoyo en todo momento.

A mi mamá, hermanos y sobrinos que siempre me han animado para iniciar y llevar a buen fin nuevos proyectos.

Al Dr. Luis Barba por la dirección de esta Tesis, su amistad, asesoría, respaldo y buenos consejos para encauzar correctamente los objetivos de este trabajo.

Al Dr. Agustín Ortiz y al Arqueólogo Rodrigo Ortiz por su ayuda valiosa en el trabajo de prospección geofísica y fotografía aérea, por su amistad y su apoyo en todo momento.

Al Dr. David Carballo porque siempre conté con su asesoría inmediata para la interpretación geo-arqueológica.

A los miembros del Jurado Dr. Jorge Gama, Dr. René Chávez, Dr. Raúl Aguirre y mis profesores: Dra. Elizabeth Solleiro, Dra. Rosa María Prol, Dra. Claudia Arango, Dra. Laura Beramendi, M.C. Galia González, Dra. Blanca Prado, Dra. Lucy Mora, Dra. Cecilia Caballero, Dr. Luis Alva y Dr. Avto Gogichaisvili por transmitir y compartir sus conocimientos, y tener siempre buena disposición para trabajar en forma multidisciplinaria.

Y especialmente a la UNAM por ser la mejor universidad de México en donde podemos desarrollar libremente nuestro trabajo.



Ciudad Universitaria, D.F. a 12 de abril de 2012.

Asunto: Voto aprobatorio

Comité Académico

Posgrado en Ciencias de la Tierra

UNAM

Por medio de la presente me permito informarles que he revisado cuidadosamente el trabajo que presenta el alumno **Jorge Estanislao Blancas Vázquez**, para obtener el grado de **Maestro en Ciencias**, el cual lleva por título: "**Percepción remota y técnicas geofísicas de prospección para el estudio de un asentamiento del Formativo en La Laguna Tlaxcala, México**". Considero que la tesis presentada reúne los requisitos para que el alumno pueda graduarse.

Sin más por el momento, y agradeciendo la atención que se sirvan prestar a la presente, reciban un cordial saludo.

Atentamente

Dr. Luis Alberto Barba Pingarrón

Boston University College of Arts & Sciences
Department of Archaeology

675 Commonwealth Avenue
Boston, Massachusetts 02215
T 617-353-3415 F 617-353-6800
www.bu.edu/archaeology



12 de Abril de 2012

Asunto: Voto aprobatorio

Comité Académico
Posgrado en Ciencias de la Tierra
UNAM

Por medio de la presente informo a su amable atención que he revisado con detalle el trabajo de Tesis que presenta el alumno Jorge Estanislao Blancas Vázquez, para obtener el grado de Maestro en Ciencias. Dicho documento lleva por título: "Percepción remota y técnicas geofísicas de prospección para el estudio de un asentamiento del Formativo en La Laguna Tlaxcala, México". Evalúo que la tesis presentada reúne los requisitos académicos para que el alumno pueda graduarse.

Sin más por el momento, y agradeciendo la atención que se sirvan prestar a la presente, reciban un cordial saludo.

Atentamente:

A handwritten signature in black ink, appearing to read "David Carballo".

Dr. David Carballo
Assistant Professor



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE GEOLOGIA
APARTADO POSTAL 70-296 CIUDAD UNIVERSITARIA
04510 MEXICO, D. F.

12 de abril de 2012.

Asunto: Voto aprobatorio

Comité Académico

Posgrado en Ciencias de la Tierra

UNAM

Por medio de la presente informo a su amable atención que he revisado con detalle el trabajo de Tesis que presenta el alumno **Jorge Estanislao Blancas Vázquez**, para obtener el grado de **Maestro en Ciencias**. Dicho documento lleva por título: "**Percepción remota y técnicas geofísicas de prospección para el estudio de un asentamiento del Formativo en La Laguna Tlaxcala, México**". Evalúo que la tesis presentada reúne los requisitos académicos para que el alumno pueda graduarse.

Sin más por el momento, y agradeciendo su fina atención, reciban un cordial saludo.

Atentamente:

Nombre y firma del jurado



Dr. René E. Chávez
Jefe de Departamento
Tel: (5255)5622-4147
Fax: (5255)5550-2486
exprene@geofisica.unam.mx

Departamento de Exploración y Geomagnetismo
Cd. Universitaria, Circuito Exterior s/n
04510 México D.F.

18 de abril de 2012

Asunto: Voto aprobatorio

Comité Académico

Posgrado en Ciencias de la Tierra

UNAM

Por medio de la presente me permito informarles que he revisado el trabajo que presenta el alumno **Jorge Estanislao Blancas Vázquez**, para obtener el grado de **Maestro en Ciencias**, el cual lleva por título: "**Percepción remota y técnicas geofísicas de prospección para el estudio de un asentamiento del Formativo en La Laguna Tlaxcala, México**". Considero que la tesis presentada reúne los requisitos para que el alumno pueda graduarse.

Sin más por el momento, y agradeciendo la atención que se sirvan prestar a la presente, reciban un cordial saludo.

Atentamente:

Dr. René Efraim Chávez Segura



Fecha: 20/04/2012

Asunto: Voto aprobatorio

Comité Académico

Posgrado en Ciencias de la Tierra

UNAM

Por medio de la presente me permito informarles que he revisado el trabajo que presenta el alumno **Jorge Estanislao Blancas Vázquez**, para obtener el grado de **Maestro en Ciencias**, el cual lleva por título: "**Percepción remota y técnicas geofísicas de prospección para el estudio de un asentamiento del Formativo en La Laguna Tlaxcala, México**". Considero que la tesis presentada reúne los requisitos para que el alumno pueda graduarse.

Sin más por el momento, y agradeciendo la atención que se sirvan prestar a la presente, reciban un cordial saludo.

Atentamente:

Dr. Raúl Aguirre Gómez

PERCEPCIÓN REMOTA Y TÉCNICAS GEOFÍSICAS DE PROSPECCIÓN PARA EL ESTUDIO DE UN ASENTAMIENTO DEL FORMATIVO EN LA LAGUNA TLAXCALA, MEXICO.

ÍNDICE

RESUMEN	1
1 INTRODUCCIÓN	2
1.1 OBJETIVOS	2
1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.2 HIPÓTESIS	3
1.3 LOCALIZACIÓN Y MEDIO AMBIENTE	4
1.4 GEOLOGÍA	7
1.5 SUELOS	10
1.6 ANTECEDENTES ARQUEOLÓGICOS	13
1.7 CRONOLOGÍA	13
1.8 LA PERCEPCIÓN REMOTA EN LA EXPLORACIÓN ARQUEOLÓGICA	14
1.9 LA PROSPECCIÓN GEOFÍSICA EN LA EXPLORACIÓN ARQUEOLÓGICA	15
2. CONCEPTOS BÁSICOS DE LA PERCEPCION REMOTA	17
2.1 DEFINICION	18
2.2 COMPONENTES BÁSICOS	18
2.2.1. CLASIFICACIÓN GENERAL	20
2.3 RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA	20
2.4 EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	21
2.5 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA CON LA ATMÓSFERA TERRESTRE	24
2.5.1 ABSORCIÓN	24
2.5.2 DISPERSIÓN	26
2.5.3 EMISIÓN	26
2.6 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA CON LA SUPERFICIE TERRESTRE	27
2.7 REFLEXIONES DETERMINADAS POR LAS CARACTERÍSTICAS DE LA SUPERFICIE	28
2.8 RESPUESTA ESPECTRAL DE LA VEGETACIÓN	30
2.9 RESPUESTA ESPECTRAL DE LOS SUELOS	31
2.10 RESPUESTA ESPECTRAL DEL AGUA	34
2.11 FIRMAS ESPECTRALES DE LOS PRINCIPALES MATERIALES SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE.	34
2.12 RESOLUCIÓN DEL SISTEMA SENSOR	35
2.11.1 RESOLUCIÓN ESPACIAL	36
2.11.2 RESOLUCIÓN ESPECTRAL	36
2.11.3 RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA	37
2.11.4 RESOLUCIÓN TEMPORAL	38
2.11.5 RESOLUCIÓN ANGULAR	38
2.13 PLATAFORMAS ESPACIALES Y SENSORES ORIENTADOS EN	39

APLICACIONES GEO-ARQUEOLÓGICAS.	
2.13.1 SERIE DE SATÉLITES LANDSAT	40
2.13.2 SERIE DE SATÉLITES SPOT	43
2.13.3 SATÉLITE QUICKBIRD	45
3. METODOLOGÍA DE LA PROSPECCIÓN GEOFÍSICA	48
3.1 EL MÉTODO DE RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE (GEORRADAR)	51
3.2 COMPONENTES DEL SISTEMA DE GEORRADAR	52
3.3 LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y LA CONSTANTE DIELECTRICA	54
3.3.1 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	57
3.3.2. CONSTANTE DIELECTRICA	
3.4 RESOLUCIÓN VERTICAL	58
3.5 SELECCIÓN DE LA ANTENA	61
3.6 PROCESADO E INTERPRETACIÓN PARA DATOS DE GEORRADAR	63
3.7 EL MÉTODO DE GRADIENTE MAGNÉTICO	66
3.8 EL MÉTODO ELÉCTRICO	67
4. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES DE LOS SENSORES LANDSAT ETM, SPOT Y QUICKBIRD.	70
4.1 CONVERSIÓN DN-RADIANCIA-REFLECTANCIA	71
4.1.1 CONVERSIÓN DN-RADIANCIA	71
4.1.2 CONVERSIÓN RADIANCIA-REFLECTANCIA	73
4.1.3 CONVERSIÓN RADIANCIA-TEMPERATURA	75
4.2 CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA	76
4.3 CORRECCIÓN POR TOPOGRAFÍA	78
4.4 FUSIÓN DE IMÁGENES POR EL MÉTODO HLS Y PCA	79
4.4.1 MÉTODO RGB-HLS	80
4.4.2 MÉTODO PCA	81
4.5 ANÁLISIS DE LAS COMPONENTES PRINCIPALES (PCA)	83
4.6 TRANSFORMACIÓN TASSELED CAP	86
4.7 COCIENTRS E ÍNDICES DE VEGETACIÓN	88
4.8 CLASIFICACIÓN DE LAS IMÁGENES	90
4.8.1. MÉTODO NO SUPERVISADO	91
4.8.2 MÉTODO SUPERVISADO	93
4.9. ESTIMACIÓN DE LA EXACTITUD DE LA CLASIFICACION - MATRIZ DE ERROR	96
5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN GEO-ARQUEOLÓGICA DE IMÁGENES LANDSAT ETM+ Y SPOT 5.	98
5.1 MATERIALES	98
5.2 PREPARACIÓN DE LAS IMÁGENES	100
5.3. CONVERSIÓN DN-RADIANCIA-REFLECTANCIA-TEMPERATURA	101
5.4 CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA	103
5.5 FUSIÓN DE IMÁGENES LANDSAT ETM+ CON IMAGEN PANROMÁTICA AÉREA	105
5.6 COMPOSICIONES DE COLOR	108

5.7. COCIENTE ENTRE BANDAS	114
5.8 COMPONENTES PRINCIPALES	115
5.9 ÍNDICES DE VEGETACIÓN	120
5.10 TRANSFORMACIÓN <i>TASSELED CAP</i> (TCT)	123
5.11 BANDA TÉRMICA LANDSAT ETM	125
5.12 CLASIFICACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE <i>LANDSAT ETM+</i>	126
5.13. ANÁLISIS E INTERPRECIÓN DE IMÁGENES SPOT 5.	132
5.13.1. MATERIALES	132
5.13.2. CONVERSIÓN DN-RADIANCIA-REFLECTANCIA Y CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA	133
5.13.3. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES Y CLASIFICACIÓN SUPERVISADA	137
6. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN GEO-ARQUEOLÓGICA DE IMÁGENES QUICKBIRD.	143
6.1 MATERIALES	143
6.2 PREPARACIÓN DE LAS IMÁGENES	145
6.3. CONVERSIÓN DN-RADIANCIA-REFLECTANCIA	145
6.4 CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA	148
6.5 FUSIÓN DE IMÁGENES <i>QUICKBIRD</i>	149
6.6 COMPOSICIONES DE COLOR	150
6.7 COMPONENTES PRINCIPALES	156
6.8 ÍNDICES DE VEGETACIÓN	160
6.9 TRANSFORMACIÓN <i>TASSELED CAP</i> (TCT)	163
6.10. CLASIFICACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE <i>QUICKBIRD</i>	165
7. RESULTADOS DE LA PROSPECCIÓN GEOFÍSICA Y COMPROBACIÓN MEDIANTE LA EXCAVACIÓN ARQUEOLÓGICA	170
7.1 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO E IMÁGENES SATELITALES	171
7.2. FOTOGRAFÍA AÉREA CON GLOBO	174
7.3. PROSPECCIÓN MAGNÉTICA	176
7.4. TOPOGRAFÍA CON GPS DIFERENCIAL	184
7.5 PROSPECCIÓN CON GEORRADAR Y ELÉCTRICA.	189
7.6. ESTUDIOS EN EL JUEGO DE PELOTA (12L-3)	189
7.7. ESTUDIOS EN LA PLAZA CENTRAL	197
7.8. ESTUDIOS SOBRE LA ESTRUCTURA 12L-1 (TEMPLO BASAMENTO)	198
7.9. ESTUDIOS EN LA ZONA 2 ESTRUCTURA 12M-3	201
7.10. ESTUDIOS EN LA ESTRUCTURA 12M-1	209
7.11. ESTUDIOS EN LA ESTRUCTURA 13M-1	212
8. CONCLUSIONES	214
APÉNCICE 1. ARCHIVO DE METADATOS PARA LAS IMÁGENES DE <i>LANDSAT ETM+</i>	217
APÉNDICE 2. ARCHIVO DE METADATOS PARA LAS IMÁGENES DE <i>SPOT 5</i>	220
APÉNDICE 3. ARCHIVO DE METADATOS PARA LAS IMÁGENES DE <i>QUICKBIRD</i>	221
BIBLIOGRAFÍA	223

PERCEPCIÓN REMOTA Y TÉCNICAS GEOFÍSICAS DE PROSPECCIÓN PARA EL ESTUDIO DE UN ASENTAMIENTO DEL FORMATIVO EN LA LAGUNA TLAXCALA, MEXICO.

RESUMEN

En este trabajo se aborda el empleo de imágenes satelitales de distintos sensores, en conjunto con las técnicas geofísicas de prospección, para la identificación de rasgos asociados a las transformaciones del paisaje antiguo inducido por las actividades humanas y por las estructuras arqueológicas enterradas. La investigación se llevó a cabo en el sitio arqueológico conocido como La Laguna en el estado de Tlaxcala, un lugar que se desarrolló en el periodo formativo o preclásico.

El análisis de las imágenes satelitales fue la primera aproximación al estudio del sitio, se centró en la identificación de formas, texturas y cambios sutiles en la respuesta espectral de las distintas coberturas sobre el terreno, asociadas con los grupos de suelos, la salud de las plantas y en los antiguos límites relacionados con las modificaciones hechas al paisaje por las culturas que se asentaron en este lugar en distintos periodos.

Con el tratamiento de la imágenes satelitales, los recorridos de superficie, el levantamiento topográfico y con las hipótesis planteadas por los arqueólogos, se realizó la prospección geofísica en las áreas de interés arqueológico, con la que fue posible localizar estructuras constructivas enterradas y determinar sus dimensiones, formas y profundidades, para establecer el uso y las actividades culturales que en ellas se realizaban.

Los resultados derivados de este trabajo demostraron que se puede generar un producto temático útil para la investigación arqueológica aplicando distintas técnicas de proceso a las imágenes satelitales, y junto con los datos obtenidos de la prospección geofísica, constituyen una metodología apropiada para abordar este tipo de investigaciones, ya que permiten localizar indirectamente rasgos arqueológicos producidos por estructuras constructivas enterradas con un nivel de detalle, que va desde una gran escala, hasta un nivel sub-métrico, y que fueron posteriormente verificadas mediante la excavación arqueológica.

1. INTRODUCCIÓN.

Durante el Formativo Medio al Formativo Terminal (c. 600 a.C. – 150 d.C.) las culturas del Altiplano Central Mexicano tuvieron transformaciones críticas en su modo de vida, las cuales destacaron en su urbanización y en el desarrollo de tradiciones religiosas conocidas por culturas posteriores como la Teotihuacana y la Mexica.

Las investigaciones del Proyecto Arqueológico La Laguna (PALL) han demostrado tales cambios en el sitio ocupado durante esa época. El programa integral de percepción remota, prospección geofísica, excavación y estudios químicos reveló patrones interesantes en la organización de estructuras ceremoniales, en las actividades llevadas a cabo en ellos y en el uso de efigies rituales fundamentales para las culturas del Clásico y Posclásico.

En este trabajo se presentan los resultados de la percepción remota y la prospección geofísica, así como sus implicaciones en la identificación de espacios sagrados, ofrendas rituales y las transformaciones al paisaje frente la urbanización de la región.

1.1 OBJETIVOS

Objetivo general:

Utilizar la percepción remota y las técnicas de prospección geofísica para identificar y localizar con dos distintos niveles de aproximación, zonas del terreno y en la vegetación que pudieran estar asociadas con antiguas modificaciones al paisaje y con elementos arqueológicos enterrados.

1.1.1 Objetivos específicos:

- Emplear las imágenes digitales de los sensores de *Landsat ETM+*, *Spot 5* y *QuickBird* para identificar rasgos espaciales y espectrales en la vegetación y el suelo asociados con la presencia de estructuras arqueológicas bajo la superficie y con modificaciones al paisaje hechas por el hombre.
- Evaluar las diferencias de la respuesta espectral del suelo y del vigor de la vegetación para realizar la clasificación de las distintas coberturas y determinar si existe relación con la prospección arqueológica a nivel del terreno.

- A partir de la topografía, fotografía aérea con globo y las técnicas de prospección geofísica: gradiente magnético, georradar y resistividad eléctrica; crear modelos digitales del terreno (MDT), mapas y perfiles, para identificar las principales estructuras arqueológicas enterradas, estimar sus dimensiones y profundidades, así como su el uso de los espacios.
- Reunir la información obtenida de los sensores remotos y de la prospección geofísica para contrastarla con los resultados de las excavaciones arqueológicas.

1.2 HIPÓTESIS.

Las modificaciones antiguas al paisaje y los vestigios arqueológicos bajo la superficie, podrían dejar algún tipo de huella sobre la superficie del terreno que evidenciara su presencia.

Al ser alterado el contexto original por factores humanos y naturales, las propiedades del suelo y la vegetación (composición, nutrientes, humedad y vigorosidad) también cambiarían, originando una cubierta distintiva en ciertas áreas que revelaría indirectamente la ubicación de los elementos de interés arqueológico.

La combinación del suelo original con los materiales arqueológicos (tierra y piedra) y los depósitos coluviales que cubren gran parte del sitio, producirían una reflectancia particular del suelo y la vegetación actual que podría ser reconocida y clasificada por medio de técnicas de procesamiento digital de imágenes.

En función del tipo de estructura arqueológica y del grado de modificación al paisaje, el vigor y la diversidad de plantas también variarán. Por ejemplo, una zanja rellena por suelo rico con nutrientes y con buena retención de agua, favorecerá un buen desarrollo y crecimiento. Por otro lado, estructuras de roca sólida, como muros enterrados inhibirán la penetración de las raíces y darán lugar a una vegetación menos desarrollada y vigorosa, de tipo matorral y adaptada a este tipo de lugares.

Estos cambios serían ser muy sutiles y podrían ser evidenciados con distintas técnicas de tratamiento digital de las imágenes como son: las composiciones de

color, los índices de vegetación, la transformación *Tasseled Cap* y el análisis de las componentes principales (PCA).

Por otra parte, los métodos geofísicos al basarse en el contraste de alguna propiedad física entre los materiales arqueológicos y los materiales que los envuelven, mostrarán diferencias en el valor de:

- la constante dieléctrica y la conductividad eléctrica para el georradar.
- la magnetización para el gradiente magnético.
- la resistividad eléctrica en los métodos eléctricos.

Las diferencias de estas propiedades generaran respuestas que serán medibles por los instrumentos geofísicos y podrán ser representadas en mapas y perfiles para interpretarlas y asociarlas con elementos arqueológicos.

El contraste de las propiedades electromagnéticas entre los materiales arqueológicos y su entorno, generará anomalías que podrían ser identificadas por medio de la prospección geofísica (gradiente magnético, geo-radar o resistividad eléctrica). Si las anomalías son de origen cultural, es muy probable que correspondan con modificaciones al paisaje, restos arquitectónicos, fogones, ofrendas o entierros.

1.3 LOCALIZACIÓN Y MEDIO AMBIENTE

El sitio arqueológico La Laguna está sobre el parte-aguas continental en el norte de Tlaxcala, se ubica en la ganadería y ex-hacienda del mismo nombre, junto con el Rancho Xalmonto, entre los municipios de Terrenate y Lázaro Cárdenas, de Estado de Tlaxcala. Las coordenadas del centro del sitio son **19°30'35" N (UTM, 2157635.443 m) y 98°00'20" W (UTM, 604302.6 m)**, (fig. 1.1).

Tiene un paisaje con planicies y volcanes cuaternarios, y un clima serrano agradable—con veranos húmedos e inviernos secos. El norte de Tlaxcala forma parte de un corredor natural que conecta el Altiplano Central (c. 2500 snm) con las tierras bajas alrededor del Golfo de México. La gente prehispánica de la región, los habitantes de La Laguna entre ellos, fueron participantes activos en los intercambios culturales y económicos entre las tierras altas y bajas, (Carballo y Pluckhahn, 2007).

La Laguna, Tlaxcala fue un centro de tamaño medio (100 ha), la ocupación formativa del sitio esta concentrada sobre dentro de tres cerros. Los principales

elementos arquitectónicos y culturales del sitio han sido cubiertos con depósitos coluviales resultantes de su ubicación en un llano entre tres cerros. Aunque esta situación ha facilitado la preservación de restos arquitectónicos, ha ocultado a las estructuras vistas desde la superficie, requiriendo excavaciones extensas y, a veces profundas, así como prospección geofísica para localizar y delimitar las estructuras enterradas.

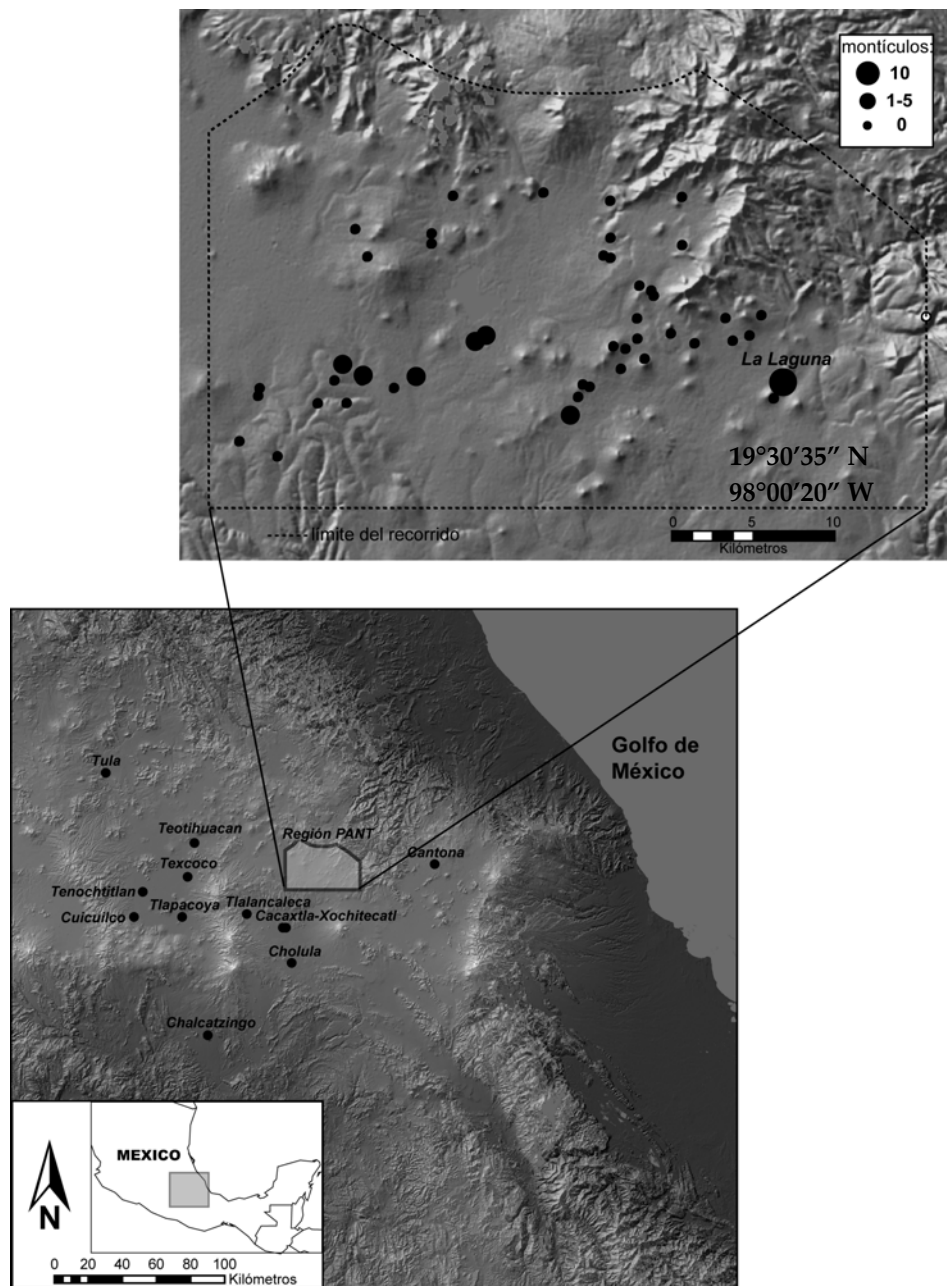


Figura 1.1. Ubicación de La Laguna, mostrando la ubicación de los sitios entre 300 a.C. – 100 d.C., documentados por Merino Carrión (1989) en escala según el número de montículos que se cree corresponden a esa fase. Tomado de Carballo, (2010).

Las modificaciones al paisaje fueron importantes, incluyeron la nivelación del terreno y la construcción muros de contención y edificios de gran tamaño. El tamaño de las estructuras y la modificación continua del paisaje demuestra la capacidad de sus habitantes para realizar obras constructivas a gran escala. El sitio incluye un recinto ceremonial con su plaza, juego de pelota y estructuras centrales en las áreas G, I, K y estructuras residenciales en el área F y H, (fig. 1.2).

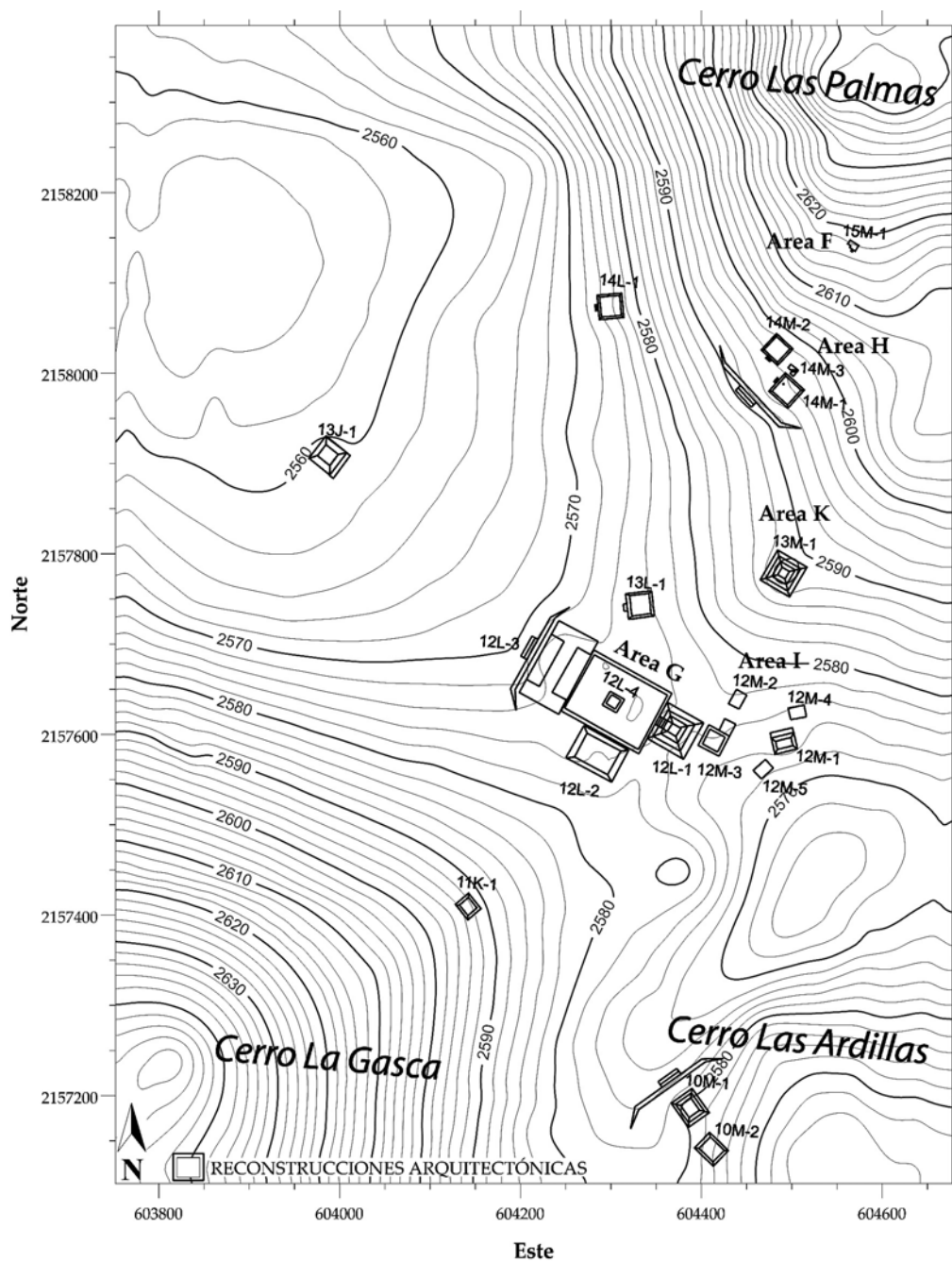


Figura 1.2. El sitio La Laguna, con las estructuras visibles de la superficie y las excavaciones del PALL. Adaptado de Carballo, (2010).

Según Borejsza (2006, 2008), el uso de los terrenos en tiempos históricos para el cultivo de magueyes pulqueros y más recientemente para ganadería, junto con un sistema amplio de metepantles (bordos de piedra, tierra y magueyes para dividir las terrazas), han servido para preservar mucho del sitio bajo depósitos coluviales—algo poco típico en esta región de suelos delgados y fuerte erosión.

Un dato muy interesante del análisis de las muestras de madera recuperadas por el PALL, basado en más de 3,300 muestras, es que maderas como el ocote (75%) y el roble (17%) dominan la colección, mientras que especies secundarias, incluyendo árboles como el sabino que actualmente domina el paisaje, se registran en escasas cantidades (menos del 2%).

Esto indica que el paisaje moderno representa una transformación radical del que habitaron los ocupantes del sitio en el Formativo y que, aunque parecen haber practicado un sistema agrícola de tala y quema bastante destructivo (Borejsza et al. 2008), los habitantes del Formativo dispusieron de suficientes recursos forestales para sus necesidades. Hasta el momento dos zonas residenciales han sido excavadas de manera horizontal: la primera (Área F) corresponde a una familia de estatus común y la segunda (Área H) corresponde a una familia de estatus mucho más elevado.

1.4 GEOLOGÍA

El sitio de estudio se encuentra al noreste del estado de Tlaxcala, y pertenece al sector oriental de la Faja Volcánica Transmexicana (Eje Neovolcánico) (Ferrari, 2000); su geología ha sido modelada por la actividad volcánica del terciario y del cuaternario, produciendo su relieve característico.

En Tlaxcala abundan los afloramientos de rocas volcánicas como las andesitas, las riolitas, los basaltos, las tobas y las brechas volcánicas; así como diversas asociaciones de éstas. Además, hay sedimentos lacustres, fluviales y fluvio-glaciares (brechas sedimentarias), (fig.1.3).

Las unidades estratigráficas más antiguas del estado son las rocas sedimentarias; principalmente los depósitos clásticos formados en un ambiente continental lacustre y son clasificados de acuerdo a su litología como asociaciones alternantes de areniscas y limolitas y de areniscas y calizas. Es probable que estas rocas pertenezcan al Terciario inferior ya que se encuentran cubiertas por derrames andesíticos y tobas intermedias del Terciario Superior (Mioceno), (INEGI, 2011).

Las riolitas y tobas ácidas, que aparecen restringidas a unos cuantos afloramientos dentro del estado, también pertenecen al Terciario Superior (Plioceno). En este mismo periodo, los agentes de denudación fluviales y fluvio-glaciales iniciaron una actividad intensa que condujo a la nivelación de un relieve activo. Así se formaron grandes cuerpos de depósitos fluvio-glaciales (brechas sedimentarias) en las faldas de volcanes andesíticos como la Malinche, entre otros.

La actividad volcánica basáltica comenzó en el Terciario Superior y alcanzó una gran intensidad en el Cuaternario (Pleistoceno), dejando distribuidas numerosas estructuras volcánicas relativamente pequeñas. Durante los últimos derrames basálticos que hubo en Tlaxcala, se cerraron algunos valles y se formaron cuencas endorréicas, algunas de las cuales siguen siendo rellenadas por productos de la denudación del relieve, esto es, por aluviones y depósitos lacustres.

Las estructuras geológicas más importantes de Tlaxcala son volcánicas; entre ellas destaca, como uno de los seis estratovolcanes más grandes del país, la majestuosa Malinche, la cual se encuentra en su mayor parte dentro de los límites del estado. En toda la entidad hay numerosas estructuras volcánicas menores de tipo basáltico. Además de los volcanes, con sus aparatos y derrames lávicos, se presentan otras estructuras, como fallas y fracturas, que han contribuido a modelar el relieve del estado y que están asociadas íntimamente a la actividad volcánica y tectónica continental, (INEGI, 2011).

Debido a la relativa homogeneidad litológica de la provincia del Eje Neovolcánico, la actividad extractiva se ha limitado al aprovechamiento de materiales para la construcción, de los que el tezontle, las gravas, las arenas y las arcillas ocupan los principales renglones. Estos materiales se obtienen de bancos aledaños a las poblaciones principales y a los centros industriales de creación reciente.

Tlaxcala pertenece a la sub-provincia fisiográfica denominada “Lagos y Volcanes de Anáhuac”, conformada por grandes sierras volcánicas alternados con amplios vasos lacustres. En esta sub-provincia se encuentran algunas de las elevaciones más altas del país, como son: el Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Zitlaltépetl, Zinantécatl y el Matlalcueytl o Malinche, (Calzada, 2007).

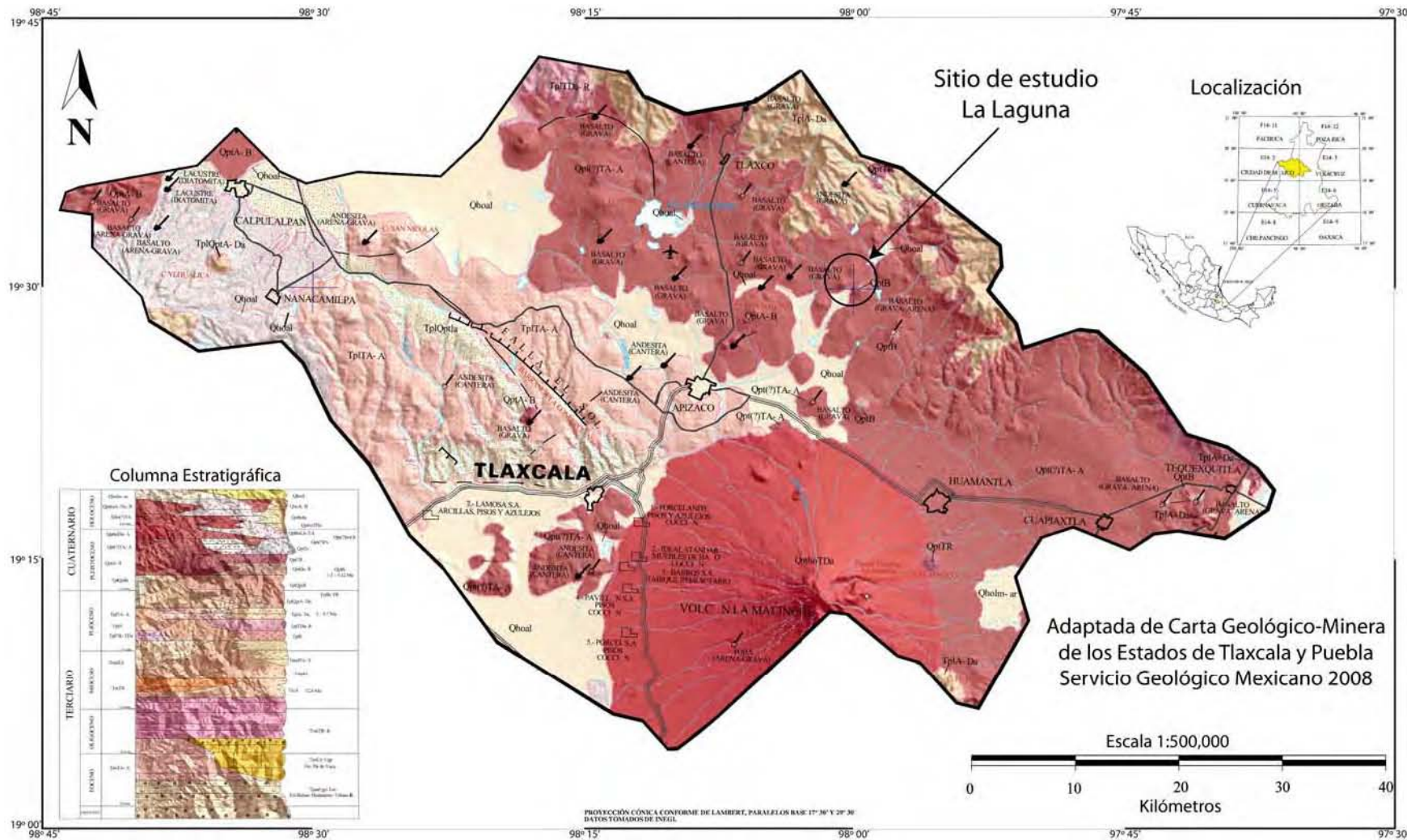


Figura 1.3. Carta geológica con los principales afloramientos de rocas del Estado de Tlaxcala (SGM, 2008).

1.5 SUELOS

La variedad de tipos de suelo de Tlaxcala se debe principalmente a la constitución litológica y al clima de la zona. Muchas de las características de ellos se deben a que se han originado de cenizas volcánicas de las emisiones volcánicas del Terciario, aunque también se formaron de otras rocas ígneas como las andesitas, basaltos, brechas volcánicas, o bien por brechas sedimentarias y en menor proporción por depósitos aluviales y de limolitas-areniscas. El clima dominante es el templado sub-húmedo, por lo que no existe gran diversidad edáfica, (INEGI, 2011).

Los tipos de suelo que se presentan en el estado son: Feozem, Regosol, Fluvisol, Vertisol, Cambisol, Litosol, Andosol, Gleysol, Acrisol, Luvisol, Rendzina y Planosol, (fig. 1.4). En la zona de estudio se tienen tres tipos de suelo predominantes: Feozem háplico, Litosol, Vertisol, según la Base referencial mundial del recurso del suelo (WRB, 2007), estos suelos tienen las siguientes características:

Feozem háplico (predominante en época de lluvias), es un tipo de suelo con un horizonte A mólico (horizonte superficial grueso, bien estructurado, oscuro, con alta saturación de bases en su parte superior, y moderado a alto contenido de materia orgánica) no muy duro cuando se seca, con grado de saturación de más de 50%. Los Feozems acomodan suelos de pastizales relativamente húmedos y regiones forestales en clima moderadamente continental, son muy parecidos a Chernozems y Kastañozems pero están más intensamente lixiviados. El material parental proviene de materiales no consolidados, predominantemente básicos, eólicos (loess), till glacial y otros.

Son suelos con igual o mayor fertilidad que los vertisoles, textura media, buen drenaje y ventilación, en general son poco profundos, restringiendo por ello su uso en la agricultura permanente, pudiéndose utilizar en el cultivo de pastos, aunque se recomienda mantenerlos con vegetación permanente.

Litsoles, constituyen un subgrupo de los leptosoles y se caracterizan por ser suelos muy someros sobre roca continua y suelos extremadamente gravillosos y/o pedregosos y con poca materia orgánica. Son suelos azonales y particularmente comunes en regiones montañosas. Constituyen la etapa primaria de formación del suelo, la capa del mismo es menor a 10 cm de espesor, predominando en ella la materia orgánica, con una fertilidad de media a alta. Se presentan en pendientes altas, lo cual impide su explotación económica.

Vertisoles, son suelos muy arcillosos, que se mezclan, con alta proporción de arcillas expandibles. Estos suelos forman grietas anchas y profundas desde la superficie hacia abajo cuando se secan y cuando están húmedos son plásticos y pegajosos lo cual presenta problemas para el manejo agrícola y en las construcciones. El material parental proviene de sedimentos que contienen elevada proporción de arcillas expandibles, o arcillas expandibles producidas por neoformación a partir de meteorización de rocas. Son suelos con media y alta fertilidad y con un manejo adecuado se utilizan en la agricultura.

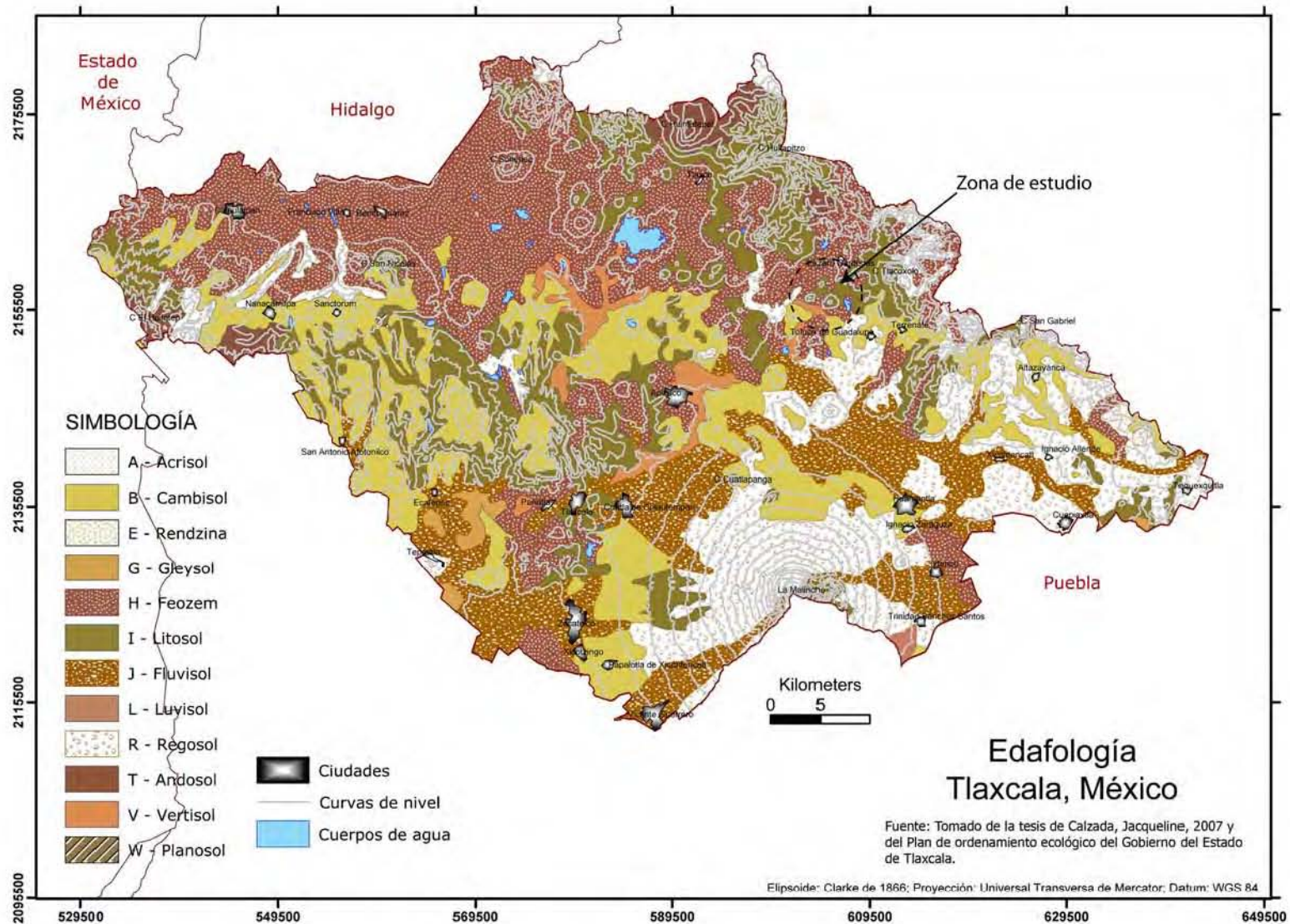


Figura 1.4. Carta edafológica con los suelos más representativos del Estado de Tlaxcala, (Calzada, 2007).

1.6 ANTECEDENTES ARQUEOLÓGICOS

Según Carballo (2007), El sitio fue incluido en el recorrido arqueológico de Snow (1966, 1969, 1972, 1976), quien lo registró como el centro del Formativo más grande en su área de estudio que abarcó 1500 km². El sitio también fue previamente reportado por Tschohl (1968), Dumond (1972) y García Cook (1981).

El sitio fue registrado como el más grande del Formativo en el recorrido de 2000 km² del “Proyecto Arqueológico del Norte de Tlaxcala” (PANT), dirigido por García Cook y publicado por Merino Carrión (1989). Las estructuras centrales del sitio fueron documentados por un levantamiento topográfico realizado por Roberto Bravo Castillo del Centro Regional INAH, Tlaxcala, en 2002.

Las primeras excavaciones científicas en el sitio fueron iniciados por Aleksander Borejsza en 2003 bajo el marco del proyecto “Investigaciones Acerca del Formativo y Precerámico en la Región de Apizaco” dirigido por Richard Lesure (Lesure et al. 2006; Borejsza 2006; Borejsza et al. 2008). David Carballo sirvió como director de campo en este proyecto en 2004. Posteriormente inició el “Proyecto Arqueológico La Laguna” (PALL) en 2005. Dicho proyecto cuenta con cinco temporadas de campo hasta la fecha (Barba et al. 2009; Carballo 2007, 2009, 2011; Carballo y Pluckhahn 2007). En el Atlas Arqueológico, el sitio está designado como E14B2329097.

La Laguna, Tlaxcala, fue un centro regional de tamaño medio ocupado durante el segundo parte del Formativo (c. 600 a.C. – 100 d.C.), cuando las sociedades del Altiplano Central desarrollaron centros urbanos y eventualmente se consolidaron en mayor parte bajo el sistema teotihuacano.

1.7 CRONOLOGÍA

Basado en 20 fechas por radiocarbono, se reconstruyó la ocupación formativa del sitio con una primera ocupación de c. 600 – 400 a.C., una interrupción de tres siglos y una segunda ocupación de c. 100 a.C. – 150 d.C., cuando la comunidad alcanzo su mayor tamaño y parece haber servido como un centro regional para su sub-región (Carballo, 2007); (fig. 1.5). Las unidades habitacionales registradas en este proyecto corresponden a la segunda ocupación y fueron generalmente contemporáneas. Las construcciones también cubren y truncan ocupaciones anteriores, cuyos elementos culturales sirven como puntos de comparación diacrónicos. El volumen excavado en ambas áreas fue casi idéntico

(128 m³ para el Área F y 130 m³ para el Área H) proveyendo buenos contextos comparativos.

	Fase PANT	Periodo	Situación Macroregional	Situación Local	La Laguna
600	Teotihuacan	Clásico	Teotihuacan	Corredor Teotihuacano	abandono
500					
400					
300					
200	Tezoquipan	Formativo Terminal	Cuicuilco	centros regionales	2a ocupación
d.C. 1					
a.C. 100	Texoloc	Formativo Tardío	Cuicuilco	centros regionales	¿hiatos?
200					
300					
400	Tlatempa	Formativo Medio	Cuicuilco	aldeas autónomas	1a ocupación
500					
600					
700					
800					
900					

Figura 1.5. Cronología para el norte de Tlaxcala con fases PANT, (Carballo, 2007).

1.8 LA PERCEPCIÓN REMOTA EN LA EXPLORACIÓN ARQUEOLÓGICA

La percepción remota, entendida como el conjunto de métodos para la adquisición, procesamiento e interpretación de imágenes digitales, adquiridas en plataformas como los satélites o aviones puede tener importantes aplicaciones en el campo de la arqueología, sin embargo su uso ha sido muy limitado. Las razones son muchas y pueden atribuirse en gran medida a que la separación sigue siendo fuerte entre las disciplinas humanísticas y las científico-técnicas.

La importancia de la percepción remota en la investigación arqueológica y el patrimonio cultural presenta muchas ventajas sobre todo porque hoy en día, los datos de satélites de alta resolución, tales como, *Ikonos*, *Geoeye*, *QuickBird*, y los de media resolución como *Spot*, *Aster* y *Landsat ETM* son capaces de combinarse para producir imágenes de alta resolución con información espectral y georeferenciadas, así como modelos digitales de elevación. Los satélites comerciales proporcionan la mayor resolución espacial de las imágenes de ambos sensores multiespectrales y pancromáticos con resoluciones de 2.4- 4 m, y de 0.6-1 m, respectivamente. Los de media resolución como *Landsat ETM+* tienen

resoluciones de 15 m en la banda 8 pancromática, de 30 m en las bandas 1, 2, 3, 4, 5, 7 y de 60 m en la banda 6, la térmica.

Este tipo de tecnología abre nuevas perspectivas en el campo de las investigaciones arqueológicas. Las ventajas de las imágenes de satélite en comparación con fotografías aéreas, son el costo y la posibilidad de obtener información multispectral, además de que ambas son técnicas no destructivas. El contenido espectral de los datos, junto con una alta resolución espacial puede hacer que las imágenes de satélite sean una fuente valiosa de datos para la investigación arqueológica, que van desde la arqueología del paisaje, a los detalles más pequeños como son la detección de estructuras constructivas sobre la superficie.

Las pequeñas anomalías espaciales se caracterizan por señales espectrales sutiles. El problema es que estas pequeñas anomalías espaciales y espectrales son fácilmente enmascaradas por las señales fuertes emitidas por los materiales en la superficie como la vegetación, rocas, y el asfalto en las áreas urbanas. El propósito de la percepción remota es poder distinguir pequeñas diferencias en las reflectancias del suelo y las plantas que se relacionen con la presencia de estructuras arqueológicas bajo la superficie y con las modificaciones al paisaje hechas por el hombre.

1.9 LA PROSPECCIÓN GEOFÍSICA EN LA EXPLORACIÓN ARQUEOLÓGICA

Existen diversas técnicas en la prospección geofísica, sin embargo el radar de penetración terrestre (gpr o georradar), gradiente magnético y las técnicas eléctricas han tenido mayor éxito en la arqueológica y en la restauración debido a que ofrecen resultados inmediatos y confiables.

Las técnicas geofísicas sirven para detectar anomalías, que pueden ser de origen natural o cultural y permiten identificar por medio de observaciones indirectas, materiales con propiedades físicas diferentes que se encuentran debajo de la superficie. Estas incluyen mediciones del gradiente magnético, corrientes y potenciales eléctricos y ondas electromagnéticas, entre otras. La técnica a utilizar depende de las dimensiones, profundidad y composición de los objetos sepultados y de los objetivos propios de la investigación.

Al utilizar estas técnicas en la arqueología se pueden investigar áreas en menos tiempo y a menor costo que usando los métodos tradicionales de excavación, además no perturban el medio ni destruyen el contexto arqueológico.

Como técnicas de investigación indirectas también tienen sus desventajas, pues siempre existe incertidumbre de lo que se interpreta a partir de los datos. Es necesario combinar la interpretación geofísica con las observaciones directas. No hay una técnica que sirva mejor que otra para todas las situaciones que se presenten, generalmente hay que decidir entre la profundidad de investigación y la resolución. Es muy difícil conciliar a un nivel óptimo de todas estas características empleando un solo método.

El término anomalía geofísica se refiere a una propiedad física que en un volumen definido de un material difiere apreciablemente respecto al valor promedio del área de estudio. En un caso favorable una anomalía geofísica corresponde a un rasgo arqueológico. La anomalía magnética puede ser causada por ejemplo, por un cimientado de piedra volcánica. Si la anomalía detectada está relacionada con una característica arqueológica o geológica, se verifica aplicando otras técnicas de prospección o bien mediante una excavación arqueológica directa.

Un requisito importante para obtener buenos resultados con las técnicas geofísicas es la presencia de diferencias que se puedan medir entre las propiedades físicas de un elemento arqueológico y las rocas, suelos o sedimentos circundantes. Es deseable comprobar en algunos casos la interpretación geofísica con las observaciones directas, por lo cual en algunas situaciones es necesario realizar excavaciones sobre las anomalías detectadas para verificar las interpretaciones y extrapolar los resultados a otras áreas contempladas por el programa de prospección.

2. CONCEPTOS BÁSICOS DE LA PERCEPCION REMOTA

La materia emite radiación electromagnética proveniente del Sol o de alguna fuente artificial, el ojo humano está limitado a detectar sólo la porción visible de esa radiación. Por otra parte, los sensores remotos extienden el rango de frecuencias desde el ultravioleta hasta las microondas, pasando por el infrarrojo - invisibles la mayoría de ellas para el ojo humano-. Estas longitudes de onda son representadas en imágenes de color verdadero o en falso color para las frecuencias invisibles. Con los sensores remotos es posible extenderse a otras regiones del espectro electromagnético para registrar propiedades que son difícilmente apreciables de la superficie terrestre en la banda visible.

Los sensores remotos permiten registrar información de los objetos sin estar en contacto físico con ellos, su uso en áreas de ciencias de la tierra, meteorología, agricultura, medio ambiente, militar, entre otras, ha tenido un papel muy importante en la construcción de mapas, planeación, prevención, espionaje, búsqueda de recursos, estudios urbanos y planificación territorial. Sin embargo, en la arqueología su aplicación ha sido menor, debido en parte, al desconocimiento de su potencial y a la resolución que había en los primeros sensores. Actualmente, con el avance tecnológico en el desarrollo de las computadoras y con los nuevos sensores de alta resolución, la tendencia es hacia el incremento de su aplicación en este campo, debido a los resultados prometedores que ha tenido y a que los costos de las imágenes son cada día más accesibles. A pesar de que los sensores remotos ofrecen muchas ventajas comparados con los datos obtenidos comúnmente, tienen algunas desventajas, debido a que muchas de las propiedades se derivan de la respuesta combinada de los objetos y coberturas a través del espectro electromagnético y no directamente del objeto en sí, es decir se consiguen únicamente de forma indirecta.

Con el uso cada vez mayor de los sensores remotos en la investigación arqueológica se esta generando una cantidad importante de información útil y una forma novedosa para el análisis de la información. La percepción remota permite adquirir datos de la superficie terrestre en lugares donde se encuentran antiguos asentamientos, por lo que utilizar esta ciencia para extraer información del suelo y de la vegetación que sugiera su presencia, resulta ser una metodología adicional para la búsqueda y exploración de sitios arqueológicos sin tener contacto físico. Esta herramienta extiende la capacidad de análisis del problema bajo estudio, en la actualidad se enfoca a marcas sobre la superficie, modificaciones del paisaje, suelos y vegetación con distintas características, y el estudio de los resultados para la generación de mapas temáticos y áreas susceptibles a ser reconocidas como una

primera aproximación en la exploración de un sitio. La información generada mediante fotografías aéreas, imágenes satelitales y de radar, se pueden incorporar a los sistemas de información geográfica (SIG) para manejar y comparar las diferentes variables obtenidas por los sensores remotos y por la información geofísica y arqueológica.

2.1 DEFINICION

En forma más específica, ahora se define a la Percepción Remota o teledetección (*Remote Sensing, en inglés*) como la ciencia que trata de la detección y medida de energía electromagnética que emana de objetos distantes que están hechos de distintos materiales, de tal forma que podemos identificar y clasificar estos objetos por clase o tipo, sustancia y distribución espacial, basados en el análisis espectral, espacial y temporal de las imágenes adquiridas por un sensor que no está en contacto físico con el objeto. Se puede obtener información de las propiedades de:

- la superficie terrestre
- los océanos
- la atmósfera
- el espacio exterior

Para este propósito se utilizan cámaras, radiómetros, espectrómetros, láser, receptores de frecuencias de radio, sistemas de radar, sonar, equipos térmicos, y otros instrumentos.

2.2 COMPONENTES BÁSICOS

El sistema de percepción remota está constituido por los siguientes elementos, (fig. 2.1.):

- Fuente de energía. Es el flujo de energía que detecta un sensor, puede ser de un origen externo en cuyo caso se conoce como de teledetección pasiva, o si es emitida por el sensor se nombra como teledetección activa. La fuente de energía más importante es emitida por el Sol.
- Objeto o cubierta. Es la vegetación, suelos, agua, construcciones, las cuales reflejan o emiten la energía, generada por la fuente de energía, en forma distinta dependiendo de sus características físicas.

- Plataforma. Artefacto o vehículo en el cual se transportan los sensores en la tierra, aire o el espacio (aves, papalotes, globos, ultraligeros, helicópteros, aviones y satélites).
- Sistema sensor. Es un dispositivo que reúne la tecnología necesaria para adquirir datos a distancia y que es transportado en una plataforma. Puede registrar la radiación electromagnética en diferentes regiones del espectro y cada una de estas regiones se denomina canal o banda.
- Sistema de recepción-comercialización, es el lugar y los equipos en donde se recibe la información transmitida por la plataforma, se graba en un formato adecuado para su distribución y comercialización.
- Analista y usuario final. Es la persona que interpreta y emplea la información proporcionada en un formato digital o analógico, comúnmente en forma de imágenes digitales, y convertida en un producto temático, con el objetivo de facilitar la evaluación del problema bajo estudio.

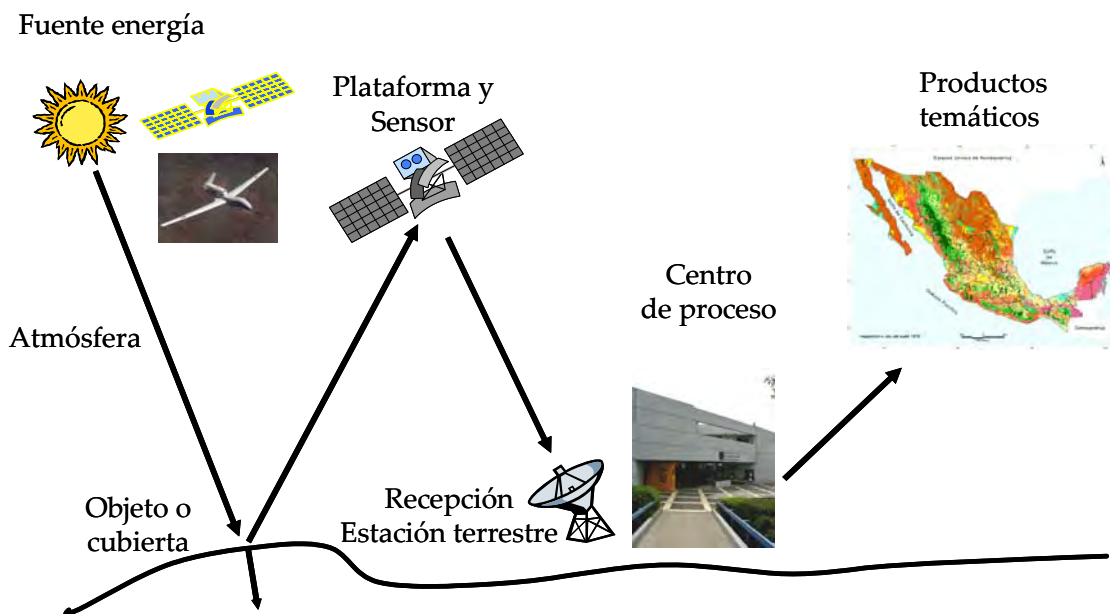


Figura 2.1. Elementos básicos del sistema para la percepción remota.

2.2.1. CLASIFICACIÓN GENERAL

- **Activos:** generan radiación artificialmente y reciben la radiación reflejada de la superficie terrestre, mar y atmósfera. Ejemplo: El sistema LIDAR (láser) y dispositivos generadores de microondas (SAR).
- **Pasivos:** reciben la radiación emitida o reflejada por la superficie terrestre, mar y atmósfera. Hay sensores fotográficos, óptico-electrónicos que combinan la óptica y un sistema de detección electrónica (detectores de barrido y empuje), espectrómetros de imagen y de antena (radiómetros de microondas). Su función es captar la energía procedente de la cubierta terrestre, codificarla y grabarla o enviarla directamente al sistema de recepción.

2.3 RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Para emplear la percepción remota es necesario tener una fuente de radiación electromagnética, ya sea activa o pasiva. La percepción remota involucra detección y medición de energía electromagnética de objetos distantes para identificarlos y clasificarlos por su composición y distribución espacial.

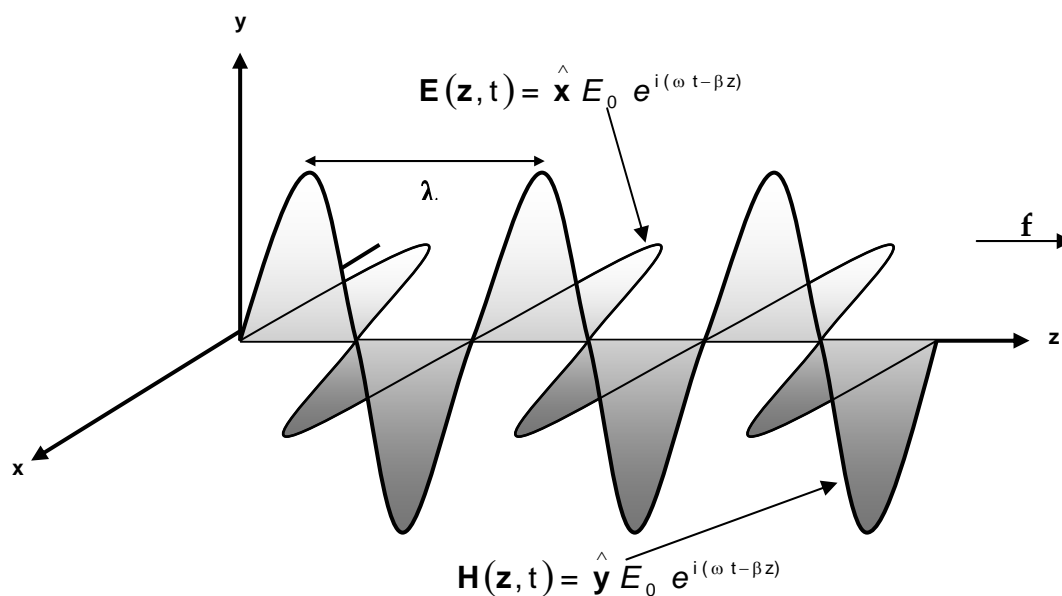


Figura 2.2. Representación de la onda electromagnética tipo transversal. Los campos eléctrico y magnético son perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación.

La energía electromagnética es una entidad física que se manifiesta bajo dos aspectos complementarios entre sí: el ondulatorio y el corpuscular. La concepción

ondulatoria permite explicar ciertos fenómenos como la reflexión y difracción, concibe a la radiación como un campo eléctrico y uno magnético oscilando en forma armónica en planos perpendiculares, (fig. 2.2.).

La concepción corpuscular permite explicar ciertos hechos experimentales como el efecto fotoeléctrico y la absorción de radiación por las moléculas y concibe a la radiación como un haz de corpúsculos llamados cuantos de energía o fotones que se desplazan en la dirección del haz a la velocidad de la luz. Cada cuanto transporta energía proporcional a la frecuencia. De esta forma, todo objeto cuya temperatura sea mayor a 0°K emite energía electromagnética y refleja en rangos de longitud de onda específica.

2.4 EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

El principio fundamental de la mayoría de los métodos y sistemas de percepción remota consiste en medir los niveles de variación de energía de los fotones. La variación de la energía del fotón (Joules, eV) está ligada a la longitud y la frecuencia de onda, que es como se desplaza el fotón en el espacio-tiempo.

Las concepciones ondulatoria y corpuscular de la radiación se expresan en la relación de Planck:

$$e = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

e = energía del fotón (J)

h = constante de Planck (6.63×10^{-34}) (Js)

f = frecuencia del movimiento ondulatorio (Hz)

$f = c/\lambda$, λ = longitud de onda, c = velocidad de la luz (3×10^8 m/s)

La distribución de todas las energías puede graficarse ya sea como función de la longitud de onda o la frecuencia y en niveles de energía en una representación conocida como el espectro electromagnético, EM, (figura 2.3.).

La diferentes regiones del espectro tienen distintas propiedades y pueden aplicarse o no a la percepción remota.

- Rayos cósmicos y gama. Con una longitud de onda menor a 0.03 nm, la fuente principal proviene del Sol, son totalmente absorbidos por la atmósfera y no son aplicables en percepción remota.

- Rayos X. Tienen una longitud de onda de 0.03 a 3 nm. La radiación es absorbida completamente por los gases de la atmósfera, y no son aplicables en la percepción remota.
- Ultravioleta (U.V). Longitud de onda de 15 nm a 400 nm. La radiación menor a 300 nm es absorbida por el ozono. La región comprendida entre 300 a 400 nm, es aplicable en percepción remota con película ultravioleta fotográfica y fotodetectores especiales.
- Visible. De 400 a 700 nm. Es detectable con película fotográfica convencional y fotodetectores, el ojo humano es sensible a esta región.

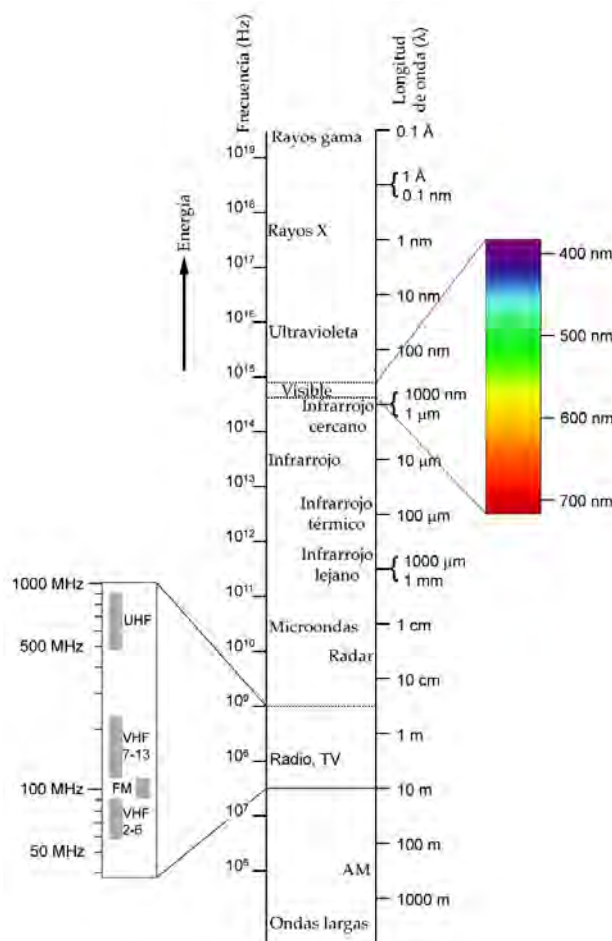


Figura 2.3. Representación gráfica del espectro electromagnético en función de la energía, la frecuencia y la longitud de onda, (Adaptado de Química, American Chemical Society, 2007).

- Infrarroja: De 0.72 μm a 12.5 μm . Se divide en tres grandes regiones: Infrarrojo cercano (NIR) de 0.72 a 1.3 μm , infrarrojo medio de 1.3 a 8 μm , infrarrojo térmico (TIR) de 8 a 14 μm .
- Microondas: Corresponde de 1000 μm a 300 cm. Este tipo de radiación puede penetrar las nubes y la niebla. Las imágenes se adquieren en forma activa o pasiva.
- Radio. Las longitudes de onda superiores a las microondas son utilizadas en transmisiones de radio, pero no se emplean para la teledetección.

Por otra parte, las regiones del espectro utilizadas para la percepción remota se suelen dividir como (Castro, 1999):

- Región fotográfica, de 0.3 a 0.9 μm , corresponde al rango de sensibilidad de las películas fotográficas actualmente en uso.
- Región reflectiva, de 300 a 3,0 μm . Abarca el rango donde los sensores captan la energía reflejada por los objetos, incluye también al infrarrojo cercano y medio.
- Región emisiva o térmica (3,0 a 14,0 μm). Los sensores captan la radiación emitida por los objetos en función de su temperatura; a temperaturas ambientales los objetos de la superficie emiten longitudes de ondas largas, que sólo pueden ser registradas por los sensores térmicos.
- Región de radiación reflejada en microondas. Comprende las longitudes entre 0.3 cm a 3 m., en la cual funcionan los radares.

En resumen, las regiones del espectro, clasificadas de acuerdo a su uso en la percepción remota (Tabla 2.1) se suele dividir como:

Región	Banda	Longitud de onda (λ)
Ultravioleta	U.V. Intermedio	0.280 a 0.315 μm
	U.V. Cercano (fotográfico)	0.315 a 0.380 μm
Visible	Violeta	0.380 a 0.446 μm
	Indigo	0.446 a 0.464 μm
	Azul	0.464 a 0.500 μm
	Verde	0.500 a 0.578 μm
	Amarillo	0.578 a 0.592 μm
	Naranja	0.592 a 0.620 μm
	Rojo	0.620 a 0.700 μm
Infrarrojo	Cercano	0.7 a 1.3 μm
	Medio	1.3 a 3.0 μm
	Termal (lejano)	3.0 a 14.0 μm
Micro-onda (Mo)		0.3 a 300 cm

Tabla 2.1. Resumen de regiones utilizadas en percepción remota.

2.5 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA CON LA ATMÓSFERA TERRESTRE

La percepción remota es realizada dentro o fuera de la atmósfera, debido a estos los gases atmosféricos interactúan con la radiación solar y con la superficie terrestre. La atmósfera misma es excitada por radiación electromagnética convirtiéndose en otra fuente de fotones. La atmósfera terrestre permite o bloquea el paso de la radiación de acuerdo a su longitud de onda en lo que se conoce como ventanas atmosféricas.

La atmósfera es importante ya que permite o bloquea el paso de energía solar en dos etapas (fuente-objeto y objeto-sensor). La atmósfera es selectiva para cada longitud de onda y se debe principalmente 3 fenómenos: absorción, dispersión y emisión.

2.5.1 ABSORCIÓN

Desde este punto de vista los absorbentes más eficaces de radiación solar es el agua, dióxido de carbono y ozono. La absorción selectiva de ciertas longitudes

de onda por estas moléculas hace que la atmósfera constituya un medio opaco para ciertos rangos espectrales, mientras que ofrezca ventanas libres de absorción para otros rangos. A través de dichas ventanas los satélites captan la radiación en el sensor.

Los principales gases causantes de esta absorción son (Chuvienco, 2008):

- Oxígeno atómico (O_2), que filtra las radiaciones ultravioleta por debajo de $0.1 \mu\text{m}$, así como pequeños sectores en el infrarrojo térmico y las microondas.
- Ozono (O_3), responsable de la eliminación de la energía ultravioleta, inferior a $0.3 \mu\text{m}$, así como en un sector de las microondas (en torno a 27 mm).
- Vapor de agua (H_2O), con una fuerte absorción en torno a 6 mm , por encima de 27 mm y otras menores entre 0.6 y $2 \mu\text{m}$.
- Dióxido de Carbono (CO_2), que absorbe en el infrarrojo térmico ($> 15 \mu\text{m}$), con importantes efectos en el infrarrojo medio, entre 2.5 y $4,5 \mu\text{m}$.
- Aerosoles atmosféricos, que principalmente absorben en el espectro visible.

Como consecuencia de esta absorción, la observación espacial se reduce a determinadas bandas del espectro, las ventanas atmosféricas, en donde la transmisividad de la atmósfera es suficientemente alta (fig. 2.4). Las principales ventanas atmosféricas son las siguientes (Chuvienco, 2008):

- espectro visible e IRC, situada entre 0.35 y $1.35 \mu\text{m}$
- varias en el infrarrojo de onda corta (SWIR) de 1.5 a $1.8 \mu\text{m}$ y de 2.0 a $2.4 \mu\text{m}$.
- en el infrarrojo medio (MIR): 2.9 a $4.2 \mu\text{m}$, y de 4.5 a $5.5 \mu\text{m}$.
- en el infrarrojo térmico (TIR), entre 8 y $14 \mu\text{m}$.
- en las microondas, por encima de 20 mm , en donde la atmósfera es prácticamente transparente.

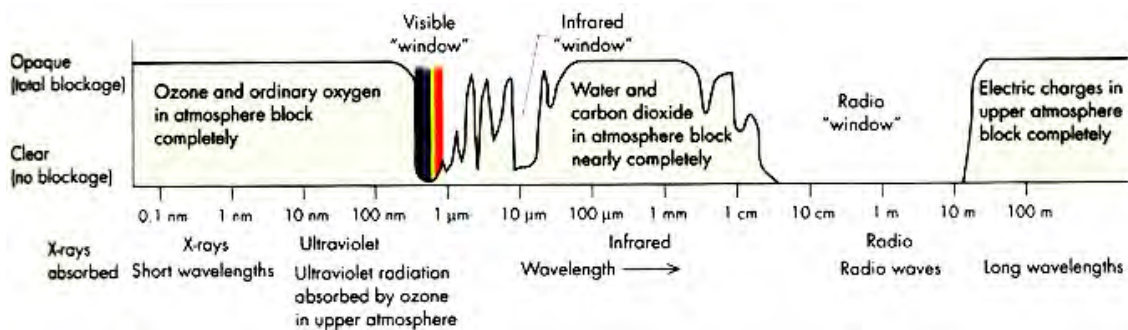


Figura 2.4. Ventanas atmosféricas disponibles para la percepción remota. (<http://legacy.spitzer.caltech.edu/espanol//edu/ir/windows/images/transmission.gif>).

2.5.2 DISPERSIÓN

La dispersión es un fenómeno producido por la presencia de partículas en la atmósfera, debidas al gas, agua y humo. Dependiendo de su tamaño producirá, la dispersión selectiva y no selectiva, a su vez éstas se dividen en:

- Dispersión de Rayleigh (selectiva): Es producida cuando el tamaño de las partículas es menor que la longitud de onda incidente ($d < \lambda$), el color azul y naranja del cielo se debe a este fenómeno. Se da entre los 5000 a 10000 metros de altura.
- Dispersión de Mie (selectiva): ocurre cuando las longitudes de onda de la radiación incidente son similares al tamaño de las partículas atmosféricas ($d \approx \lambda$, aerosoles: una mezcla de gases, vapor de agua y polvo). Influye desde el ultravioleta cercano hasta el infrarrojo cercano. Se realiza bajo los 5.000 metros altura.
- No Selectiva. Es independiente de la longitud de onda incidente, se produce cuando el tamaño de las partículas es mayor a la longitud de onda ($d > \lambda$). Esta dispersión explica el color blanco de las nubes. Esta dispersión es producida por el vapor de agua, para longitudes de onda inferiores a 15 mm. Gotas de agua, cristales de hielo, arco iris, corona, halos.

2.5.3 EMISIÓN

De acuerdo a la ley de Wien ($\lambda_{\max} = 2897.8/T$), las nubes emiten radiación principalmente en el infrarrojo térmico, diferente a la terrestre debido a su menor temperatura, por lo que se superpone a la terrestre en esa región del espectro. Cuando se analizan las imágenes en el infrarrojo térmico, resulta difícil estimar la temperatura de la superficie terrestre, la radiación que llega al satélite contiene la

emisión tanto de la superficie terrestre como de las diferentes capas de la atmósfera y es complicado distinguir un efecto del otro.

2.6 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA CON LA SUPERFICIE TERRESTRE

Cuando la radiación entra en contacto con la superficie terrestre puede presentar diferentes comportamientos:

- Una parte es reflejada con ángulo similar al de incidencia.
- Otra parte es reflejada uniformemente hacia todas las direcciones.
- Parte es absorbida por el objeto y se calentara, luego esta será reflejada en la banda térmica hasta que se enfríe.
- Una parte es transmitida a otros objetos o a la superficie de la tierra sin ser reflejada hacia el sensor.

Idealmente la radiación que alcanza a la superficie terrestre se divide en, (fig. 2.5):

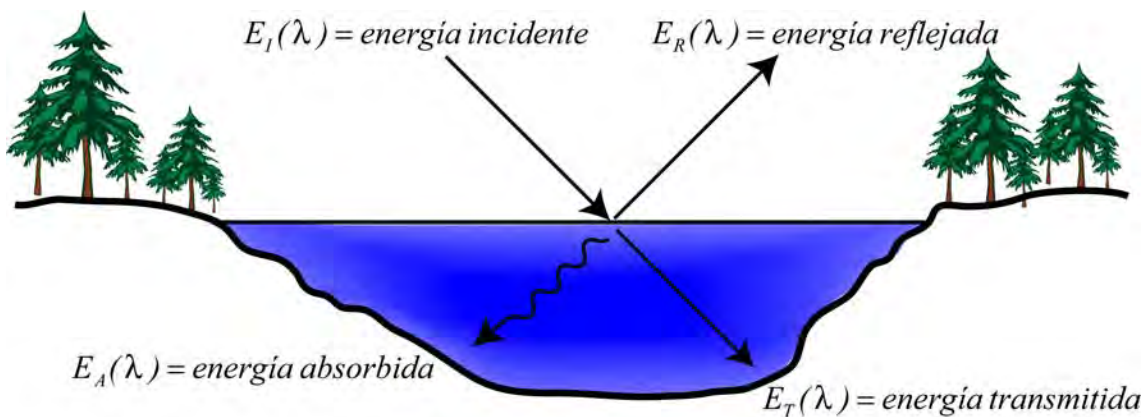


Figura 2.5. Interacción de la radiación con los materiales sobre la superficie terrestre.

De esta forma, se cumple con la ley de conservación de la energía expresada en la siguiente relación:

$$E_I(\lambda) = E_R(\lambda) + E_T(\lambda) + E_A(\lambda) \quad (2.2)$$

$E_I(\lambda)$ = energía incidente

$E_R(\lambda)$ = energía reflejada

$E_A(\lambda)$ = energía absorbida

$E_T(\lambda)$ = energía transmitida

Por otro lado, un cuerpo gris se define como aquel que no absorbe toda la radiación recibida, una parte es reflejada o transmitida. La proporción de cada uno de estos fenómenos está ligado con la composición química del material, de su forma y características externas, de la longitud de onda de la energía incidente, del ángulo de iluminación de la escena, de las condiciones atmosféricas, la topografía de la cubierta, de la proximidad con otros objetos que modifican, agregando o restando energía. Cuando el flujo de energía incidente llega a la superficie pueden ocurrir los fenómenos de reflexión, transmisión y absorción:

- La reflexión se da cuando una parte del flujo incidente es reflejado con un ángulo igual al de incidencia. La capacidad de una material para reflejar parte de la energía incidente se mide mediante la reflectividad ($R = \text{flujo reflejado} / \text{flujo incidente}$).
- La transmisión se da cuando la radiación pasa a través de un cuerpo sin una atenuación significativa. La capacidad de un medio para transmitir energía se mide como la transmitancia ($T = \text{flujo transmitido} / \text{flujo incidente}$). La transmisión se puede dar en cuerpos opacos y transparentes a distintas longitudes de onda. Las hojas de las plantas, son opacas a la región del visible sin embargo en el infrarrojo transmiten una cantidad significativa de energía.
- La absorción depende de las características del material, de su estructura interna y externa para retener la radiación incidente y transformarla en energía, que sumada a su energía interna constituye su emisividad. La absorción se mide por la absortancia ($A = \text{flujo absorbido} / \text{flujo incidente}$).

2.7 REFLEXIONES DETERMINADAS POR LAS CARACTERÍSTICAS DE LA SUPERFICIE.

El tipo de reflexión está determinada por la textura o grado de rugosidad de la superficie del objeto, así como del ángulo de incidencia de la radiación (fig. 2.6).

La reflexión especular se produce cuando la radiación incide sobre una superficie relativamente lisa y cuando el tamaño de las partículas en la superficie es menor que la longitud de onda de la radiación incidente ($\phi < \lambda$).

La reflexión difusa o lambertiana ocurre en el caso inverso, es decir cuando la textura de la superficie es más rugosa y el tamaño de las partículas es mayor que la

longitud de onda de la radiación incidente ($\phi > \lambda$). En la reflexión difusa la radiación penetra hasta cierta profundidad en el material e interacciona con los componentes químicos de éste. La radiación reflejada en forma difusa posee de esta forma más información que la especular acerca del objeto irradiado.

En la percepción remota es muy importante medir las propiedades de la reflectancia difusa de los materiales en la superficie, debido a que contienen información de su naturaleza física y química. En las superficies rugosas se produce una reflectividad en todas las direcciones, estas superficies son llamadas reflectores difusos, y según la ley de Lambert se enuncia que de una superficie perfectamente difusa se observa un brillo constante e independiente del ángulo de observación.

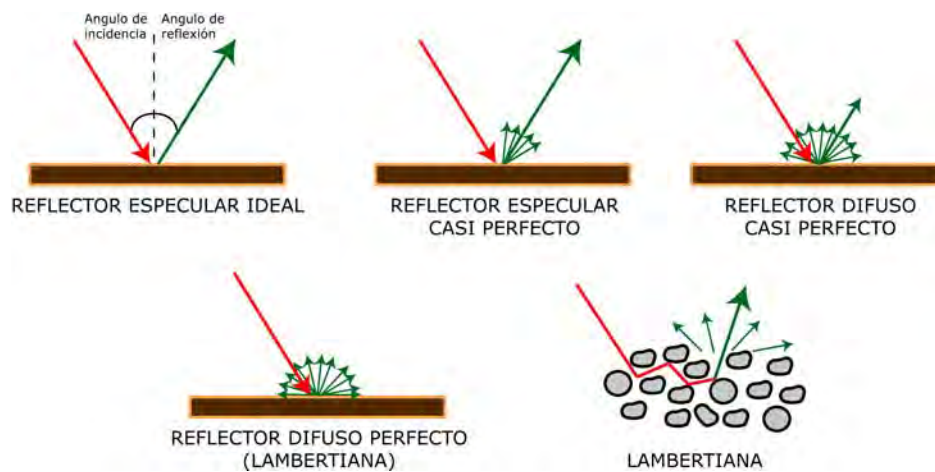


Figura 2.6. Tipos de reflexiones en función de las características de la superficie.

Las características reflectivas de un objeto sobre la superficie terrestre pueden ser cuantificadas midiendo el porcentaje de energía incidente reflejada por el objeto, a esto se le llama la reflectancia espectral y se define como:

$$R_{\lambda} \% = \frac{E_{R,\lambda}}{E_{I,\lambda}} \quad (2.3)$$

$E_{R,\lambda}$ es la energía a cierta longitud de onda reflejada por el objeto

$E_{I,\lambda}$ es la energía incidente en el objeto a cierta longitud de onda

El concepto de superficie lambertiana se emplea usualmente en la percepción remota debido a su sencillez conceptual, no obstante, se debe tener presente que esto es una simplificación para las superficies naturales, que generalmente pueden

tener características intermedias entre especular y lambertiana, dependiendo del ángulo de irradiación y observación.

2.8 RESPUESTA ESPECTRAL DE LA VEGETACIÓN

La reflectancia espectral de la cobertura vegetal varía con la longitud de onda, reflejando más energía en ciertas longitudes de onda que en otras, la reflectancia de la vegetación es idealizada como lambertiana. En la figura 2.7 se muestra la curva de reflectancia característica para la vegetación sana y la vegetación seca.

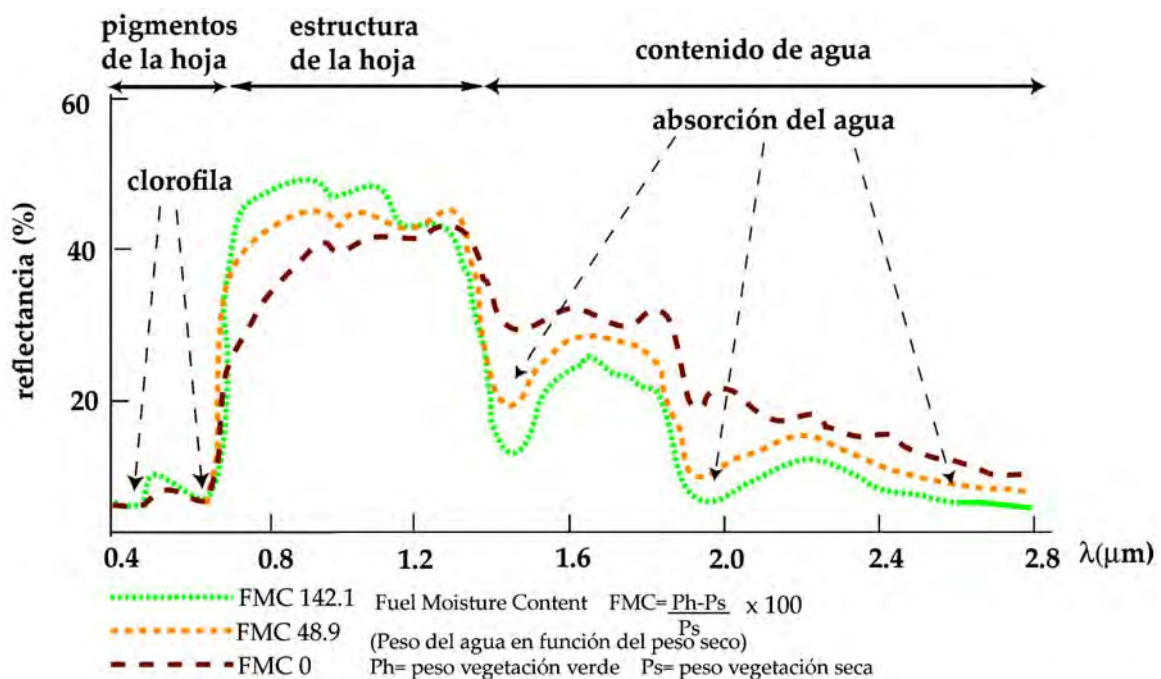


Figura 2.7. Firmas espectrales de la vegetación sana y seca, (adaptado de Chuvieco, 2008).

La figura anterior muestra la reflectancia de la vegetación en diferentes regiones espectrales y se puede resumir de la siguiente forma:

- Región del visible (0.4 a 0.7 μm .): baja reflectancia y transmitancia, alta absorptancia, debido a los pigmentos (clorofila, xantofila y carotenos).
- Región del infrarrojo cercano (0.7 a 1.3 μm .): absorptancia baja, reflectancia media-alta y transmitancia media. En esta región, la reflectancia aumenta notablemente debido a la baja absorción de la estructura fisiológica de la vegetación.

- Región del infrarrojo medio (1.3 a 3.0 μm .): absorptancia media-alta, reflectancia media, transmitancia baja. La baja reflectancia de la vegetación se debe al contenido de agua que presenta un máximo de absorción en esta región alta (en las longitudes de onda de 1.4 μm , 1.9 μm y 2.7 μm).

La forma de estimar el porcentaje de humedad es por el peso del agua en función del peso en seco de la vegetación, llamado FMC (fuel moisture content, Cocero, 2000) y representa la relación del peso de la vegetación verde con respecto a la seca, (fig. 2.7). En el infrarrojo medio, el grado de absorción de la radiación solar por la vegetación está estrechamente relacionado con el contenido de humedad y con el grosor de las hojas (particularmente en 1.4 μm , 1.9 μm y 2.7 μm). Al disminuir la humedad, aumenta la reflectancia y disminuye la absorción en el infrarrojo medio. En esta región se observa que a mayor humedad menor reflectancia y a menor humedad mayor reflectancia.

Existen muchos factores que afectan la salud y el crecimiento de la vegetación generando distintas respuestas espectrales. En la vegetación madura, estresada o enferma los pigmentos disminuyen, produciendo un aumento en la reflectancia en el azul (0.46-0.5 μm) y rojo (0.62-0.7 μm) y en menor proporción en el infrarrojo cercano (0.7-1.3 μm). Otros factores que modifican la reflectancia de la vegetación, (Chuvieco, 2008) son: minerales (cuarzo, feldspatos, silicatos), contenido de materia orgánica, ángulos de observación e iluminación, sequías, nutrientes en el suelo, salinidad del suelo, variaciones estacionales y climáticas, así como lecho rocoso somero y estructuras constructivas enterradas (modernas y arqueológicas).

2.9 RESPUESTA ESPECTRAL DE LOS SUELOS

Las propiedades espectrales del suelo son relativamente simples ya que la transmisión es nula, por lo tanto, parte de la energía se absorbe y otra parte se refleja. La respuesta espectral de los suelos desnudos es mucho más uniforme que la vegetación, con una curva espectral plana y con tendencia ascendente. La composición química es responsable del color predominante con el que percibimos el suelo. Los suelos de origen calcáreo tienden al color blanco, revelando una alta reflectancia en todas las bandas visibles (azul, verde y rojo). Por otra parte, los suelos con alto contenido de arcilla poseen una mayor reflectancia en la banda del rojo, debido a su alto contenido de óxidos de hierro. Cuando el contenido de humedad es bajo, un suelo de textura arenosa puede tener una reflectancia menor que uno de textura fina en las mismas condiciones. Los principales factores que modifican la reflectancia de los suelos son:

- **El contenido de humedad.** El primer indicador sería cuando a un incremento en la humedad del suelo corresponde una disminución en la reflectancia en todas las longitudes de onda, sin embargo, esto no es suficiente, debido a que la información es solo de la capa superficial, la más seca. La humedad a su vez depende de otras propiedades, como el grado de compactación, la porosidad, la permeabilidad, entre otras. Los suelos secos se caracterizan por presentar un aumento en su reflectancia a medida que aumenta la longitud de onda, se podrían diferenciar mejor de los húmedos con los sistemas de radar de longitudes de onda relativamente grandes (0.3 a 300 mm).
- **La textura** juega un papel importante en el comportamiento espectral de los suelos, debido a su relación con la capacidad de retención de la humedad y a la fuerte influencia del tamaño de las partículas sobre la reflectancia (fig. 2.8). En términos generales, la proporción de radiación reflejada está en función del tamaño de las partículas del suelo y guardan una relación inversa con su tamaño, es decir, a mayor diámetro menor proporción de reflectancia. Para los suelos arcillosos, aún con poca humedad, la reflectancia está controlada por la curva característica de humedad. Para los suelos arenosos su reflectancia es independiente de la curva característica de humedad, siempre que la humedad no sea tan alta. En condiciones controladas de laboratorio, para la región visible, el infrarrojo cercano y medio, las curvas de reflectancia de los suelos exhiben comportamientos muy similares para distintas texturas.

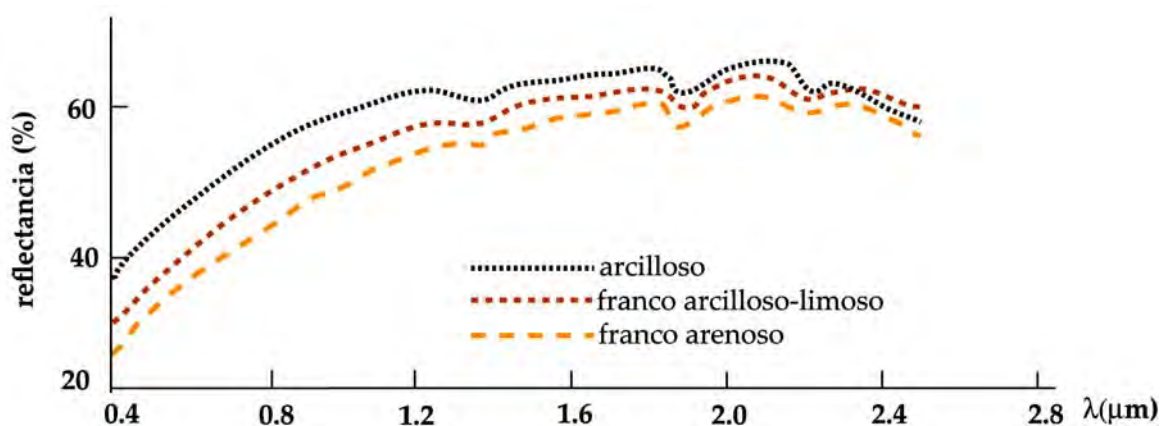


Figura 2.8. Respuesta espectral de los suelos con distinta textura, (adaptado de Castro, 1999).

- **Estructura.** Los suelos con superficies amplias y llanas tienen reflectancias más altas que los con superficies ásperas e irregulares. Las superficies con suelos recién arados poseen agregados relativamente grandes, a la distancia este tipo de suelos son ásperos, lo que tiende a reducir su reflectancia. Se han registrado (Castro, 1999) que los suelos con pérdida de su estructura reflejan de un 15% a 20% más radiación que los suelos bien estructurados. En la mayoría de los casos, para suelos con diferente estructura, las curvas de reflectancia presentan formas similares y son paralelas.
- **Contenido de materia orgánica.** La materia orgánica es el constituyente principal que determina la reflectancia de los suelos. Se ha demostrado experimentalmente, que los suelos con bajo contenido de materia orgánica incrementan el nivel de radiación reflejada, poseen alta reflectancia, esta situación también se puede percibir en condiciones de campo (Castro, 1999). Esta situación se puede ver más claramente cuando se comparan las curvas de reflectividad de suelos con distinta cantidad de materia orgánica. Los entisoles, suelos extremadamente gravillosos, pedregosos, sin estructura y con escasa materia orgánica, poseen muy alta reflectancia. Por otra parte los molisoles, suelos bien estructurados y desarrollados, tienen una reflectancia de media a baja debido a un mayor enriquecimiento en materia orgánica. Los vertisoles son suelos que presentan una reflectividad baja, debido a que son muy arcillosos, con alta proporción de arcillas expandibles, tienen en la capa arable una cantidad importante de materia orgánica y retienen mucha humedad (FAO, 2007), (fig. 2.9).

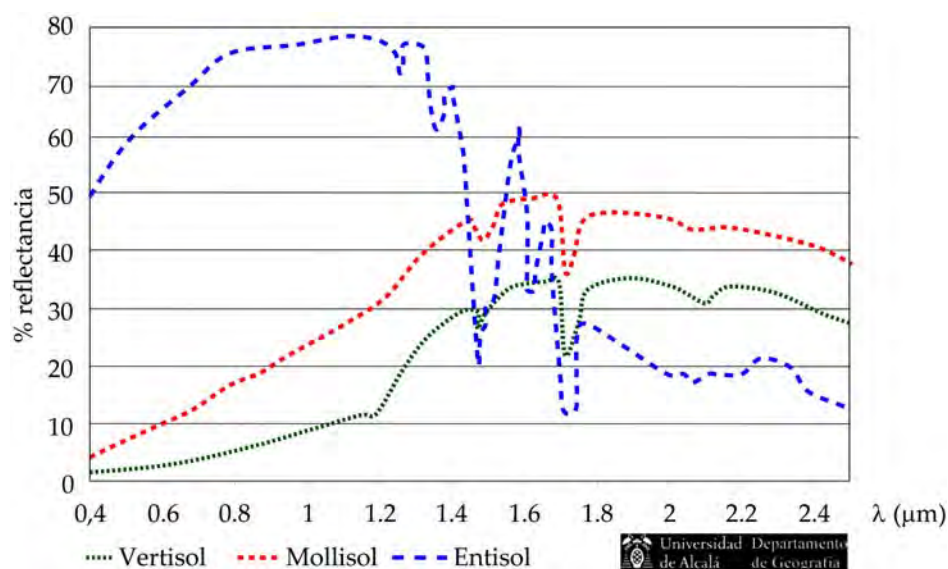


Figura 2.9. Respuesta espectral para distintos tipos de suelos, (Chuvieco, 2008).

- Otros factores que modifican la reflectancia de los suelos son las altas concentraciones de carbonato de calcio, que en superficie producen suelos de colores claros cuya reflectancia es mayor que en los suelos rojos con altos contenidos de óxidos de hierro; y aun mayor que los suelos negros ricos en materia orgánica que presentan las más bajas reflectancias.

2.10 RESPUESTA ESPECTRAL DEL AGUA

La superficie del agua absorbe o transmite gran parte de la radiación visible que recibe ($0.4 - 0.7 \mu\text{m}$), para longitudes de onda mayores la absorción se incrementa. La mayor reflectancia del agua clara se produce en las longitudes del azul y el verde ($0.46 - 0.57 \mu\text{m}$), disminuyendo gradualmente hasta ser prácticamente nula en el infrarrojo cercano. Con sólidos en suspensión, clorofila o con la eutrofización del agua, la reflectancia aumenta y se puede distinguir perfectamente su respuesta en el infrarrojo cercano.

2.11 FIRMAS ESPECTRALES DE LOS PRINCIPALES MATERIALES SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTE.

La respuesta teórica de cada uno de los materiales al interactuar con la radiación proveniente de una fuente de energía pasiva o activa, está representada por la energía reflejada. Generalmente, se representa en forma gráfica como el porcentaje de reflectancia con respecto a la longitud de onda de la radiación reflejada. A las curvas generadas se les llama firmas espectrales, las cuales al tener respuesta espectral distintiva, permiten identificar el tipo de cobertura sobre la superficie de la tierra.

Las firmas espectrales (fig. 2.10) son entonces curvas características que representan a la energía reflejada en relación a la longitud de onda, sin tomar en cuenta la dispersión de la radiación debida a la atmósfera en su trayectoria cubierta-sensor, y medida en condiciones ideales de ángulo incidencia igual al de reflexión.

Para la región 0.7 a $1.0 \mu\text{m}$ existe una separación muy marcada entre las curvas de vegetación, suelo y agua, en este ancho de banda es posible diferenciar perfectamente cada una de las coberturas, sin embargo para longitudes de onda mayores a $1.2 \mu\text{m}$, las respuestas son muy parecidas y las curvas se superponen por lo cual es complicado identificar el tipo de firma espectral de cada cobertura.

Esta desventaja se puede minimizar si se utiliza una región del espectro donde las curvas estén más separadas, como en el infrarrojo cercano, o si cuenta con datos de sensores que puedan registrar un número significativo de bandas espectrales que permitan discriminar pequeñas diferencias en la curva característica de cada cobertura.

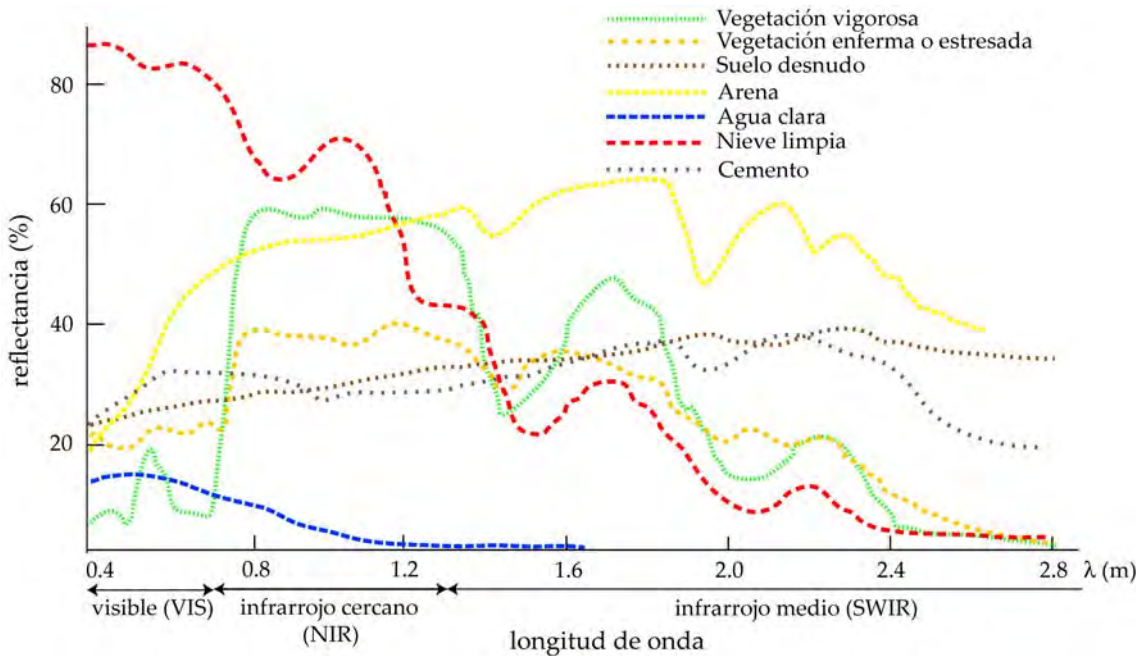


Figura 2.10. Firmas espectrales de las principales coberturas (adaptado de Oivind Due Traer, 2009).

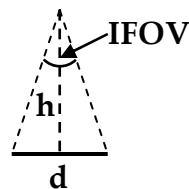
2.12 RESOLUCIÓN DEL SISTEMA SENSOR

La resolución de un sensor es la capacidad para registrar y discriminar información detallada de las distintas cubiertas. La resolución depende de la capacidad de los sensores para detectar las variaciones de la energía electromagnética, del detalle espacial que captura y del número y ancho de las bandas que registra. La resolución de un sistema sensor, es la habilidad que tiene un sistema para discriminar información con detalle (Chuvieco, 2008). Esta definición comprende varios aspectos y depende del efecto combinado de ellos. El concepto de resolución implica distintas manifestaciones, las más comunes en la literatura especializada son la espacial, espectral, radiométrica y temporal. Recientemente se ha incluido a la resolución angular como la capacidad del sistema para observar el mismo objeto en distintas posiciones.

2.12.1 RESOLUCIÓN ESPACIAL

La resolución espacial se refiere a los detalles más pequeños que se pueden distinguir en una imagen, entre más pequeña sea la parte de la superficie registrada en una imagen digital, representada por un píxel, mayores son los detalles que pueden ser distinguidos y mayor es la resolución espacial.

La resolución espacial está determinada por el campo de visión instantánea (IFOV, *Instantaneous Field of View* por sus siglas en inglés) definido como la sección angular observada en un momento dado. Sin embargo al hablar de resolución espacial se suele utilizar la porción del terreno que subtiende un ángulo sólido igual al IFOV del instrumento. Esta distancia es la unidad mínima de la imagen de la que tenemos información, es decir, el tamaño medio del píxel.



$$d = 2h \tan\left(\frac{IFOV}{2}\right) \quad (2.4)$$

En donde d es el tamaño de píxel y H la distancia del sensor a la superficie terrestre.

La resolución espacial de un sensor depende de muchos factores como son: la velocidad de exploración, la altura orbital y el número de detectores (Chuvieco, 2000). En la actualidad las resoluciones de los sensores se clasifican en función de su detalle espacial como: muy alta (*WorldView, QuickBird*), alta (*Ikonos*), media (*Spot, Landsat*) y baja (*Meteosat, Modis*).

2.12.2 RESOLUCIÓN ESPECTRAL

La resolución espectral indica el número y anchura de las bandas en las que el sensor puede captar la radiación electromagnética. Es decir, la capacidad del sensor para discriminar la radiancia detectada en distintas longitudes de onda del espectro electromagnético. En principio, cuanto mayor sea el número de bandas y más estrechas sean, mejor será su resolución espectral y mayor será la capacidad del sensor para reproducir la respuesta espectral del objeto observado y, de este modo, la posibilidad de identificar el tipo de cobertura.

La resolución espectral es muy importante al igual que la resolución espacial, por ejemplo, el sensor de *Spot* tiene una resolución de 20 m en la parte espectral,

mientras el de *Landsat* tiene 30 m, sin embargo para muchas de las aplicaciones, las bandas del *Landsat TM* son más útiles por que tiene 7 frente a las 3 de *Spot*, abarcando un mayor rango espectral que incluye al infrarrojo medio y al térmico, además las bandas son más estrechas. La elección del número y ancho de bandas de un sensor dependerá del tipo de aplicación. Es deseable que estas bandas sean estrechas para que su poder discriminante se incremente. Si las bandas son muy anchas registrarán los valores promediados que ocultarán los elementos más sutiles. Por ejemplo, es mucho más útil contar con 3 bandas en el visible (rojo, verde, azul) para identificar la condición de la vegetación, que tener una sola banda representada en una imagen en escala de grises (fig. 2.11).

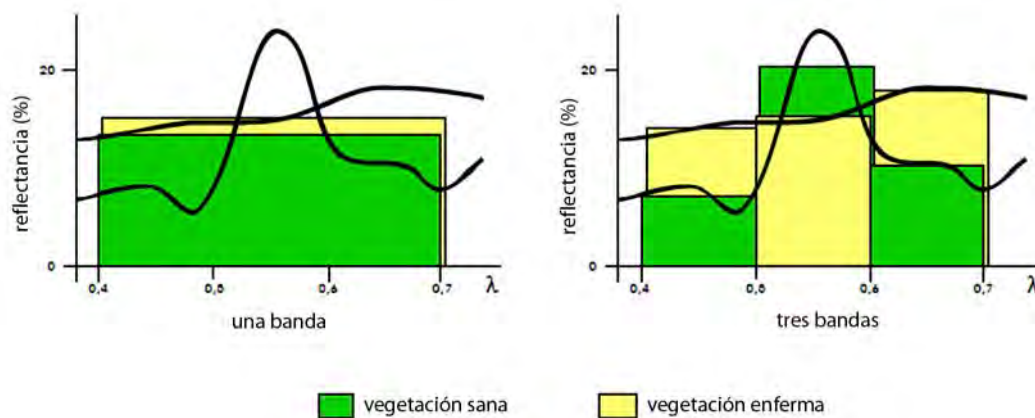


Figura 2.11. Efecto de la resolución espectral en la identificación del estado de la vegetación.

2.12.3 RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA

La resolución radiométrica está relacionada con la sensibilidad del sensor y es la capacidad que tiene para registrar pequeñas variaciones en la radiancia espectral que recibe. En los sensores óptico-electrónicos se expresa como el número de niveles digitales utilizados para registrar los datos recogidos por el sensor.

En general, cuando es mayor el número de niveles digitales, también es mayor el detalle que se podrá representar con dicha información. Los sensores digitales codifican la información en formato binario, de tal forma que asignan un valor entero (número de bits) a cada píxel para construir una imagen; el rango de esos valores está determinado por la siguiente expresión:

$$\text{Niveles digitales, } ND = 2^n \quad (2.5)$$

n es el número de bits

Para los sensores *Spot*, *Landsat TM* y *ETM* con 8 bits por píxel, se pueden registrar 256 niveles de energía (niveles digitales, ND). En los sensores de alta resolución radiométrica como *Ikonos* y *QuickBird* con 11 bits por píxel, se pueden registrar hasta 2048 niveles digitales (fig. 2.12).

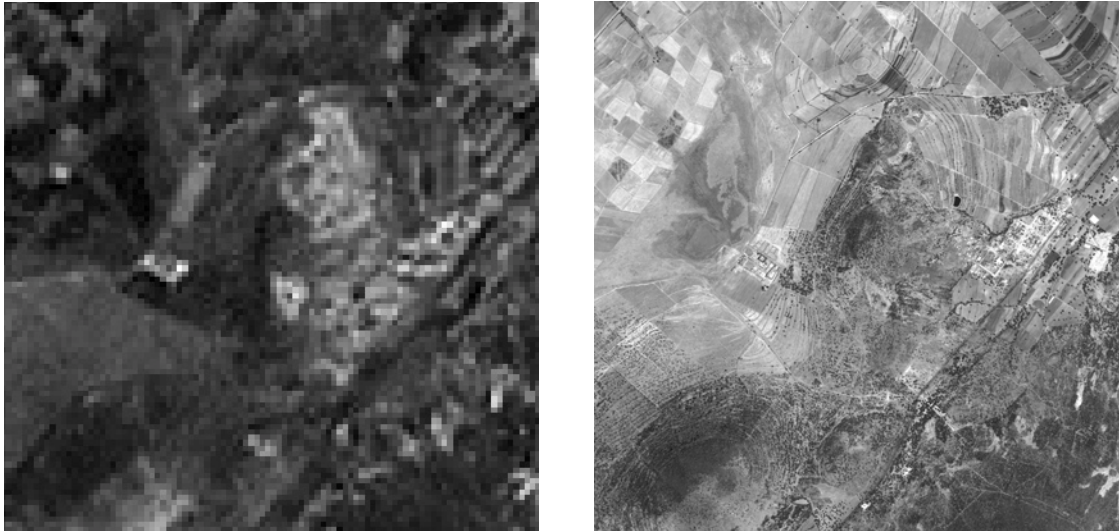


Figura 2.12. Efecto de la resolución espacial, espectral y radiométrica en la imagen de la banda 1 del sensor *Landsat* (baja resolución, izquierda) y *QuickBird* (alta resolución, derecha).

El ojo humano solamente es capaz de distinguir 64 tonalidades de grises y 200,000 tonos de color. Al tener 256 niveles por banda, en una composición de 3 bandas, se obtendrían composiciones de 16,8 millones de colores, esto rebasa por mucho lo que somos capaces de ver, sin embargo, en los análisis numéricos de las imágenes, la computadora aprovecha todo el rango disponible, siendo ventajoso contar con alta resolución radiométrica para diferenciar coberturas con reflectancias muy parecidas y que pueden ser indicadores del tipo de material, humedad, estrés, minerales o algún otro factor útil para la investigación.

2.12.4 RESOLUCIÓN TEMPORAL

Este concepto contempla a la frecuencia de cobertura de un sensor, dicho de otra forma, se refiere a la periodicidad con la que éste adquiere imágenes de una misma porción de la superficie terrestre en un intervalo de tiempo. Depende de la altura y ángulo de observación, velocidad y tipo órbita, así como del campo de visión que ofrezca el sensor. Cabe mencionar que la resolución temporal depende

también de las condiciones atmosféricas ya que en áreas cubiertas por nubes, la frecuencia de adquisición de imágenes útiles es menor que la del sensor.

Las plataformas con resolución temporal alta realizan seguimientos adecuados a los cambios que experimenta un sitio, ejemplo de esto, son los satélites meteorológicos como el *Meteosat* y los del *NOAA*, que envían datos cada 30 minutos a 4 horas del estado de la atmósfera cambiante.

Las altas resoluciones son necesarias para fenómenos que cambian en períodos de tiempo relativamente cortos, como son las inundaciones, incendios, contaminación del agua y desarrollo de las cosechas, entre otras. Por el contrario, las plataformas con sensores aplicados en la geología, arqueología y en la exploración de recursos naturales tienen una resolución temporal mucho más baja, con periodos de dos a cuatro semanas. Por ejemplo, el sensor de *Landsat* tiene una resolución de 16 días, *Spot* de 26 y el de *QuickBird* de 3.5 días.

2.12.5 RESOLUCIÓN ANGULAR

Este concepto se refiere a la capacidad que posee un sensor para adquirir imágenes oblicuas, esto permite no solo mejorar la resolución temporal al acortar los tiempos de adquisición de imágenes, sino también generar imágenes estereoscópicas para reconstruir el relieve del terreno.

Para el análisis conjunto de las resoluciones del sistema es importante tener en cuenta que un sensor no es mejor que otro debido a su resolución, siempre un aumento de cualquier tipo de resolución genera un aumento en el volumen de datos lo que puede presentar complicaciones para su análisis. En el diseño de un sensor se considera el tipo de resolución según sus objetivos y el área de aplicación.

2.13 PLATAFORMAS ESPACIALES Y SENSORES ORIENTADOS EN APLICACIONES GEO-ARQUEOLÓGICAS.

Las principales plataformas satelitales se ajustan a dos órbitas, llamadas geocéntricas y heliocéntricas. Los primeros tienen el mismo periodo orbital que la Tierra, se encuentran a 36000 Km de distancia, y siempre tienen la misma posición relativa respecto a la Tierra. Esta característica les permite siempre observar la misma zona, por lo que son utilizados para la observación meteorológica. Por su parte los satélites con órbitas heliocéntricas tienen una inclinación próxima a los

90° (casi polar), lo que permite que puedan observar siempre una zona diferente de la superficie terrestre ya que su órbita es perpendicular al movimiento de rotación (Chuvienco, 2008). Su altura orbital es de 600 a 900 Km., ajustándose para que siempre pasen por el ecuador a la misma hora local, por lo que si se comparan imágenes de distintos años tendrán las mismas condiciones de iluminación. Este tipo de órbitas son las más comunes para los satélites de media y alta resolución con posibles aplicaciones en la arqueología como *Landsat*, *Spot* y *QuickBird*.

2.13.1 SERIE DE SATÉLITES LANDSAT

Este proyecto ha sido sin duda el programa más exitoso hasta el momento, esto se debe a que los sensores poseen una resolución aceptable para la mayor parte de las aplicaciones, incluyendo la arqueológica aunque sea de carácter regional. Otras de sus características son su cobertura global, periodicidad en la observación y su buena comercialización – actualmente es un recurso gratuito-.

La primera serie del programa *Landsat* se inició en el año de 1972 con la serie ERTS (*Earth Resource Technology Satellite*). Participaron la NASA y el U.S. Geological Survey (USGS). A partir del segundo lanzamiento, *Landsat 2*, en 1975 se nombra *Landsat* a esta serie de satélites. El *Landsat 3* se lanzó en 1978. Los satélites poseían una resolución temporal de 18 días, es decir, pasaban por el mismo lugar cada 18 días, a la misma hora local entre 9:30 y las 10:30 según la latitud del lugar a una distancia de 2875 Km. Poseían dos sensores principales: un barredor multiespectral (MSS) y una cámara de video (RBV), (fig. 2.13).

La segunda serie fueron los satélites *Landsat 4* y *5*. Los participantes en estos programas fueron la NASA, la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), *Earth Observation Satellite Company* (EOSAT), el U.S. Geological Survey (USGS).

Los satélites fueron lanzados en 1982 y 1984, respectivamente. La principal diferencia entre *Landsat 4* y *5* respecto a los *Landsat* anteriores, es que las RBV fueron remplazadas por una nueva generación de MSS llamados Mapeadores Temáticos (TM), fabricados para elaborar cartografía temática. Estos sensores poseen más bandas espectrales y ofrecen una mejor resolución espacial, espectral y radiométrica, (tabla 2.2).

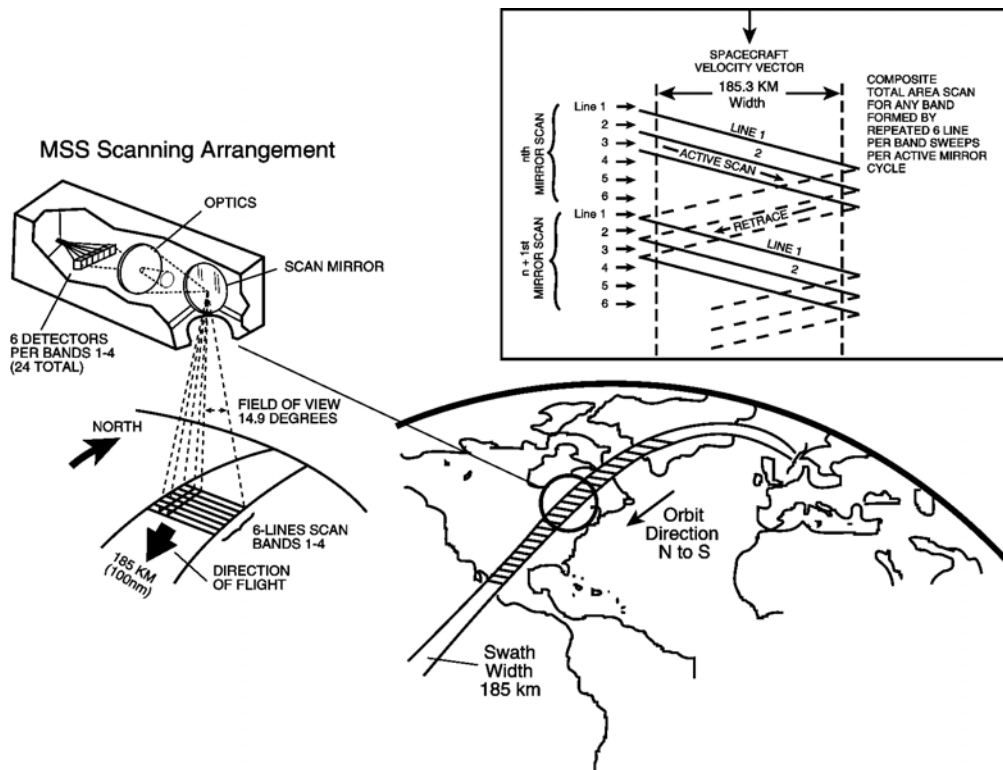


Figura 2.13. Características del barredor multispectral de la serie Landsat (MSS).
http://eros.usgs.gov/#/Guides/landsat_mss

La tercera serie de *Landsat* comenzó con un fracaso, el *Landsat 6*, por fallas de comunicación no se ubicó en la órbita precisa y se perdió poco después de su lanzamiento en octubre de 1993. Los participantes en este programa fueron la NASA, la *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*, *Earth Observation Satellite Company (EOSAT)*, el *U.S. Geological Survey (USGS)*, *Lockheed Martin Missiles & Space*, *Hughes Santa Barbara Research Center*. Posteriormente *Landsat 7* fue lanzado en 1999, está equipado con un sensor de multispectral conocido como el mapeador temático de realce o *ETM+* (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), dedicado a la cartografía temática (fig. 2.14). Entre las mejoras técnicas a la serie anterior, el satélite *Landsat 5*, son la adición de la banda pancromática (PAN) con resolución de 15 metros. También, cuenta con mejor resolución radiométrica y mayor resolución espacial en la banda térmica a 60 m. Las principales aplicaciones para los sensores TM y ETM+ se muestran en la tabla 2.3.



Figura 2.14. Componentes principales del sensor ETM+ de la serie Landsat 7.
<http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/payload/>

SENSOR	RVD	MSS	TM	ETM+
PLATAFORMAS SATELITALES	LANDSAT 1, 2, 3	LANSAT 1, 2, 3, 4, 5	LANDSAT 4, 5	LANDSAT 6, 7
BANDAS	1 ⁴ 0.475-0.575 μm 2 ⁴ 0.580-0.680 μm 3 ⁴ 0.690-0.830 μm 1 ⁵ 0.505-0.750 μm	4 0.5-0.6 μm 5 0.6-0.7 μm 6 0.7-0.8 μm 7 0.8-1.1 μm 8 ⁵ 10.4-12.6 μm	1 0.45-0.52 μm 2 0.52-0.60 μm 3 0.63-0.69 μm 4 0.76-0.90 μm 5 1.55-1.75 μm 6 10.4-12.5 μm 7 2.08-2.35 μm 8 0.52-0.90 μm	1 0.45-0.52 μm 2 0.52-0.60 μm 3 0.63-0.69 μm 4 0.76-0.90 μm 5 1.55-1.75 μm 6 10.4-12.5 μm 7 2.08-2.35 μm 8 0.52-0.90 μm
RESOLUCIÓN ESPACIAL	1-3 ⁴ 80 m 1 ⁵ 40 m	4-7 ¹ 79 m 1 ⁵ 240 m	1-5, 7 30 m 6 120 m	1-5, 7 30 m 6 60 m 8 15 m
RESOLUCIÓN TEMPORAL	18 DÍAS	18 DÍAS	16 DÍAS	16 DÍAS
RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA	6 BITS	6 BITS	8 BITS	8 BITS
SWATH (ANCHO DEL BARRIDO)	185 Km	185 Km	185 Km	185 Km
1 SÓLO EN LOS LANDSAT 1 A 5 2 SÓLO EN LOS LANDSAT 1 Y 5 3 SÓLO EN LANDSAT 7 4 SÓLO EN LOS LANDSAT 1 Y 2 5 SÓLO EN LANDSAT 3				

Tabla 2.2. Principales parámetros de los sensores del programa Landsat (Adaptado de Chuvieco, 2008).

SENSORES TM Y ETM+		
BANDA	LONGITUD DE ONDA λ (μm)	APLICACIONES
1	0.45-0.52 μm	mapeo de aguas costeras diferenciación entre suelo y vegetación diferenciación entre vegetación conífera y decídua
2	0.52-0.60 μm	mapeo de vegetación calidad de agua
3	0.63-0.69 μm	absorción de la clorofila diferenciación de especies vegetales áreas urbanas, uso del suelo, agricultura, calidad de agua
4	0.76-0.90 μm	delineamiento de cuerpos de agua mapeo geomorfológico, mapeo geológico áreas de incendios, áreas húmedas, agricultura, vegetación
5	1.55-1.75 μm	uso del suelo medición de humedad de la vegetación diferenciación entre nubes y nieve agricultura, vegetación
6	10.4-12.5 μm	mapeo de stress térmico en plantas corrientes marinas propiedades térmicas del suelo mapeos térmicos de agua y suelo
7	2.08-2.35 μm	identificación de minerales mapeo hidrotermal
8	0.52-0.90 μm	Canal pancromático, resolución 15m Catastro rural y urbano, infraestructuras urbana Ubicación de centros de población, hidrología, etc.

Tabla 2.3. Aplicaciones importantes para los sensores TM y ETM+ del programa Landsat (Adaptado de Reuter, 2009).

2.13.2 SERIE DE SATÉLITES SPOT

El primer satélite *SPOT* (*Systeme Pour l'Observation de la Terre*) fue puesto en órbita en 1986. A partir de esa fecha se han lanzado otros cuatro satélites en 1990, 1993, 1998 y 2002. Fueron desarrollados por el CNES francés, en colaboración con Bélgica y Suecia. El *SPOT* orbita a una altitud de unos 822 Km., con una órbita heliosincrónica y una resolución temporal de 26 días.

Cuenta con dos radiómetros de exploración por empuje (pushbroom), elimina el espejo oscilante (escáner de barrido) e incorpora una matriz lineal de detectores denominados HRV (*Haute Resolution Visible*). Estos dos sensores obtienen imágenes en dos modalidades: pancromática y multiespectral (verde, rojo, infrarrojo

cercano), con una resolución espacial de 10 y 20 m, respectivamente (tabla 2.4). Adicionalmente pueden adquirir imágenes estereoscópicas, adicionando la capacidad topográfica. Los satélites *SPOT* incorporan también dos equipos de apoyo, el *DORIS* y el *POAM* (*polar ozone and aerosol measurement*), incorporado en el *SPOT 3*, para medir el ozono, aerosoles, nitrógeno, oxígeno y vapor de agua.

El *SPOT 4*, puesto en órbita en 1998, incorporó un sensor de alta resolución llamado *HRVIR*, con una nueva banda en el *SWIR* (tabla 2.3). Este satélite también cuenta con los sensores *DORIS* y *POAM*. Posteriormente se lanzó el *SPOT-5* en mayo del 2002, mejoró la resolución espacial del *HRVIR* con el sensor *HRG* (*high resolution geometric*) - de 5 o 2.5 m en el pancromático y de 10 m en el multiespectral, el *SWIR* de 20 m-.

Además de los sensores de mayor resolución, puestos en los *SPOT 4* y *5* se incorporó otro sensor de carácter más global, llamado *Vegetation*, con una resolución espacial de 1 km², con 4 bandas espectrales (azul, rojo, NIR, *SWIR*), cubriendo un área de 2.250 Km., y le da continuidad a los estudios que hacían los sensores *AVHRR* del *NOAA*. Adicionalmente el *SPOT 5* incluye un sensor *HRS* (*high resolution stereoscopic*) para adquirir imágenes estereoscópicas, adicionando la capacidad topográfica, (fig. 2.15).

<i>SENSOR</i>	<i>HRV</i> ¹	<i>HRVIR</i> ² , <i>HRG</i> ³	<i>VEGETATION</i> ²
BANDAS	1 0.50-0.59 μm 2 0.61-0.68 μm 3 0.79-0.89 μm PAN 0.51-0.73 μm	1 (azul) 0.50-0.59 μm 2 (rojo) 0.61-0.68 μm 3 (NIR) 0.79-0.89 μm 4 (SWIR) 1,58-1.75 μm PAN 0.51-0.73 μm	1 (azul) 0.43-0.47 μm 2 (rojo) 0.61-0.68 μm 3 (NIR) 0.78-0.89 μm 4 (SWIR) 1.58-1.75 μm
RESOLUCIÓN ESPACIAL	1-3 20 m PAN 10 m	1-4 20 m/10 m ⁽³⁾ PAN 10 m-5 m-2.5 m ⁽³⁾	1-4 1 m
RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA	PAN 6 BITS 1-3 8 BITS	PAN 6 BITS 1-4 8 BITS	1-4 8 BITS
RESOLUCIÓN TEMPORAL	26 DÍAS	26 DÍAS	26 DÍAS
SWATH (ANCHO DEL BARRIDO)	60 Km	60 Km	60 Km
1 SÓLO EN LOS SPOT 1 A 3 2 SÓLO EN LOS SPOT 4 Y 5 3 SÓLO EN EL SPOT 5		SENSOR HRS³ PAN 0.51-0.73 μm RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA 8 BITS RESOLUCIÓN. ESPACIAL 2.5- 5-10 m SWATH 120 Km	

Tabla 2.4. Principales sensores de la serie *SPOT* (Adaptado de Chuvieco, 2008).

Las imágenes del HRVIR y las adquiridas por *Vegetation* se comercializan a través de la empresa Spot-Image, y cuenta con antenas receptoras en casi todo el mundo, incluyendo México.

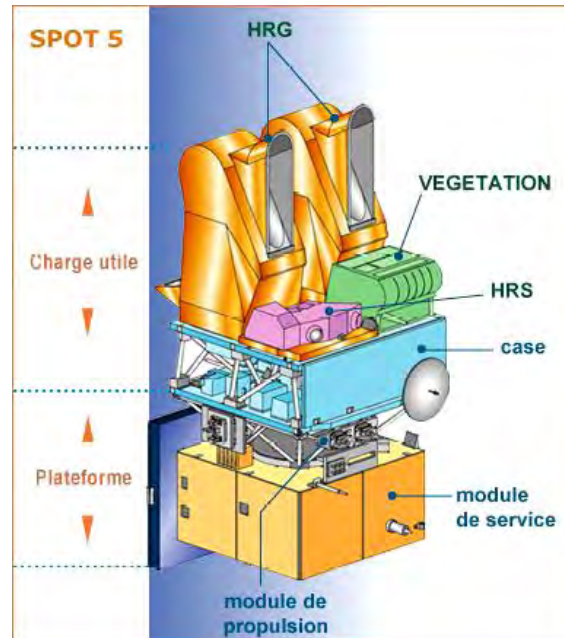


Figura 2.15. Sensores montados en el satélite SPOT 5.

<http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/spot-5.html>

2.13.3 SATÉLITE QUICKBIRD

Esta plataforma satelital, fue puesta en órbita el 18 de octubre de 2001, se encuentra a 450 Km. de altura en un órbita heliosincrónica. Actualmente el satélite *QuickBird* junto con *WorldView* y *Geo-Eye* (0.4 m de resolución espacial), propiedad de *DigitalGlobe™* y *Geo-Eye™*, es uno de los satélites comerciales que poseen la mayor resolución espacial, con tamaño de píxel de hasta 61 cm, (fig. 2.16.). Adquiere imágenes multiespectrales y pancromáticas, de forma simultánea y una gama de productos procesados, en extensas zonas de terreno de 16.5 Km. de longitud en una sola pasada. *QuickBird* es también uno de los satélites que proporciona la mayor capacidad de almacenamiento de datos a bordo, 128 Gb. Está diseñado para adquirir imágenes con una elevada precisión geográfica.

Las imágenes de la superficie terrestre que ofrece este satélite poseen un gran nivel de detalle claridad, calidad espectral y cobertura global, siendo una gran herramienta para el análisis e interpretación de la superficie terrestre,

visualizándose objetos como casas, caminos, zonas arqueológicas, automóviles, árboles, y demás objetos de dimensiones submétricas.



Figura 2.16. El satélite de alta resolución QuickBird en órbita heliosincrónica.
<http://www.digitalglobe.com/downloads/QuickBird-DS-QB-Web.pdf>

Este tipo de satélites son la nueva generación de plataformas para la obtención de datos de alta resolución espacial. Las áreas de aplicación son variadas y van desde catastro urbano y rural, control de cultivos y salud de la vegetación, defensa, minería, recursos naturales, vías de comunicación, planeación de obras civiles, arqueología del paisaje, entre otras.

El *QuickBird* posee el instrumento BGIS 2000 (*Ball's Global Imaging System 2000*) compuesto por dos sensores: el sensor pancromático BHRC 60 (*Ball High Resolution Camera 60*), con resolución espacial de 61 cm (en el nadir) y el sensor multiespectral de 4 bandas BCP 2000 (*Ball Commercial Platform 2000*) de resolución espacial de 2.44 m. El sensor multiespectral es un radiómetro de exploración formado por una matriz de detectores (*pushbroom*) que almacena imágenes de una sola pasada sobre una porción del terreno. Las imágenes multiespectral y pancromáticas pueden ser adquiridas sobre la misma área y en la misma pasada del satélite (modo *bundle*). Las imágenes tienen una resolución radiométrica 11 bits, alcanzando 2048 niveles de energía. Los detalles de la información que ofrece esta plataforma se muestra en la tabla 2.15.

SENSOR	<i>Pancromático BHRC 60</i>	<i>Multiespectral BCP 2000</i>
BANDAS	Altura 450 Km PAN 0.45-0.90 μm	Altura 450 Km 1 (azul) 0.45 – 0.52 μm 2 verde) 0.52 – 0.60 μm 3 (rojo) 0.63 – 0.69 μm 4 (NIR) 0.76 – 0.90 μm
RESOLUCIÓN ESPACIAL	0.61 m en el nadir	2.44 m en el nadir
RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA	11 BITS	11 BITS
RESOLUCIÓN TEMPORAL	2.4 días al nadir 5.9 días 20 ⁰ del nadir	2.4 días al nadir 5.9 días 20 ⁰ del nadir
SWATH (ANCHO DEL BARRIDO)	16.8 Km	16.8 Km

Tabla 2.15. Sensores a bordo del satélite de alta resolución QuickBird (Adaptado de <http://www.digitalglobe.com/downloads/QuickBird-DS-QB-Web.pdf>, 2011).

3. METODOLOGÍA DE LA PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

La geofísica como ciencia se encarga de la aplicación ordenada de un conjunto de métodos y técnicas físico-matemáticas orientadas al estudio del interior de la Tierra. En función del método geofísico utilizado su rango de aplicación comprende desde toda la Tierra hasta unos pocos centímetros del subsuelo.

Para la mayoría de las aplicaciones existe una relación inversa entre la profundidad y la resolución, a mayor profundidad menor es la resolución y viceversa.

La prospección arqueológica cae dentro de la geofísica de alta resolución, debido a que muy pocas veces sobrepasan los 30 m de profundidad. Al detectar variaciones muy pequeñas en una propiedad física del subsuelo y de los objetos sepultados, es necesario emplear equipos geofísicos de alta sensibilidad: magnetómetros con resoluciones de nanoteslas o picoteslas, georradars con antenas de MHz y GHz con altas velocidades de muestreo, y equipos de resistividad con sensibilidades de milisiemens, entre otros.

Para evaluar la aplicabilidad de los métodos de prospección geofísica en estudios arqueológicos es necesario considerar los siguientes aspectos:

- Todos los métodos geofísicos se basan en el contraste de alguna propiedad física entre el objeto/estructura buscado y el subsuelo o material encajonante. Si no existe alguna diferencia en una propiedad física que sea medible (constante dieléctrica, campo magnético resistividad, densidad,...) entre el objeto/estructura con el material encajonante, entonces no podrá ser detectado.
- Los métodos geofísicos tienen una resolución y profundidad determinadas por las características del equipo, por las dimensiones y propiedades físicas del objeto/estructura y por las propiedades del subsuelo. Por ejemplo, la detección de un objeto con el radar de penetración (georradar) estará en función de la frecuencia y potencia de la antena utilizada, de la profundidad a la cual se encuentra, de sus dimensiones y del contraste en propiedades electromagnéticas con su entorno.
- La prospección geofísica genera modelos aproximados del subsuelo, están limitados por la densidad de lecturas adquiridas y por los métodos

matemáticos empleados para crearlos. De esta forma, un perfil de resistividades o un radargrama, son un modelo del subsuelo creado a partir de las resistividades medidas en campo, y en el radargrama por las reflexiones registradas a diferentes tiempos. Por lo tanto, al ser un modelo, no lo podemos concebir como una representación exacta del subsuelo, como una radiografía o tomografía, es una visión aproximada de la realidad. Aún con este inconveniente, es de gran ayuda para el arqueólogo contar con imágenes de anomalías (modelos) susceptibles de ser excavadas.

Una imagen geofísica es una representación del subsuelo y es más aproximada dependiendo de la densidad de lecturas, del contraste de propiedades físicas y de la sensibilidad del instrumento empleado, sin embargo esta representación nunca será comparable con el grado de detalle que ofrece la excavación arqueológica.

Los métodos geofísicos deben aplicarse solamente si son útiles en la investigación arqueológica, hay situaciones en las se sabe de antemano que no funcionarán, como en la prospección con georradar en arcillas saturadas y con alto contenido de sales conductivas, también en estudios magnéticos en zonas urbanas con gran cantidad de infraestructura metálica.

Para que los métodos geofísicos sean una herramienta útil para la arqueología se debe tomar en cuenta los siguientes factores:

- Tener definido claramente el problema a resolver. Profundidad, geometría, propiedades físicas, tamaño.
- Establecer los métodos que se utilizarán con base al contraste entre materiales, profundidad de penetración, resolución, tamaño, rapidez.
- Planificación del levantamiento de datos en campo. Revisar la información de área de estudio, reconocimiento preliminar del sitio, equipo principal y accesorio apropiado, establecimiento de la retícula de trabajo y georreferenciación.
- Levantamiento de datos. Llevar un registro detallado de cada medición: longitud de la línea, equipo utilizado, localización, fecha y hora. Si es necesario realizar algunas pruebas para calibrar el funcionamiento óptimo. Adquirir los datos con la mejor calidad posible.

- Procesamiento de los datos. Aplicar las técnicas que se manejen plenamente y el resultado que tendrán sobre los datos originales.
- Interpretación geofísica de los datos procesados. Con toda la información disponible, planos, mapas y perfiles geológicos, dibujos arqueológicos, información histórica, perfiles de suelos, etc., realizar una interpretación de las anomalías encontradas.
- Correlación geofísica-arqueológica de los resultados. Retroalimentación con la información proporcionada por el arqueólogo para hacer una interpretación conjunta y llegar al resultado final del estudio acorde a los objetivos de la investigación.

Por otra parte la aplicación de los métodos geofísicos en la investigación arqueológica tiene muchas ventajas y vale la pena mencionar algunas:

- Son métodos no destructivos y no perturban el contexto arqueológico, ya que pueden ofrecer información importante desde los primeros centímetros del subsuelo sin alterar el contexto.
- La aplicación de las técnicas geofísicas son más baratas en comparación con la excavación arqueológica. Prospeccionar una retícula de 20x20 m con gradiente magnético o con el radar tiene un menor costo que excavar esta área con la exigencia que lo hace el trabajo arqueológico.
- Son herramientas que pueden emplearse para planificar los trabajos de excavación y decidir en que zonas se harán las verificaciones más importantes, sobretodo cuando se dispone de pocos recursos, situación común en la investigación arqueológica.
- Existen situaciones en las que no se quiere excavar por diversas circunstancias, entonces las técnicas geofísicas servirán para registrar los elementos en el subsuelo y decidir si se excavan, o no en un futuro. En condiciones favorables es posible hacer reconstrucciones virtuales a partir de datos geofísicos.

La clasificación de los métodos de prospección geofísica generalmente suele hacerse en dos grandes grupos:

- Métodos pasivos. Son aquellos en los que la fuente está asociada a un campo natural, ejemplo de ellos, son el método magnético y el gravimétrico, que están basados en pequeñas diferencias del campo magnético y gravimétrico terrestre.
- Métodos activos. Son aquellos que dependen de una fuente artificial para generar un campo. Por ejemplo, la prospección eléctrica, inyecta una corriente continua al subsuelo y mide su resistividad aparente. Por otra parte el georradar introduce ondas electromagnéticas en el subsuelo y mide los tiempos de las ondas reflejadas.

En ambos casos (activos y pasivos), el campo excitador será modificado por las propiedades físicas del medio. Si se miden en algunos puntos los valores de este campo, entonces se tendrá una idea sobre las variaciones de las propiedades físicas del subsuelo.

3.1 EL MÉTODO DE RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE (GEORRADAR)

El georradar o radar de penetración terrestre (ground penetrating radar, gpr) es una técnica geofísica que emplea ondas electromagnéticas de radiofrecuencia del orden de 10 a 2500 MHz, la técnica es similar en sus principios teóricos al sonar y a la sísmica de reflexión.

Con el georradar se aplica una técnica de prospección geofísica que proporciona imágenes del subsuelo para conocer la distribución y profundidad de las estructuras arqueológicas. Esta técnica produce perfiles continuos de alta resolución en forma rápida y no destructiva, mientras provee información en tiempo real para hacer una evaluación inmediata del terreno.

Los fundamentos del radar de penetración terrestre son simples, una antena transmite ondas de radiofrecuencia a través del subsuelo, cuando llegan a la interfase entre dos materiales con propiedades electromagnéticas diferentes (σ conductividad, ϵ constante dieléctrica, v velocidad de propagación, μ permeabilidad magnética), parte de ellas se reflejan, mientras otras son transmitidas. La unidad de control medirá el tiempo transcurrido entre las ondas transmitidas y las reflejadas, esta sucesión de eventos se repite en intervalos de tiempo muy cortos del orden de nanosegundos ($1 \text{ ns} = 1 \times 10^{-9} \text{ s}$) mientras la antena está en movimiento y las ondas reflejadas se representan como trazas dibujadas

consecutivamente que corresponden a las posiciones de la antena sobre la superficie del terreno y forman un perfil continuo llamado radargrama, (figura 3.1).

Los costos de este tipo de estudios están estrechamente relacionados con el tiempo empleado. En la práctica hay que sumar el tiempo de adquisición, el tiempo de procesamiento y el tiempo de interpretación de todos los datos. La técnica de radar es relativamente rápida en la adquisición de los datos, pero es la más lenta en el procesamiento. Por el contrario, la técnica eléctrica es lenta durante la adquisición, pero muy rápida en el procesamiento. En los casos en que las condiciones lo permiten, se prefiere aplicar las tres técnicas, pero en muchos casos sólo es posible aplicar una o dos de ellas (Blancas 2000).

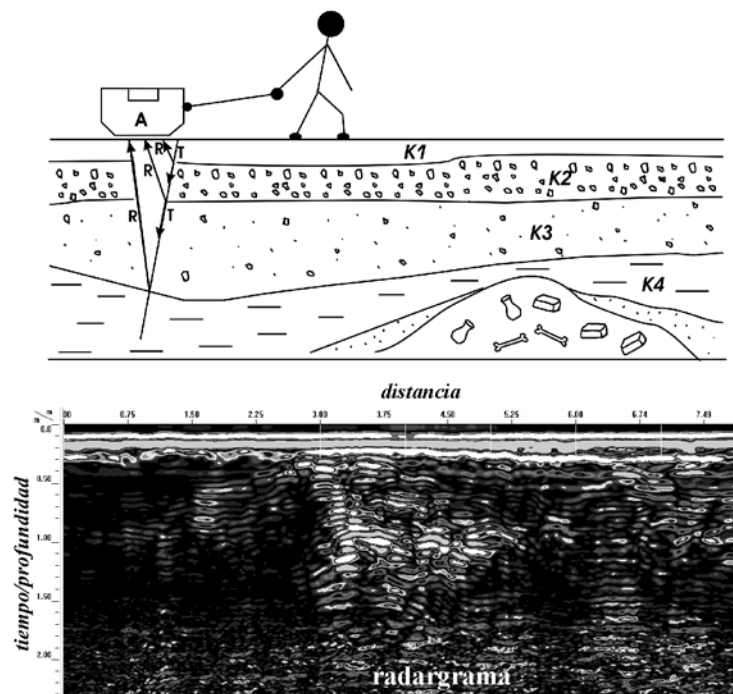


Figura 3.1. Radargrama formado a partir de la adquisición en modo continuo.

3.2 COMPONENTES DEL SISTEMA DE GEORRADAR

Un sistema básico de georradar se compone de los siguientes elementos:

- Unidad de control: la unidad de control se encarga de manejar los parámetros como el tiempo de medición, muestras por traza (samples/scan), trazas por segundo (scans/s), posicionamiento del pulso, aplicación de

filtros, ajustes de ganancia, control automático de distancia recorrida sobre el terreno, profundidad de investigación, además de controlar el funcionamiento óptimo de las antenas, monitor e impresora. Las unidades de control del *SIR-3000*, *SIR-30* (*Surface Interface Radar, GSSI*), *pulseEKKO PRO*, *NOGGIN* (*Sensors & Software*) y los modelos de *Måla GeoScience*, son los sistemas comerciales más utilizados en el mundo.

- Antenas: son elementos muy esenciales en un equipo de georradar, debido a que se encargan de transmitir los pulsos electromagnéticos, generados en la unidad de control y modificados por un circuito transmisor en la antena. Las antenas también pueden recibir las reflexiones de las estructuras en el subsuelo, operando como receptores.

Son llamadas antenas monoestáticas (de un solo elemento) las cuales funcionan como transmisor y receptor al mismo tiempo (antenas de dipolo cruzado), mientras que estas funciones están en dipolos separados en antenas biestáticas (de dos elementos). Las monoestáticas se utilizan en antenas de media a alta frecuencia (200 MHz a 2 GHz) y las biestáticas en antenas de frecuencias más bajas (10 MHz a 100MHz).

- Odómetro o GPS para control de la distancia: el levantamiento de los datos debe tener un sistema para medir la distancia recorrida sobre la superficie, generalmente se hace con un odómetro digital o con un GPS comercial conectado a la unidad de control para georreferenciar cada transecto adquirido. La referencia espacial de cada radargrama es vital en la interpretación de los datos, ya que se tiene una mejor idea del tamaño de las anomalías registradas que pueden tener relación con algún elemento arqueológico. También es necesaria para las representaciones 3D y en la correlación con otras técnicas.
- Programas de procesamiento: gran parte de la información generada por las técnicas geofísicas requieren de programas especializados para el procesamiento de los datos, con ellos es posible a través de rutinas de filtrado en espacio y tiempo, remover fuentes de ruido, amplificar señales débiles y generar imágenes 3D, entre otras, todo ello con el propósito de facilitar la interpretación de los datos y darle un sentido físico a los resultados.

3.3 LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y LA CONSTANTE DIELECTRICA PARA EL GEORRADAR

Dos son las propiedades que más afectan el trabajo con el georradar, la conductividad eléctrica que controla la profundidad de penetración y la constante dieléctrica que se relaciona con las reflexiones generadas por los materiales.

3.3.1. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La conductividad eléctrica se puede definir como la capacidad de un material para conducir la corriente eléctrica. La atenuación y profundidad de penetración de la señal son directamente dependientes de la conductividad eléctrica de los materiales del contexto. Los valores son controlados principalmente por el contenido de agua y/o arcilla. Cuando la conductividad del terreno es alta provocará problemas de penetración para la señal del georradar. Conductividad > 0.01 S/m (resistividad < 100 ohm-metro) presentaran condiciones difíciles para trabajar con el georradar en terrenos con estos valores.

Las figuras 3.2 y 3.3 muestran la variación de la conductividad con respecto a la porosidad y al contenido de agua. La figura 3.4 presenta la profundidad de penetración en función de la conductividad del terreno. De acuerdo con Hara y Sakayama, (1985), para el modelo reflectivo, la conductividad de suelos y sedimentos no saturados está dada por:

$$\sqrt{\sigma} = n(1-s)\sqrt{\sigma_a} + ns\sqrt{\sigma_w} + (1-n)\sqrt{\sigma_s} \quad (3.1)$$

En donde:

σ = conductividad de la capa de sedimento σ_s = conductividad de las partículas del suelo
 σ_a = conductividad del aire σ_w = conductividad del agua
 n = factor de porosidad (%) s = grado de saturación

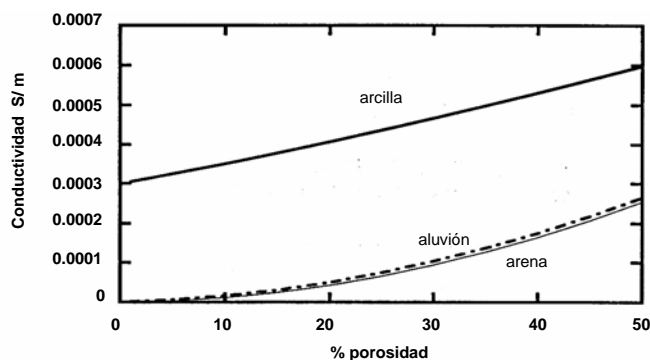


Figura 3.2. Variación de la conductividad como función de la porosidad en los sedimentos (tomado de Hara y Sakayama, 1985).

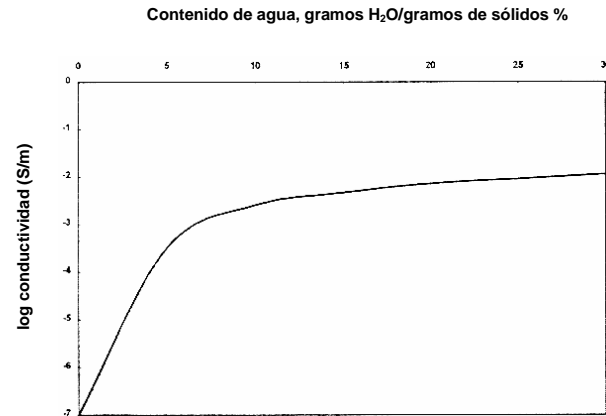


Figura 3.3 Efecto del contenido de agua en la conductividad eléctrica (tomado de Hara y Sakayama, 1985).

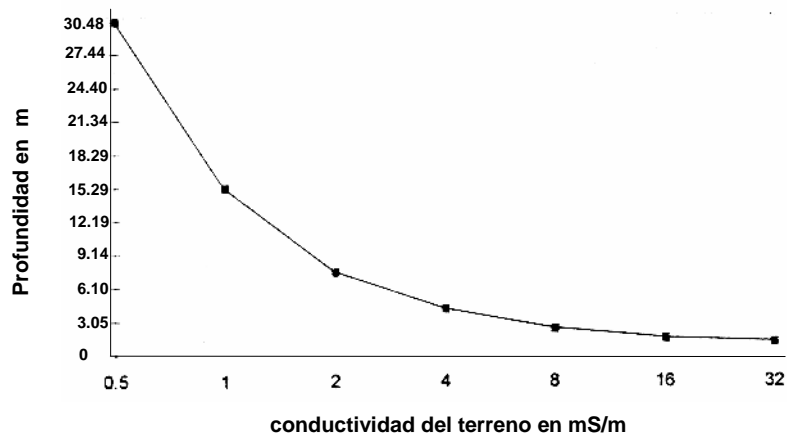


Figura 3.4 Profundidad de penetración aproximada para una señal generada por una antena de 100 MHz en función de la conductividad del terreno (GSSI, 1992).

En términos generales se puede mencionar los rangos de conductividad que definen las condiciones de trabajo con georradar (GSSI, 1992) de la forma siguiente:

- a) Conductividad baja – excelentes condiciones para el trabajo con radar (conductividad $<1 \times 10^{-7}$ S/m)
 - Aire
 - Granito seco, caliza seca
 - Concreto, asfalto

- b) Conductividad media – condiciones buenas para el trabajo con radar ($1 \times 10^{-7} < \text{conductividad} < 1 \times 10^{-2} \text{ S/m}$)
- Agua dulce, hielo, nieve
 - Arena, arcilla seca, basalto, aluvión
- c) Conductividad alta – condiciones difíciles para el trabajo con radar (conductividad $> 1 \times 10^{-2} \text{ S/m}$)
- Arcilla húmeda, lutita húmeda
 - Agua de mar

La Tabla 3.1 muestra la conductividad eléctrica y la constante dieléctrica para algunos materiales.

MATERIAL	σ (S/m)	K
Aire	0	1
Agua dulce	10^{-4} a 3×10^{-2}	81
Agua de mar	4	81
Hielo de agua dulce	10^{-3}	4
Granito (seco)	10^{-8}	5
Caliza (seca)	10^{-9}	7
Arcilla (saturada)	10^{-1} a 1	8 a 12
Nieve	10^{-6} a 10^{-5}	1.4
Arena (seca)	10^{-7} a 10^{-3}	4 a 6
Arena (saturada)	10^{-4} a 10^{-2}	30
Aluvión	10^{-3} a 10^{-2}	10
Hielo de agua salada	10^{-2} a 10^{-1}	4 a 8
Basalto (húmedo)	10^{-2}	8
Granito (húmedo)	10^{-3}	7
Lutita (húmeda)	10^{-1}	7
Arenisca (húmeda)	4×10^{-2}	6
Caliza (húmeda)	2.5×10^{-2}	8
Suelo:		
arenoso seco	1.4×10^{-4}	2.6
arenoso húmedo	6.9×10^{-3}	25
limoso seco	1.1×10^{-4}	2.5
limoso húmedo	2.1×10^{-2}	19
arcilloso seco	2.7×10^{-4}	2.4
arcilloso húmedo	5×10^{-2}	15
Suelo congelado	10^{-5} a 10^{-2}	4 a 8

Tabla 3.1 Valores aproximados de conductividad eléctrica y constante dieléctrica para diversos materiales (Ulriksen, 1982).

3.3.2. CONSTANTE DIELECTRICA

Se define como la capacidad de un material para retener o almacenar carga cuando un campo eléctrico es aplicado. Los valores pueden variar entre 1 y 81, están controlados principalmente por el contenido de agua. La diferencia en la constante dieléctrica entre los límites o fronteras de los materiales provocará las reflexiones. La intensidad de las reflexiones está controlada por el contraste entre las constantes dieléctricas de los materiales adyacentes. La diferencia en constante dieléctrica mayor o igual a 1 provocará reflexiones en los materiales del subsuelo. Las Figuras 3.5 y 3.6 muestran la variación de la constante dieléctrica con la porosidad y con el contenido de agua. La tabla 3.1 presenta valores de constante dieléctrica para algunos materiales.

Hara y Sakayama, (1985), mostraron que la constante dieléctrica de suelos y sedimentos no saturados está dada por:

$$\sqrt{K} = n(1-s)\sqrt{K_a} + ns\sqrt{K_w} + (1-n)\sqrt{K_s} \quad (3.2)$$

- K = constante dieléctrica de la capa de sedimento
- K_a = constante dieléctrica del aire
- K_w = constante dieléctrica del agua
- K_s = constante dieléctrica de las partículas del suelo
- n = factor de porosidad (%)
- s = grado de saturación

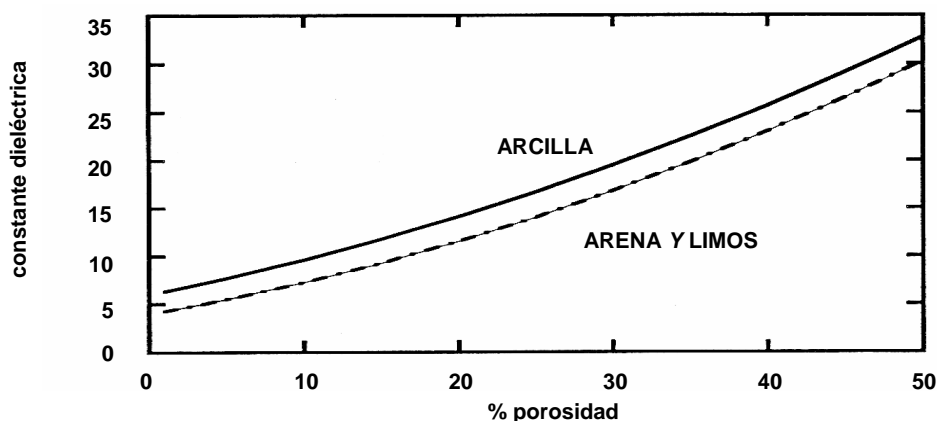


Figura 3.5. Variación de la constante dieléctrica como función de la porosidad de los sedimentos (Hara y Sakayama, 1985).

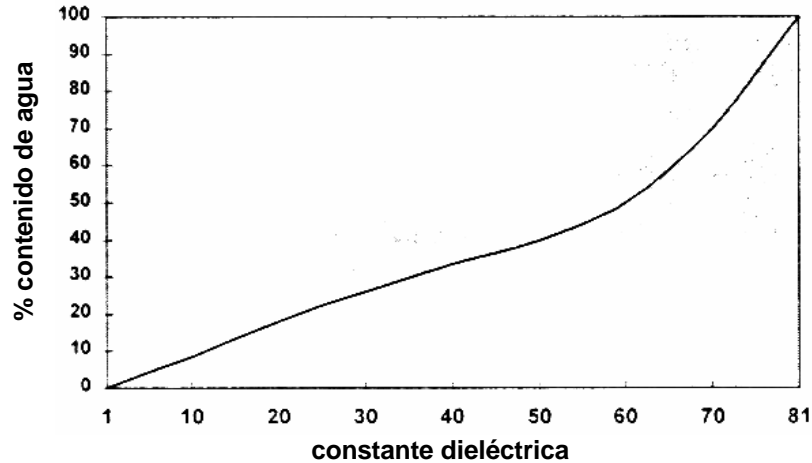


Figura 3.6. Efecto del contenido de agua en la constante dieléctrica (Hara y Sakayama, 1985)

3.4 RESOLUCIÓN VERTICAL

En general la resolución vertical es la capacidad del sistema para resolver o diferenciar elementos independientes y distinguir señales muy cercanas en tiempo o en frecuencia, depende directamente de las características de la antena y el muestreo de cada pulso.

En la figura 3.7, se muestran pulsos de diferente duración en tiempo, sus equivalentes en el dominio de la frecuencia y sus correspondientes resoluciones en espacio. Se observa que el ancho del pulso Δt disminuye cuando la frecuencia Δf aumenta. Los sistemas de georradar están diseñados para tener anchos de banda que son casi iguales a la frecuencia central, verificándose que el periodo del pulso es inversamente proporcional a la frecuencia central, por esto la frecuencia y la duración del pulso son intercambiables para el sistema:

$$\Delta t = \frac{1}{\Delta f} \quad (3.3)$$

En la figura se observa que un amplio ancho de banda proporciona una mejor resolución, aumentando a frecuencias más altas y disminuyendo a frecuencias más bajas. La frecuencia central del un sistema tiene un mayor impacto en la profundidad de penetración, la razón de esto es que si la frecuencia disminuye la profundidad de penetración aumenta y viceversa. Es importante mencionar que la resolución también depende de las propiedades eléctricas del medio. Debe existir

un compromiso entre la penetración y la resolución del sistema. En la práctica será mejor tener resoluciones verticales medias en favor de una profundidad de penetración aceptable. Cuando requerimos una penetración mayor tenemos una baja resolución y si es necesaria una alta resolución entonces la penetración es relativamente pequeña.

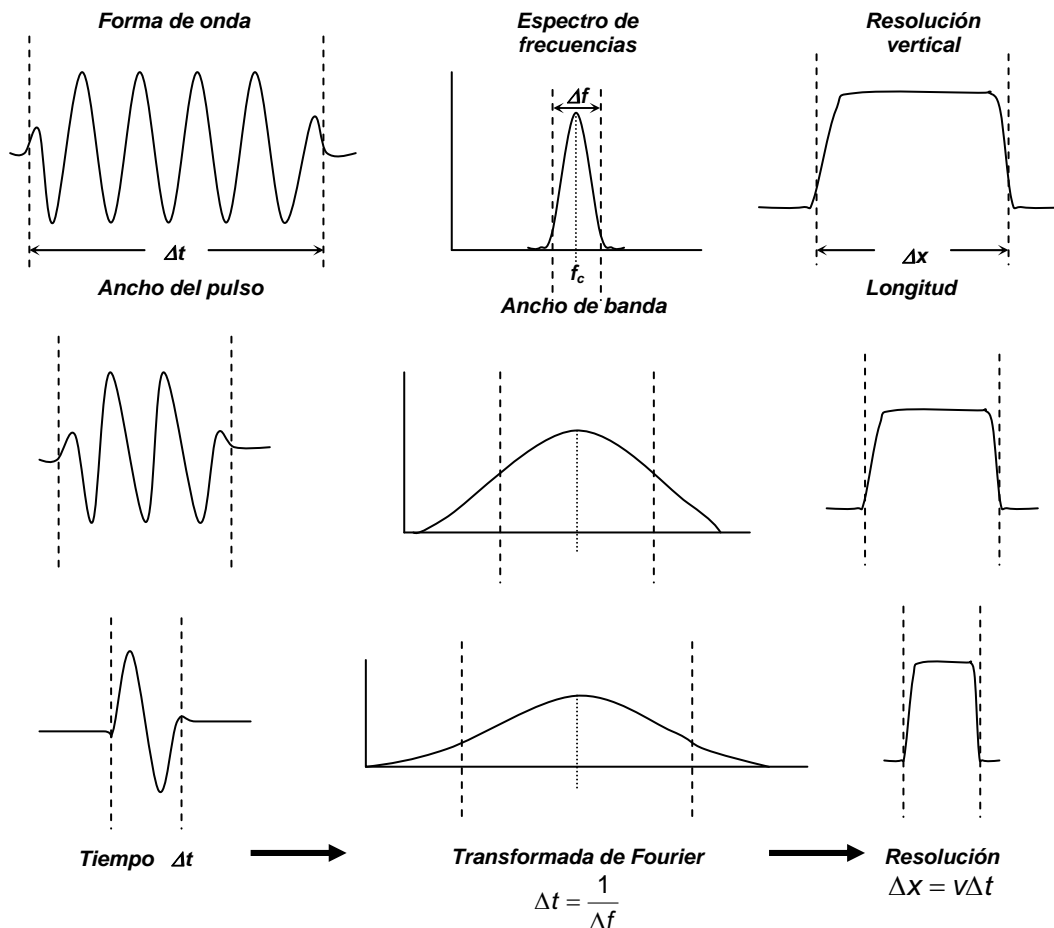


Figura 3.7. Relación entre el ancho del pulso, su espectro y la resolución vertical (Davis y Annan, 1989).

Basándose en lo anterior, la resolución vertical en términos de las propiedades eléctricas del medio se puede expresar como:

$$T_m = 0.5\lambda \tag{3.4}$$

en donde:

T_m = mínimo espesor que puede ser resuelto

λ = longitud de onda

La longitud de onda puede ser calculada a partir de:

$$\lambda = v / f$$

Donde

λ = longitud de onda del pulso generado por la antena

f = frecuencia central del pulso transmitido al medio

La velocidad de la onda en un medio puede ser calculada como:

$$v = c / \sqrt{K}$$

en donde:

c = velocidad de la luz en el vacio = 3×10^8 m/s

K = constante dieléctrica del medio

Combinando las tres últimas ecuaciones, tenemos que la resolución vertical en términos de K y f es:

$$T_m = \frac{c}{2f\sqrt{K}} \quad (3.5)$$

Para ilustrar la utilidad de esta fórmula podemos hacer un ejemplo del cálculo de la resolución vertical para la mayoría de las antenas comerciales, asumiendo una constante dieléctrica de 9 correspondiente a suelos arcillosos con baja saturación, como se muestra en la Tabla 4.3:

<i>Frecuencia central (MHz)</i>	<i>Ancho del pulso (ns)</i>	<i>Resolución vertical (m)</i>
2000	0.5	0.025
1500	0.66	0.033
1000	1	0.050
900	1.11	0.550
500	2	0.100
400	2.5	0.125
300	3.33	0.167
200	5	0.250
120	8.33	0.417
100	10	0.500
80	12.5	0.625
50	20	1.000
40	25	1.250
35	28.57	1.430
25	40	2.000
20	50	2.500
16	62.5	3.125
12.5	80	4.000

Tabla 3.2. Resolución vertical en función de la frecuencia central de la antena.

3.5 SELECCIÓN DE LA ANTENA

La selección de la antena más adecuada para un problema específico depende principalmente de los siguientes factores:

- La profundidad de penetración
- La resolución requerida en el trabajo
- El tipo de aplicación

La tabla 3.3, proporciona una guía para la selección de la antena apropiada en aplicaciones arqueológicas en comparación con otras aplicaciones y con base en la profundidad de penetración. Es importante mencionar algunos de los factores que tienen mayor influencia en la profundidad de penetración:

FRECUENCIA CENTRAL (MHz)	APLICACIONES	PROFUNDIDAD (m)	VENTANA DE TIEMPO (ns)
12.5,16,20,25,35,40,50,80	Geología	5 - 30+	300 - 800
100	Geología Medio ambiente	4 - 25	300 - 500
200	Geología, Arqueología Medio ambiente	1 - 10	70 - 300
300	Geología superficial Ingeniería, Arqueología Medio ambiente	1 - 9	70 - 300
400	Geología superficial Ingeniería Medio ambiente Arqueología	0.5 - 4	20 - 100
500	Geología superficial Ingeniería Medio ambiente Arqueología	0.5 - 3.5	20 - 80
900	Concreto, Suelos Arqueología Puentes	0 - 1	10 - 20
1000	Concreto, Pavimento Arqueología, Restauración	0 - 0.5	10 - 15
1500-2000	Concreto, Pavimento, Arqueología, Restauración	0 - 0.25	0-10

Tabla 3.3 Profundidad de penetración de algunas antenas comerciales (GSSI, Sensors & Software).

La profundidad de penetración decrece cuando:

- 1) La conductividad eléctrica aumenta
- 2) El contenido de agua aumenta
- 3) El contenido de arcilla aumenta
- 4) La frecuencia de la antenna es alta

El contenido de agua y arcilla no se puede controlar, pero los factores restantes sí.

A partir de la ecuación 3.5 podemos conocer la resolución vertical con base en las características del medio y a la frecuencia central de la antenna. Annan, (1992), propone una fórmula para estimar la frecuencia óptima de la antenna a partir de la resolución y de la constante dieléctrica del medio dada por:

$$f = \frac{150}{T_m \sqrt{K}} \text{ MHz} \quad (3.6)$$

en donde:

T_m = es el mínimo espesor que puede ser resuelto (m)

K = es la constante dieléctrica del medio

f = es la frecuencia de la antenna (MHz)

Geophysical Survey Systems, proporciona la figura 3.8 donde se puede encontrar la frecuencia de la antenna a partir del mínimo espesor que puede ser resuelto y a la constante dieléctrica del medio.

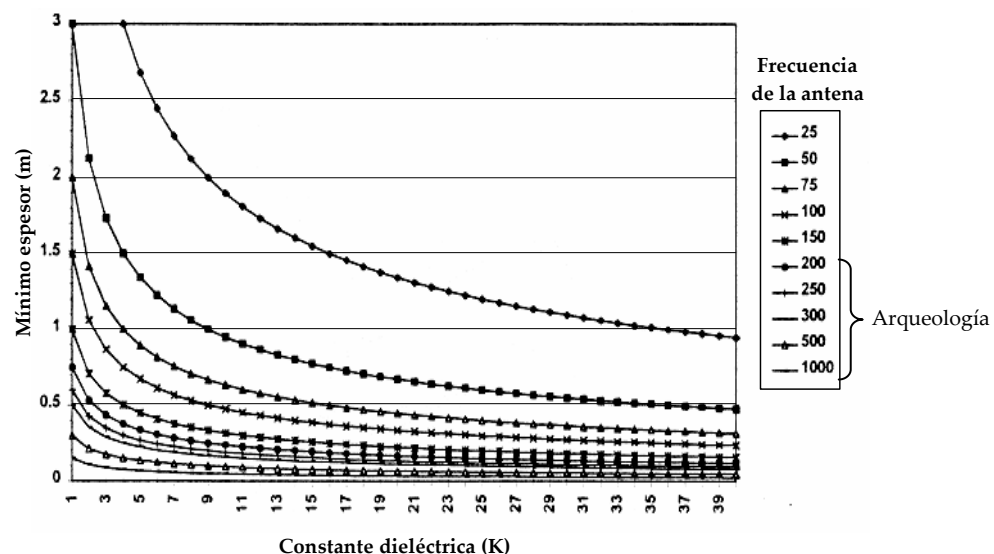


Figura 3.8. Frecuencia la antenna con base en el espesor y en la constante dieléctrica (GSSI, 1992).

A excepción de la frecuencia, los demás factores no se pueden controlar.

La profundidad de penetración es mayor cuando:

- 1) La frecuencia de la antena es baja
- 2) El transmisor es de mayor potencia
- 3) El receptor es más sensible
- 4) El contenido de agua y arcilla es bajo

3.6 PROCESADO E INTERPRETACIÓN PARA DATOS DE GEORRADAR

Debido al tiempo involucrado en el procesamiento e interpretación de gran cantidad de datos, se debe considerar que tipo de procesamiento es necesario. Básicamente tenemos que determinar si puede hacerse algún tipo de interpretación de los datos sin procesar (datos crudos). Es decir, que tal vez podría ser suficiente con variar la tabla de colores o modificar la ganancia para una interpretación adecuada de los datos. Sin embargo, tal vez sea imprescindible utilizar algún tipo de filtrado, deconvolución, migración o cualquier otra técnica avanzada para poder mejorar la calidad de los datos. En general el procesamiento deberá hacerse por las siguientes razones:

- Para suprimir las señales no deseadas (ruido) de los datos y mejorar la calidad de los mismos.
- Para corregir por distorsiones geométricas y hacer una interpretación espacial adecuada.
- Para observar otros aspectos importantes en los datos como su espectro de frecuencias y de fase, los cuales pueden proporcionar información adicional para la interpretación.
- Para obtener la profundidad de los radargramas al convertir la escala de tiempo en escala de profundidad.
- Para corregir los datos por efectos de la topografía.
- Para compensar los datos por saturación o por atenuación.

Es importante definir los objetivos específicos para cada procesamiento y seleccionar los métodos apropiados para lograr que se cumplan. Sin embargo se debe considerar la relación costo-beneficio al aplicar varios procesos a un gran

volumen de datos. Aún con el incremento en la velocidad de cómputo, algunos métodos de procesamiento requieren de mucho tiempo para ser aplicados a gran cantidad de datos en un periodo de tiempo razonable. Los métodos de procesamiento pueden ser divididos en dos grupos generales. El primero abarca los métodos que son lo suficientemente rápidos para ser aplicados en una gran cantidad de datos en un tiempo razonable y que generalmente producen buenos resultados. El segundo grupo consiste en métodos más sofisticados que llevan más tiempo de cómputo y que deberán ser aplicados a una parte de los datos, (figura 3.9).

Los métodos de procesamiento que caen dentro de la primera categoría son:

- Filtros verticales y filtros horizontales
- Variación de la tabla de color
- Diferentes formatos de visualización (traza continua y wiggle).
- Ajustes de ganancia y funciones aritméticas
- Corrección por topografía

Estas técnicas normalmente son aplicadas a la mayoría de los datos de georradar debido a su rapidez.

Los métodos de procesamiento que caen dentro de la segunda categoría son:

- Deconvolución
- Migración
- Transformada de Hilbert
- Imágenes en 3D

Estos métodos son mucho más lentos pero proporcionan mejoras significativas en la interpretación de áreas críticas y deberán ser usados selectivamente.

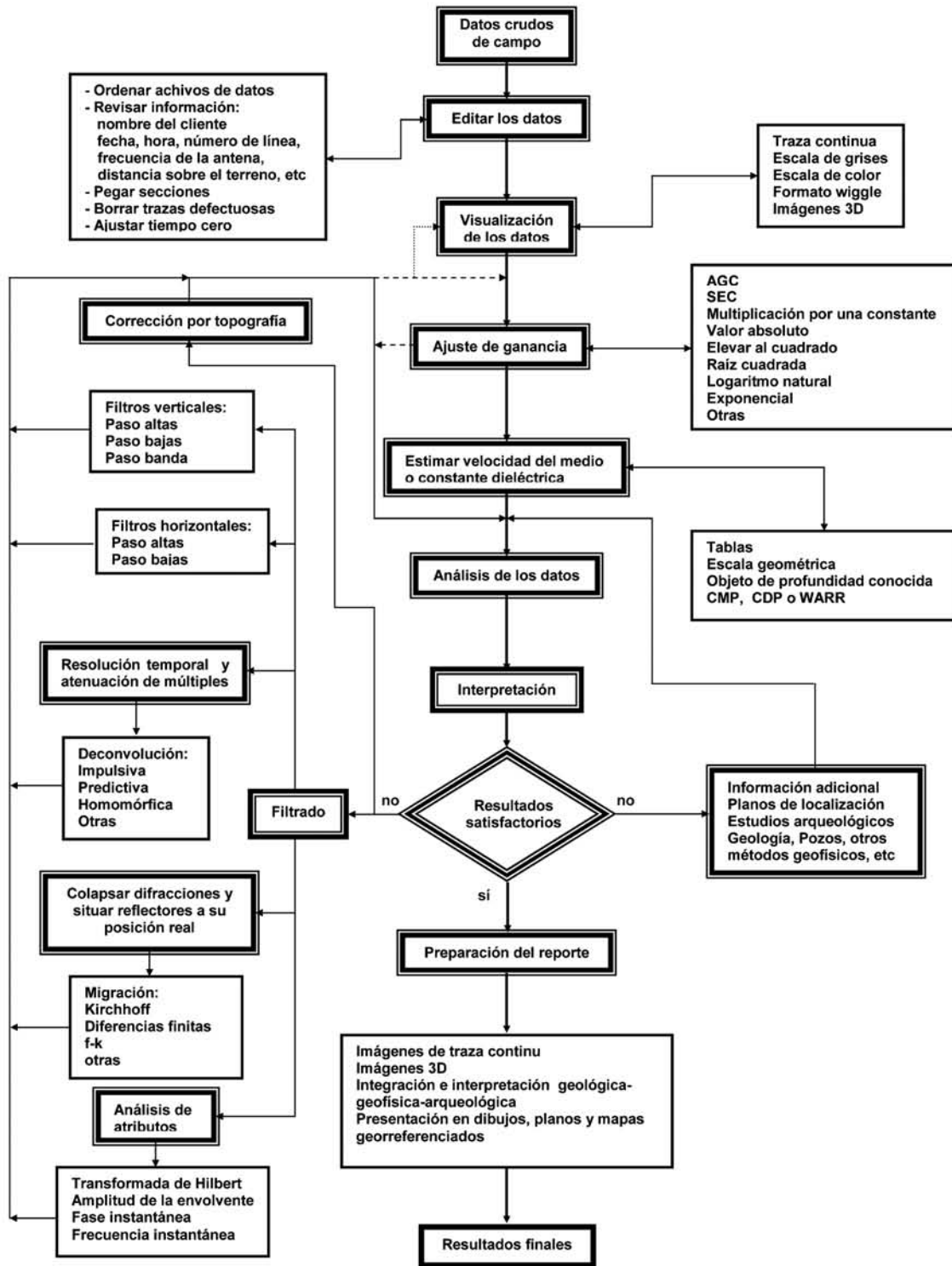


Figura 3.9. Diagrama de procesamiento para datos de GPR

3.7 EL MÉTODO DE GRADIENTE MAGNÉTICO

Esta técnica de prospección se emplea en la arqueología para medir las variaciones del campo magnético terrestre, provocadas por la presencia de restos enterrados de estructuras arquitectónicas con propiedades magnéticas que alteran el campo magnético terrestre.

Su principal ventaja es que cubre grandes extensiones de terreno en corto tiempo, se puede prospectar media hectárea en una jornada de trabajo normal, con espaciamiento entre lecturas de 1 metro, lo que permite obtener mapa magnético del terreno en un tiempo-costo muy razonable. Por otra parte el procesamiento de los datos no es muy complejo, con lo que se pueden obtener resultados casi inmediatos una vez que termina la adquisición de los datos.

La magnetización de los materiales es ocasionada por la inducción del campo magnético terrestre y por acción remanente o termo-remanente. La intensidad de la magnetización inducida depende principalmente de la susceptibilidad magnética (χ_M) y de las características del campo magnético terrestre. En cambio, la acción remanente depende de la historia geológica o arqueológica de los materiales y de cambios súbitos de temperatura; su valor es independiente del valor actual del campo magnético terrestre. Casi siempre la magnetización por inducción (M_i) es mayor que la remanente (M_r), pero hay situaciones, comúnmente encontradas en la prospección arqueológica, en donde la remanente es mucho mayor, como es el caso de los hornos y superficies sometidas a calentamiento

La magnetización total (M_T) del cuerpo se expresa como:

$$M_T = M_r + M_i \quad (3.7)$$

Para la medición del gradiente magnético se utiliza como instrumento el gradiómetro, su funcionamiento es equivalente a un magnetómetro diferencial, en donde el espaciamiento entre los sensores es fijo y pequeño con respecto a las fuentes generadoras de campos magnéticos (por ejemplo, estructuras de piedra). La diferencia de los campos dividida por la distancia entre los sensores es el gradiente asignado al punto medio del espaciamiento entre ellos (figura 3.10).

Esta técnica remueve automáticamente el gradiente regional y, de esta forma, define mejor las anomalías superficiales que para estudios arqueológicos son de mayor importancia para la interpretación. También remueve los efectos producidos por las variaciones diurnas, las tormentas magnéticas y las interferencias presentes en condiciones urbanas.

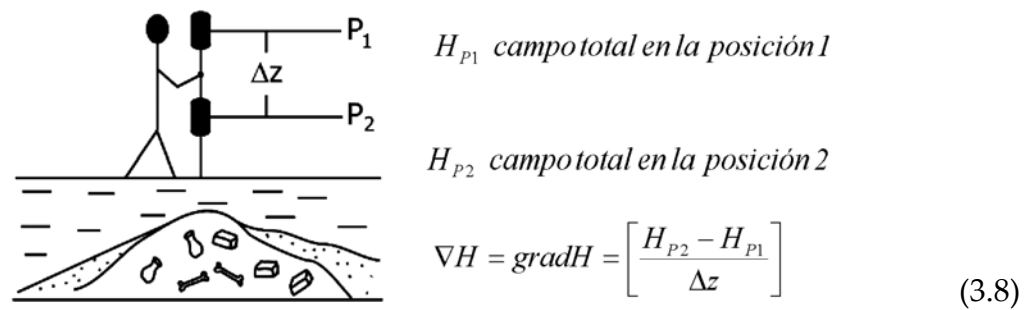


Figura 3.10. Obtención del gradiente de campo magnético sobre la superficie.

El método magnético es muy sensible a materiales que contengan minerales magnéticos (magnetita, ilmenita, óxidos de Fe, cobalto, níquel), por lo que es muy complicado trabajar en zonas urbanas, pero posible con los gradiómetros modernos.

Los nuevos gradiómetros *fluxgate* tienen sensibilidades del orden de nanoteslas, muy aceptable para la mayoría de las investigaciones arqueológicas, los hay en configuraciones de 4 sensores que permiten una mayor velocidad de adquisición y una productividad notable; por otra parte los gradiómetros de vapor de potasio poseen sensibilidades del orden del picoteslas, con altas velocidades de adquisición, lo que permite cubrir grandes extensiones de terreno en poco tiempo y con el registro de anomalías muy débiles.

Es deseable combinar la prospección magnética con otros métodos de prospección geofísica, en el trabajo arqueológico es frecuente combinar esta técnica con el georradar y los métodos eléctricos, de este modo se consiguen aumentar las posibilidades de éxito en la detección de elementos arqueológicos en el subsuelo.

3.8 EL MÉTODO ELÉCTRICO

Los métodos eléctricos se apoyan en la medición de la resistencia eléctrica, son técnicas geofísicas activas; se basan en el contraste de las propiedades eléctricas del subsuelo. En este caso, el contraste de propiedades eléctricas entre los vestigios arqueológicos está en función de su resistencia o resistividad, la profundidad y dimensiones, la proximidad entre ellos y el contenido de humedad del suelo. Si este contraste es suficientemente grande, los vestigios arqueológicos podrán detectados (Barba y Manzanilla, 2003).

R. C. J. Atkinson (1952) fue uno de los primeros que aplicó la medición de la resistencia eléctrica a la arqueología, en Inglaterra en 1946. Después, esta técnica ha sido aplicada exitosamente en muchos otros sitios (Lerici, s.f.).

La propiedad medida es la resistencia que presenta el suelo al paso de la corriente eléctrica. El concepto de resistividad eléctrica aparente se introdujo para los materiales que encontramos en la naturaleza que no son necesariamente homogéneos.

Existen en la literatura muchos métodos de prospección eléctrica, en la arqueología los más utilizados se basan en la inyección de la corriente eléctrica en el subsuelo por medio de un par de electrodos y en la medición de la diferencia de potencial en otro par de electrodos próximos a los anteriores.

Se obtienen de este modo lecturas de resistividad aparente a lo largo de un perfil, a profundidad relativamente constante (calicatas eléctricas) o a distintas profundidades (tomografía eléctrica). Con estas dos modalidades de adquisición, es posible generar mapas a partir de calicatas paralelas, con la distribución de la resistividad aparente en un plano a profundidad constante, o bien producir pseudosecciones de iso-resistividad a profundidad variable.

La resistividad aparente es un parámetro que está en función de varios factores tales como la porosidad, la permeabilidad, fallas, fracturas, discontinuidades, inclusión de minerales conductores, presión, temperatura, contenido de agua y puede ser considerada como una forma para conocer la variabilidad de las propiedades físicas del mismo. Mediante programas de inversión es posible generar modelos a partir de resistividades aparentes que se aproximen a la distribución de resistividades verdaderas, similares con la disposición de las capas naturales y los artefactos en el subsuelo (figura 3.11).

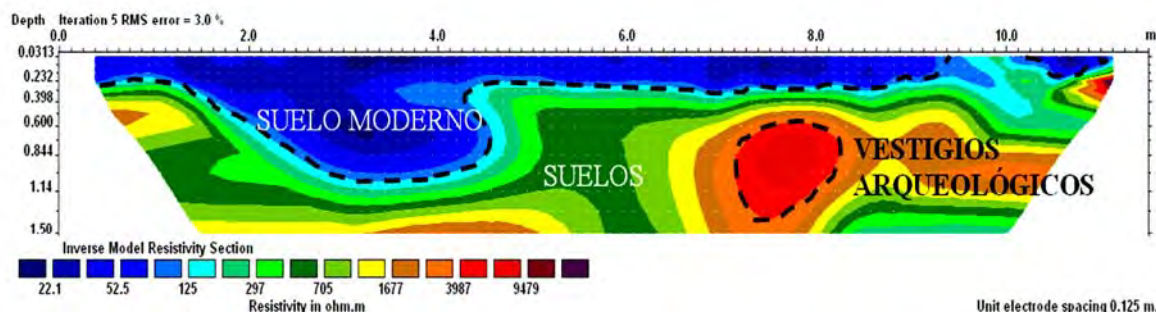


Figura 3.11. Sección de resistividad real creada por la inversión de datos del dispositivo dipolo-dipolo, (Blancas, 2010).

En la arqueología, los métodos eléctricos son más efectivos que el georradar en suelos saturados y con alto contenido de arcilla, ya que si bien con este último se obtienen imágenes de alta resolución, la profundidad de penetración disminuye drásticamente en suelos con estas características. También son aplicables en terrenos abruptos en donde las antenas de georradar se desplazan con mucha dificultad, generando señales muy ruidosas durante la adquisición. Por otra parte es una técnica no destructiva que permite conocer las características del subsuelo sin destruir y alterar el contexto de estudio.

Dentro de la gran variedad de configuraciones eléctricas, un arreglo usado ampliamente en la arqueología debido a su sensibilidad y rapidez operativa en el campo es la calicata o dispositivo polo-polo (*gemelos, twin*), que consiste de cuatro electrodos que se colocan sobre la superficie del terreno. Dos electrodos son empleados como electrodos móviles (A y M) y como electrodos fijos (B y N), los electrodos A y B son de corriente y los M y N son de potencial. Los electrodos (A y M) se mueven sobre la superficie del terreno y los electrodos (B y N) permanecen fijos conectados en el “infinito” o a una distancia muy grande, como se ilustra en la figura 3.12. El resultado es la distribución de valores de resistividad aparente en un mapa a profundidad relativamente constante. La resistividad aparente para este dispositivo se calcula con la siguiente expresión:

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (3.9)$$

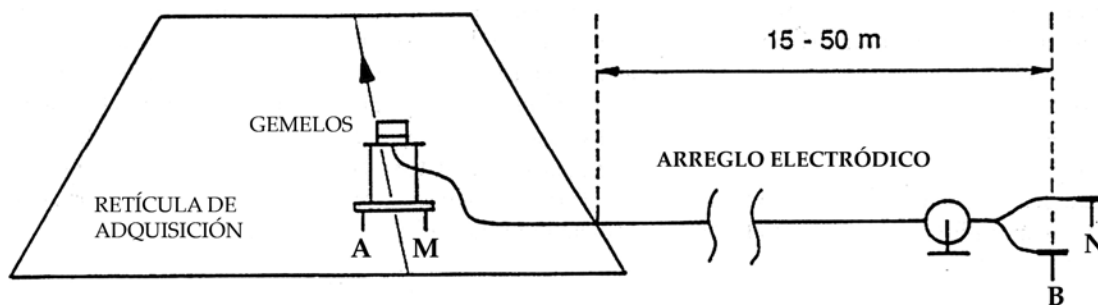


Figura 3.12. Disposición de los electrodos sobre el terreno en el arreglo polo-polo, (Adaptado de Geoscan Research, 2009).

4. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES DE LOS SENSORES LANDSAT ETM, SPOT Y QUICKBIRD.

El objetivo principal del procesamiento digital de imágenes es aplicar distintas técnicas matemáticas a los datos de los sensores remotos, y posteriormente analizar las imágenes producidas, de tal forma que sea revelada la información útil que no es posible reconocer en las imágenes originales.

En forma general, existen tres fases en el procesamiento digital de las imágenes multiespectrales:

- **Preprocesamiento.** Para usar correctamente la información de las imágenes multiespectrales es necesario realizar previamente una serie de ajustes llamados correcciones radiométricas, que permiten convertir el número digital (ND) de cada píxel a radiancia-reflectancia o temperatura, minimizar los errores del sensor y remover los efectos atmosféricos de los datos. Las correcciones geométricas también son frecuentes antes del análisis de la imagen, y consisten en rectificar la imagen con puntos de control en tierra y localizados en un mapa.
- **Despliegue y realce.** Existen numerosos procesos para el despliegue y el realce de la información, entre los más comunes podemos mencionar: fusión de imágenes de distinta resolución espacial y espectral, ajuste del contraste, composiciones de color, filtrado paso bajas, paso altas y direccionales, filtros de textura, cociente entre bandas, componentes principales, transformación tasseled cap, índices de vegetación, entre otros.
- **Extracción de información.** Una vez que los datos han sido procesados es posible utilizar métodos de clasificación, supervisada y no supervisada, para extraer información importante y representarla en forma temática. Esto puede ser realizado en forma una impresión de la imagen, un mapa de la imagen con contenido temático, bases de datos con gráficas y un resumen de las estadísticas de los datos.

4.1 CONVERSIÓN DN-RADIANCIA-REFLECTANCIA

Los valores de los píxeles en las imágenes satelitales expresan la cantidad de energía radiante recibida por el sensor en la forma de valores relativos no calibrados simplemente llamados números digitales (DN) o brillo. Según Chuvieco (2008), la conversión de los DN de una imagen original a variables físicas es un paso previo que es de gran utilidad en múltiples fases de la interpretación de imágenes, ya que permite trabajar con variables físicas de significado estándar, comparables en un mismo sensor a lo largo del tiempo, entre distintos sensores y entre otros métodos de detección de energía electromagnética. El primer aspecto es relevante cuando se abordan temas de detección de cambios, el segundo es importante cuando se requiere integrar información espectral procedente de distintos sensores, y el tercero es clave cuando se quiere comparar nuestros datos con los procedentes de sensores aéreos, radiómetros de campo y firmas espectrales publicadas en catálogos.

Es posible afirmar que la información de una cubierta ya está contenida en los DN originales, pero es necesario considerar que están sólo en modo relativo. Dicho de otra forma, la relación numérica está circunscrita a cada banda de la imagen, y es válido que a un mayor DN, mayor reflectancia, pero no es correcto para comparar bandas entre sí. Un mayor DN, no indica necesariamente una mayor reflectancia entre bandas de distintas fechas y sensores. En cambio, la reflectancia es una variable física que se puede comparar entre sensores, lugares y fechas, por lo que la interpretación de los datos es más sólida, siempre y cuando se usen las mismas bandas del espectro.

4.1.1 CONVERSIÓN DN-RADIANCIA

Para entender este concepto debemos definir que es la radiancia espectral. Según Chuvieco (2008), indica que es la energía total radiada en una determinada longitud de onda por unidad de área y por ángulo sólido. La cantidad de radiancia que un sensor detecta en una banda particular del espectro, es la medida más cercana a la observación remota. Con los datos registrados (DN) por el sensor podemos obtener la radiancia espectral de cada banda a partir de los coeficientes de calibración específicos para cada sensor.

- Para las bandas de *Landsat ETM*, los coeficientes de calibración (L_{MAX} , L_{MIN} , Q_{CALMAX} , Q_{CALMIN}) están en el archivo de metadatos que acompañan a las imágenes por banda.

Para el *Landsat ETM* los detectores están calibrados de manera tal que hay una relación lineal DN y la radiancia espectral al tope de la atmósfera. La información acerca de los parámetros de calibración de los sensores esta detallada en el trabajo de Chander y Markham (2009). La ecuación que relaciona los DN de sensores remotos con la radiancia espectral es:

$$L_{\lambda \text{ sen},k} = \left(\frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{Q_{CALMAX} - Q_{CALMIN}} \right) (Q_{CAL} - Q_{CALMIN}) + L_{MIN} \quad (4.1)$$

$$L_{\lambda \text{ sen},k} = (Gain Q_{CAL}) + Bias \quad (4.2)$$

en donde :

$$Gain = \frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{Q_{CALMAX} - Q_{CALMIN}}, \quad Bias = L_{MIN} - \left(\frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{Q_{CALMAX} - Q_{CALMIN}} \right) Q_{CALMIN}$$

donde :

$$L_{\lambda \text{ sen},k} = \text{radiancia espectral detectada por el sensor en la banda } k \quad \left(\frac{\text{Watt}}{m^2 sr \mu m} \right)$$

Q_{CAL} = nivel digital (DN) de la imagen en la banda k

Q_{CALMIN} = valor mínimo del píxel, para *Landsat ETM* es 1

Q_{CALMAX} = valor máximo del píxel, para *Landsat ETM* es 255

$$L_{MIN} = \text{radiancia espectral correspondiente a } Q_{CALMIN} \quad \left(\frac{\text{Watt}}{m^2 sr \mu m} \right)$$

$$L_{MAX} = \text{radiancia espectral correspondiente a } Q_{CALMAX} \quad \left(\frac{\text{Watt}}{m^2 sr \mu m} \right)$$

- Para los sensores de *QuickBird* la conversión DN a Radiancia es un poco distinta, los parámetros de calibración ($absCalFactor$ y $\Delta\lambda_k$) se obtienen de los metadatos y de las notas técnicas de *Digital Globe* (2005), y se calculan de la siguiente forma:

$$L_{\lambda,k} = (absCalFactor)(Q_k) \quad (4.3)$$

en donde :

$$L_{\lambda,k} = \text{radiancia espectral en el tope de la atmósfera (TOA) para la banda } k \quad \left(\frac{\text{Watt}}{m^2 sr} \right)$$

$$absCalFactor = \text{factor absoluto de calibración radiométrica} \quad \left(\frac{\text{Watt}}{m^2 sr} \right)$$

$$Q_k = \text{nivel digital (DN) de la imagen en la banda } k$$

Finalmente, la radiancia espectral promedio que recibe el sensor en el tope de la atmósfera se obtiene como:

$$\boxed{L_{\lambda_{sen,k}} = \frac{L_{\lambda,k}}{\Delta\lambda_k}} \quad (4.4)$$

en donde :

$L_{\lambda_{sen,k}}$ = radiancia espectral promedio en el tope de la atmósfera (TOA)

para la banda k $\left(\frac{\text{Watt}}{\text{m}^2 \text{sr } \mu\text{m}}\right)$

$L_{\lambda,k}$ = radiancia espectral en el tope de la atmósfera (TOA) para la banda k $\left(\frac{\text{Watt}}{\text{m}^2 \text{sr}}\right)$

$\Delta\lambda_k$ = ancho de banda efectivo para la banda k (μm)

4.1.2 CONVERSIÓN RADIANCIA-REFLECTANCIA

La reflectancia es la relación entre el energía reflejada y la incidente por una superficie, $\rho=L_{sen}/L_{Sol}$, es adimensional. La reflectancia varía entre 0 (superficie totalmente absorbente) y 1 (superficie totalmente reflectora), y varía para las distintas bandas del espectro, por lo que hay que añadirle el calificativo de espectral. De acuerdo con la definición, para obtener la reflectividad de una cubierta es necesario relacionar dos magnitudes: la energía reflejada e incidente. La primera se puede obtener a partir de la radiancia espectral detectada en el sensor y con los coeficientes de calibración apropiados. La energía incidente corresponde con la irradiancia solar en el tope de la atmósfera o exoatmosférica (total de energía radiada por el sol por unidad de área y por unidad de tiempo, watt/m²). A partir de esto se puede calcular la reflectancia aparente en el tope de la atmósfera como, (Chuvieco, 2008):

$$\boxed{\rho_k = \frac{D^2 \pi L_{\lambda_{sen,k}}}{E_{0,k} \cos \theta_i}} \quad (4.5)$$

en donde :

D = distancia Sol - Tierra (en unidades astronómicas)

$L_{\lambda_{sen,k}}$ = radiancia espectral detectada por el sensor en la banda k $\left(\frac{\text{Watt}}{\text{m}^2 \text{sr } \mu\text{m}}\right)$

$E_{0,k}$ = irradiancia espectral exoatmosférica promedio de tablas publicadas para

cada banda de Landsat ETM y QuickBird $\left(\frac{\text{Watt}}{\text{m}^2 \mu\text{m}}\right)$

$\theta_i = 90 - \theta_{\text{elevación solar}}$, ángulo cenital solar al momento de la toma, de los metadatos de la imagen se obtiene el ángulo de elevación solar

Por otra parte, la distancia Sol –Tierra se calcula de la siguiente forma:

- Para **Landsat ETM** se obtiene de la tabla publicada en el artículo de Chander y Markham (2009), buscando la distancia correspondiente al día del año, o con la fórmula propuesta por Chuvieco (2008).

$$D = (1 + 0.01674(\text{sen}(2\pi(\text{día} - 93.5) / 365))) \quad (4.6)$$

- Para **QuickBird** se emplea las fórmulas del U.S. Naval Observatory, detalladas en la nota técnica de Digital Globe (2005).

$UT = hh + \frac{mm}{60} + \frac{ss.ddd}{3600}$, tiempo universal en horas, minutos y segundos.

$\text{año} = \text{año} - 1$, si fue adquirida en Enero o Febrero

$\text{mes} = \text{mes} + 12$, si fue adquirida en Enero o Febrero

Después se calcula el día Juliano (JD):

$$A = \text{entero}\left(\frac{\text{año}}{100}\right), B = 2 - A + \text{entero}\left(\frac{A}{4}\right)$$

$$JD = \text{entero}[365.25(\text{año} + 4716)] + \text{entero}[30.6001(\text{mes} + 1)] + \text{día} + \frac{UT}{24} + B - 1524.5$$

$$D = JD - 2451545$$

$$g = 357.529 + (0.98560028D)$$

Finalmente la distancia se calcula como:

$$D = 1.00014 - 0.01671 \cos(g) - 0.00014 \cos(2g) \quad (4.7)$$

En resumen, para convertir DN a reflectancias se necesita, primero, transformarlos a radiancia $L_{\text{sen},k}$, a partir de los coeficientes y valores de calibración para cada sensor, luego se calcula la reflectancia ρ_k , conociendo la irradiancia solar ($E_{0,k}$) y la fecha y hora de la adquisición de la imagen con la que se estima la distancia Tierra-Sol (D) y el ángulo cenital solar (θ_i). Estas fórmulas parten del supuesto de que la observación se realiza para una atmósfera transparente, verticalmente, sobre una superficie plana y lambertiana.

4.1.3 CONVERSIÓN RADIANCIA-TEMPERATURA

En este trabajo se explora la banda térmica (TIR) de *Landsat ETM+*, convirtiéndola a valores físicos para determinar la temperatura de la superficie, y probar si las estructuras arqueológicas enterradas, hechos de roca en la mayoría de los casos, pueden generar pequeñas diferencias apreciables en la temperatura de la superficie. El inconveniente es la resolución espacial de la banda térmica de *Landsat ETM+* que es de 60 m, creada para estudios más globales y no propiamente para estudios arqueológicos en donde las escalas son distintas, sin embargo, es una oportunidad para ensayar y analizar el método para la transformación de los niveles digitales a temperatura incluido en el manual de *Landsat 7* (2010, pag. 120). Los pasos son los siguientes:

- Calcular radiancia partir de (4.2) para la banda térmica TM61 o TM62

$$L_{\lambda \text{ sen},k} = (\text{Gain}Q_{\text{CAL}}) + \text{Bias}$$

- Las imágenes de radiancia espectral *Landsat ETM+* de la banda 6 se pueden convertir a temperatura, una variable física más útil para relacionarla con una gran variedad de aplicaciones. La fórmula para calcular la temperatura de la superficie con una atmósfera transparente es:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda \text{ sen},k}} + 1\right)} \quad (4.8)$$

En donde:

T = Temperatura de superficie en $^{\circ}\text{K}$

Constante de calibración $K_2 = 1282.71 \text{ }^{\circ}\text{K}$.

Constante de calibración $K_1 = 666.09 \text{ }^{\circ}\text{K}$.

$L_{\lambda \text{ sen},k}$ = Radiancia espectral de ETM6 en watts/($\text{m}^2 \cdot \text{sterad} \cdot \mu\text{m}$)

- Añadiendo el factor de emisividad promedio para la vegetación y el suelo, y convirtiéndola a $^{\circ}\text{C}$.

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1 \varepsilon}{L_{\lambda \text{ sen},k}} + 1\right)} - 273.16 \quad (4.9)$$

En donde:

$\varepsilon = 0.96$, es la emisividad promedio de la superficie, derivada de la emisividad promedio de la vegetación ($\varepsilon = 0.98$) y del suelo ($\varepsilon = 0.93$), (Lillesand, T. M. y Kiefer, R. W., 1994).

4.2 CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA

La conversión de DN a reflectancia aparente sólo modifica las diferencias de calibración entre bandas y la escala de medición a un parámetro físico, sin embargo, no permite corregir por efectos atmosféricos, por la influencia de cubiertas vecinas, por ángulos de observación y por efectos topográficos.

La atmósfera no afecta por igual al flujo incidente (proveniente del Sol, L_{SOL}) y al reflejado (el que llega al sensor del satélite, L_{sen}), debido a que el espesor de atmósfera que atraviesan es distinto, (fig. 4.19). También a la irradiancia solar directa hay que agregarle la difusa procedente de objetos vecinos (E_d). La radiancia que llega al sensor del satélite no es la misma que la que proviene del suelo, es decir está influenciada por la atmósfera y está en función de los siguientes parámetros:

$$L_{sen,k} = L_{suelo,k} \tau_{k,o} + L_{atm,k} \quad (4.10)$$

donde :

$L_{suelo,k}$ = radiancia que sale de la superficie

$\tau_{k,o}$ = transmisividad de la atmósfera para flujo ascendente

$L_{atm,k}$ = radiancia aportada por la dispersión atmosférica

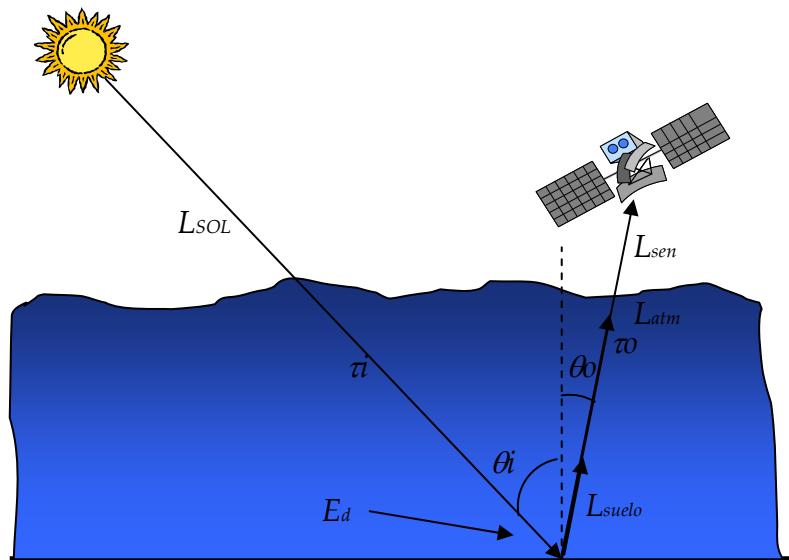


Figura 4.1. Efectos atmosféricos y su relación con la reflectividad (Adaptado de Chuvieco, 2008).

La reflectancia de la cubierta es la que nos interesa medir, sin la influencia de la atmósfera. El desarrollo teórico completo para obtener la reflectancia real de la cubierta lo determina Chuvieco (2008), la expresión resultante es:

$$\rho_k = \frac{D^2 \pi ((L_{sen,k} - L_{atm,k}) / \tau_{k,o})}{E_{0,k} \cos \theta_i \tau_{k,i} + E_{d,k}} \quad (4.11)$$

en donde :

D = distancia Sol - Tierra (en unidades astronómicas)

$L_{sen,k}$ = radiancia espectral detectada por el sensor en la banda k $\left(\frac{\text{Watt}}{\text{m}^2 \text{sr } \mu\text{m}} \right)$

$L_{atm,k}$ = radiancia espectral de la atmósfera debida a la dispersión $\left(\frac{\text{Watt}}{\text{m}^2 \text{sr } \mu\text{m}} \right)$

$\tau_{k,o}$ = transmisividad de la atmósfera flujo ascendente

$\tau_{k,i}$ = transmisividad de la atmósfera flujo descendente

$E_{0,k}$ = irradiancia espectral exoatmosférica promedio de tablas publicadas para cada banda de Landsat ETM y QuickBird $\left(\frac{\text{Watt}}{\text{m}^2 \mu\text{m}} \right)$

$E_{d,k}$ = irradiancia espectral difusa proveniente de objetos vecinos $\left(\frac{\text{Watt}}{\text{m}^2 \mu\text{m}} \right)$

θ_i = ángulo cenital solar, θ_o = ángulo de observación

El procedimiento para remover los efectos atmosféricos y conocer la reflectividad de la cubierta es muy laborioso y requiere conocer datos de las condiciones de la atmósfera en el momento de la medición que no siempre están disponibles. Para esto se han propuesto cuatro métodos:

- De medidas *in situ*, por radiosondeos, medidas de la radiación solar y de la reflectancia del terreno. Estos son los más precisos pero rara vez se tienen.
- De medidas aportadas por otros sensores. Es una técnica novedosa y útil, aunque todavía esta en desarrollo.
- Con simulaciones atmosféricas a partir de modelos de transferencia radiativa. Su precisión depende de las variables involucradas.
- De los datos de la propia imagen. Este es, sin duda, la opción más viable ya que no requiere de información externa y facilita una corrección completa.

Uno de los métodos que emplea los datos de la propia imagen, y que ha sido usado ampliamente, es el método propuesto por Chavez (1996), llamado método de ajuste del histograma al origen o el método de sustracción del objeto oscuro (*dark object*). El método consiste en asumir que hay zonas en la imagen con fuerte oscuridad (agua clara y profunda, zonas con sombra) que deberían tener una radiancia espectral muy cercana a cero. En la práctica esto no sucede, el histograma de la imagen siempre presenta un valor superior a cero que se atribuye a la dispersión atmosférica. Este efecto es mayor en las longitudes de onda cortas y mucho menor en el infrarrojo cercano (NIR) y medio (SWIR). De la expresión (4.11), Chavez asume una transmisividad ascendente ($\tau_{k,0}$) igual a 1 para observaciones verticales, y no considera la irradiancia difusa ($E_{d,k}$). Para remover el efecto atmosférico el método asume que la radiancia atmosférica ($L_{atm,k}$) corresponde con el mínimo del histograma de la imagen. La fórmula propuesta por Chavez (1996), para realizar el ajuste es:

$$\rho_k = \frac{D^2 \pi (L_{sen,k} - L_{atm,k})}{E_{0,k} \cos \theta_i \tau_{k,i}} \quad (4.12)$$

Para las bandas de *Landsat* el autor propone valores de transmisividad incidente, $\tau_{k,i}$ = 0.70 (TM1), 0.78 (TM2), 0.85 (TM3), 0.91 (TM4), 0.81 (TM8) y 1 para las bandas de SWIR (TM5 y TM7).

Para *QuickBird* no hay hasta el momento coeficientes para estimar la transmisividad incidente, la propuesta sería calcular la reflectancia para cada banda a partir de la fórmula (4.5) y después utilizar el ajuste del histograma al origen para remover el efecto atmosférico en cada banda.

4.3 CORRECCIÓN POR TOPOGRAFÍA

Otro factor importante que se toma en cuenta en el cálculo de reflectancias es el efecto de la topografía en las imágenes, debido a que depende de los ángulos de incidencia (θ_i) y de observación (θ_o). Los efectos topográficos son muy notorios especialmente en las zonas de sombra. Con la disponibilidad creciente de modelos digitales de elevación (MDE), es posible corregir por la topografía, homogeneizando las señales de las cubiertas y corrigiéndolas por efectos de iluminación.

En zonas de terreno montañoso la pendiente de la cubierta modifica la geometría del flujo incidente ($E_{o,k}$). La energía máxima se obtiene cuando el ángulo cenital solar es cero ($\theta_i=0$), cuando el sol está en el cenit. En laderas orientadas al Sol el

ángulo cenital no coincide con el de incidencia (que en zonas planas son iguales), mientras que en las zonas opuestas puede que no se reciba energía solar en absoluto. Si no se tiene contemplado este problema, la reflectancia medida para una misma cubierta con distintas pendientes puede dar resultados muy distintos y presenta inconvenientes cuando se realiza la clasificación de coberturas temáticas.

Chuvieco (2008), propone una técnica muy sencilla para eliminar el efecto topográfico con un simple cociente entre bandas de la misma imagen, utilizando la fórmula de reflectancia aparente (4.5). Debido a que el $(\cos \theta_i)$ es constante entre bandas, al realizar el cociente entre bandas adquiridas simultáneamente, el efecto por topografía se elimina, es decir:

$$Coc_{k,m} = \frac{\rho_k}{\rho_m} = \frac{\frac{D^2 \pi L_{sen,k}}{E_{0,k} \cos \theta_i}}{\frac{D^2 \pi L_{sen,m}}{E_{0,m} \cos \theta_i}} = \frac{\frac{L_{sen,k}}{E_{0,k}}}{\frac{L_{sen,m}}{E_{0,m}}} = \frac{E_{0,m} L_{sen,k}}{E_{0,k} L_{sen,m}} \quad (4.13)$$

Debido a que la radiancia y la irradiancia solar son dependientes de la longitud de onda no se pueden eliminar, la expresión anterior es una forma simplificada de eliminar los efectos topográficos. Si se dispone de un MDE de similar resolución espacial que la imagen, es posible remover efectivamente el efecto topográfico, para esto se emplean métodos más sofisticados que no trataremos aquí, se pueden consultar en la literatura de percepción remota y en la obra de Chuvieco (2008).

4.4 FUSIÓN DE IMÁGENES POR EL MÉTODO HLS Y PCA

El interés de realizar investigaciones con distintas escalas hace que las técnicas de integración de datos provenientes de distintos sensores sea cada vez mayor, generando una nueva línea de trabajo en la percepción remota llamada fusión de datos.

La ventaja de disponer de imágenes de alta resolución espectral y espacial es importante cuando se realizan estudios en zonas urbanas, zonas forestales heterogéneas, zonas agrícolas, y reciente ente en estudios arqueológicos. Por un lado, una alta resolución espectral facilita la diferenciación o discriminación de cubiertas. Por otro lado, es necesaria una alta resolución espacial para poder delimitar de forma precisa la superficie ocupada por cada cubierta, así como para localizar distintas estructuras o accidentes del terreno. De esta forma, al generar

una imagen sintética a partir de una pancromática de alta resolución espacial y una multiespectral con tamaño de píxel más grueso, obtendríamos el brillo y la calidad espacial de la primera con el contraste cromático de la segunda.

Lo que se pretende con estas técnicas es mejorar la interpretación de los datos, mejorando su calidad visual y diferenciar ciertas categorías en las cubiertas. La fusión de datos se puede abordar en dos niveles. El primero sería generar imágenes sintéticas o híbridas, combinando datos de dos o más sensores para producir una sola imagen como resultado. El segundo sería analizar varias imágenes en paralelo, con objeto de discriminar mejor ciertos rasgos de interés, también se podrían incorporar datos obtenidos de estudios independientes, finalmente se puede integrar distintas versiones de los datos (imágenes fusionadas y originales, resultados de la interpretación) con las que se pueden tomar decisiones, (Chuvieco, 2008).

Se han propuesto varios métodos para la fusión de datos, algunos más complejos que otros. Estos métodos suelen dividirse en dos grupos, el primero está basado en operaciones algebraicas entre las bandas como son el multiplicativo y el Boverly. El segundo está basado en transformaciones, incluyendo la transformación tono, luminosidad, saturación (HLS), las componentes principales (PCA), la transformada de Fourier y las *wavelets*. Las basadas en la transformada de Fourier y *wavelets* son las más sofisticadas y requieren un mayor tratamiento de los datos, sin embargo, ofrecen mejores resultados en la parte espacial y espectral. En este trabajo sólo abordaremos la fusión por HLS y PCA, debido a que conceptualmente son más sencillas y ofrecen resultados aceptables. En los trabajos publicados por González, et al. (2002) y Te-Ming Tu, et al. (2005), se comparan las distintas técnicas de fusión.

4.4.1 MÉTODO RGB-HLS

Uno de los métodos más ampliamente usado es la transformación HLS (tono, luminosidad y saturación), en general, el color de un determinado píxel se define en función de sus componentes, es decir, en función de su contenido de rojo (R), verde (G) y azul (B), en el espacio de color RGB. En otro espacio de color se puede representar en función de su tono (H), luminosidad (L), y saturación (S). El tono está en función de la longitud de onda en donde se genera la máxima reflectancia del objeto, es la forma en como nuestros ojos perciben el color. La saturación está relacionada con la pureza del color, el grado de mezcla con los colores primarios. La luminosidad se puede identificar con el brillo. Desde el punto de vista de los

sensores remotos, el tono y la saturación se relacionan con el contenido espectral de la imagen, mientras que la luminosidad con las variaciones espaciales de albedo o brillo de la imagen.

La transformación entre ambos espacios de color (RGB-HLS) está fundamentado por las siguientes expresiones, (Chuvieco, 2008):

$$\text{Tono, } H = \tan^{-1} \left(\frac{2DN_{Azul} - DN_{Verde} + DN_{Rojo}}{\sqrt{3}(DN_{Verde} - DN_{Rojo})} \right) + C \quad \begin{array}{l} C = 0, \text{ si } DN_{Verde} \geq DN_{Rojo} \\ C = \pi, \text{ si } DN_{Verde} < DN_{Rojo} \end{array} \quad (4.14)$$

$$\text{Luminosidad, } L = \frac{DN_{Rojo} + DN_{Verde} + DN_{Azul}}{3} \quad (4.15)$$

$$\text{Saturación, } S = \frac{\sqrt{6}}{3} \sqrt{DN_{Azul}^2 + DN_{Verde}^2 + DN_{Rojo}^2 - DN_{Azul}DN_{Verde} - DN_{Azul}DN_{Rojo} - DN_{Verde}DN_{Rojo}} \quad (4.16)$$

El uso de esta transformación para fusionar imágenes se debe a que HLS logra desacoplar la información espectral de una composición RGB en las componentes H y S, y aíslan en la componente L que contiene gran parte de la información espacial y el brillo (Pohl y Van Genderen, 1998).

Antes de realizar la transformación se debe hacer la georreferenciación de las imágenes para que se acoplen correctamente. La transformación HLS se aplica siempre a composiciones RGB por lo que la fusión sólo se podrá realizar para tres bandas RGB de la imagen multispectral. El resultado de esta transformación genera nuevas imágenes de H, L y S, (fig. 4.2a). La componente de luminosidad (L) se sustituye por la imagen pancromática (con mayor resolución espacial y brillo) cuyo histograma previamente se ha igualado al de la imagen L, con el propósito de minimizar la distorsión espectral en la imagen fusionada. Posteriormente se realiza la transformación HLS inversa para volver al espacio de color RGB y obtener la imagen fusionada, a la que se ha incorporado el detalle espacial y el brillo de la imagen pancromática.

4.4.2 MÉTODO PCA

La mayor parte de los sensores multispectrales detectan la información de bandas muy cercanas del espectro electromagnético por lo que es común registrar información redundante, debido a que muchas cubiertas de la superficie terrestre tienden a mostrar comportamientos o reflectancias similares en regiones próximas del espectro. En este contexto, el método estadístico de componentes principales (PCA), que se detallará más adelante, permite sintetizar las bandas originales

generando nuevas bandas no correlacionadas, llamadas componentes principales (PC), que recogen y reorganizan la información original.

En general, la primera componente principal (PC1) reúne la información común a todas las bandas utilizadas, es decir, la información espacial y el brillo, mientras que la información espectral de cada una de las bandas originales se reparte en el resto de componentes principales (Chavez y Kwarteng, 1989). Esto hace que el método PCA sea una técnica muy apropiada para la fusión de imágenes multispectrales y pancromáticas.

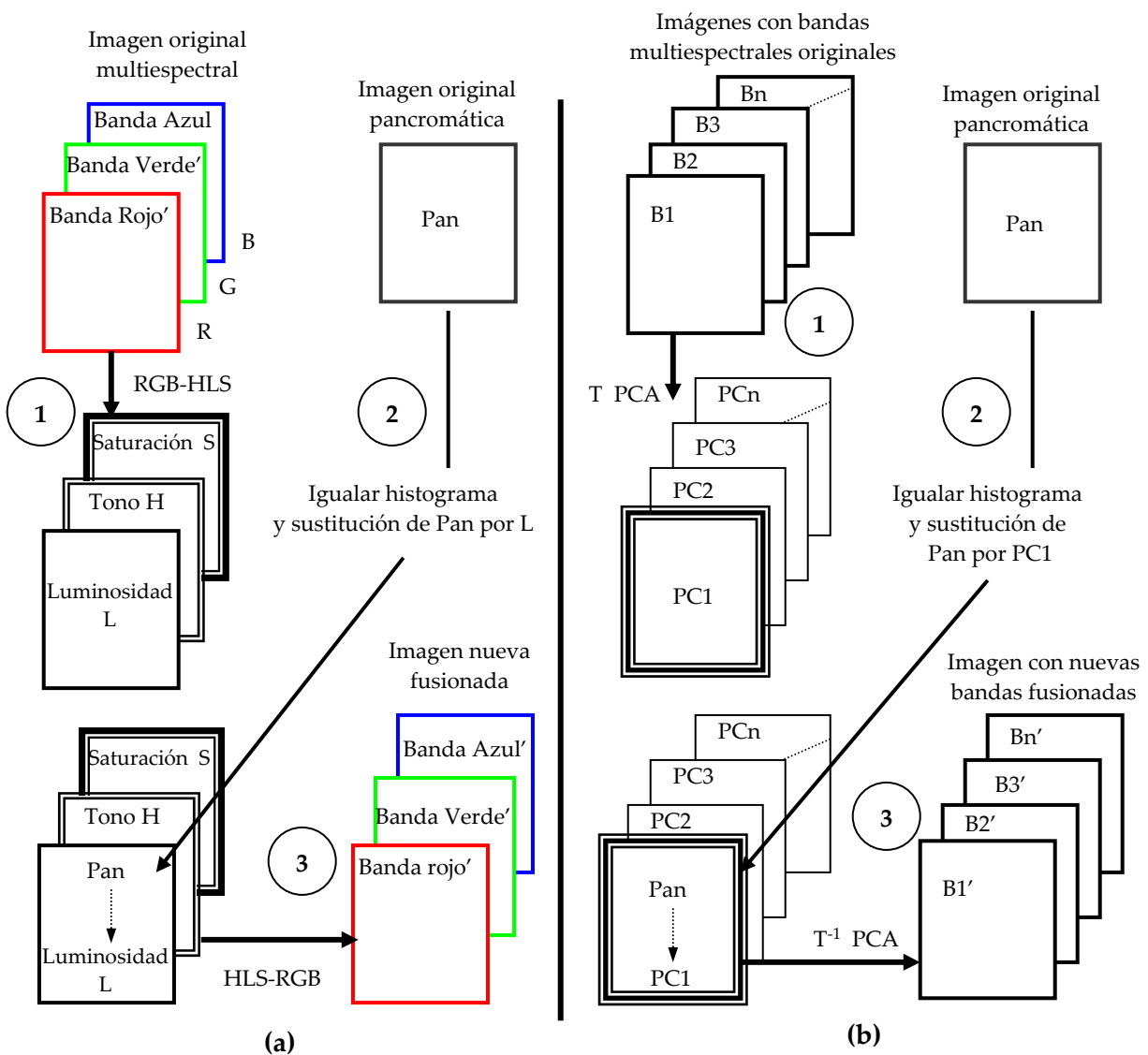


Figura 4.2. Métodos de fusión de imágenes por HLS y PCA.

Las bandas de la imagen multiespectral original constituyen los datos de entrada, posteriormente se aplica el análisis de los componentes principales (PCA) para obtener nuevas bandas, no correlacionadas entre sí, los componentes principales (PC1, PC2, PC3, PC4...). La primera componente (PC1) es reemplazada por la imagen pancromática con mayor detalle espacial y brillo, cuyo histograma previamente se ha igualado al de PC1. Posteriormente, se aplica la transformación PCA inversa (PCA^{-1}) al conjunto de bandas (PC1, PC2, PC3, PC4...), obteniéndose las nuevas bandas fusionadas a las que se ha incorporado el detalle espacial y el brillo de la imagen pancromática, (fig.4.2b).

El uso de los métodos de fusión HLS y PCA permiten descomponer la información espectral y espacial de las imágenes multiespectrales a las que se aplican. Sin embargo, esta hipótesis no se cumple de forma absoluta, debido a que las componentes tono, saturación y las PC2 al PCn tienen asociada información espacial, del mismo modo que las imágenes intensidad y la PC1 siempre llevan asociada cierta información espectral. Por ello, y para minimizar esta desventaja es deseable que las imágenes, multiespectral y pancromática, hayan sido adquiridas en las mismas fechas.

4.5 ANÁLISIS DE LAS COMPONENTES PRINCIPALES (PCA)

El análisis por las componentes principales (PCA) es una técnica estadística muy utilizada en las ciencias sociales y naturales. Su objetivo es extraer la información de un grupo de variables en un nuevo grupo, más pequeño y fácil de analizar, sin perder parte importante de esa información.

Generalmente la información de algunas bandas de imágenes multiespectrales presenta una alta correlación entre ellas, es decir contienen mucha información redundante que no aporta nueva información e incrementa en gran medida el tiempo de procesamiento. Por ejemplo, en las bandas de *Landsat ETM+* se observa una alta correlación entre TM1/TM2, TM2/TM3 y una menor entre TM3/TM4.

Las componentes principales se basan en combinaciones lineales no correlacionadas de un conjunto de imágenes, de tal modo que cada combinación obtenida sucesivamente, llamada componente principal, tiene una varianza más pequeña. Este procedimiento permite comprimir la información de varias bandas en dos o tres componentes principales para su análisis, llamadas PC1, PC2 y PC3, que son las que tienen el mayor porcentaje de la información de un conjunto de datos. La transformación PCA en ocasiones puede aportar información que es más fácil de interpretar que los datos originales (Jensen, 1996).

La combinación lineal entre dos bandas de puede expresar como:

$$\begin{aligned}
 PC1 &= a_{11}DN_i + a_{12}DN_j + a_{13}DN_K \\
 PC2 &= a_{21}DN_i + a_{22}DN_j + a_{23}DN_K \\
 PC3 &= a_{31}DN_i + a_{32}DN_j + a_{33}DN_K
 \end{aligned}
 \tag{4.17}$$

en donde los valores de PC1, PC2 y PC3, son los valores de las componentes principales 1, 2 y 3, obtenidas a partir de los DN originales de las bandas i, j y k , tras aplicarles unos determinados coeficientes $a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{21}, a_{22}, a_{23}, a_{31}, a_{32}, a_{33}$.

Esta transformación no es más que una rotación y/o traslación en el espacio espectral n-dimensional de los valores de los píxeles, y el ángulo de rotación está en función de la correlación entre los valores de DN_i, DN_j y DN_k . El eje PC1 es la dirección de la primera componente principal, y el eje PC2 la dirección de la segunda componente principal y así sucesivamente.

Las componentes principales de tres bandas están establecidas por un sistema de combinaciones lineales de dichas bandas, que con los coeficientes a_{ij} correctos resultarán independientes y no correlacionadas entre sí. Los valores de los píxeles graficados en el espacio n-dimensional DN_i, DN_j y DN_k están notoriamente correlacionados. Después de una adecuada combinación lineal la correlación es removida. Desde el punto de vista geométrico esta transformación puede observarse mejor en la figura 4.3, en donde hay una correlación positiva entre las bandas i, j y k con los ejes PC1, PC2 y PC3, agrupadas dentro del elipsoide, después de hacer una rotación y/o traslación adecuada, los ejes quedan ortogonales perdiéndose la correlación entre ellos y haciendo más evidentes las diferencias entre las componentes, de esta forma la información que contienen es más específica y con ello es posible una identificación más certera de las distintas cubiertas. El primer eje (PC1) está asociado con la máxima varianza (el eje mayor del elipsoide n-dimensional en el espacio espectral). El segundo eje (PC2 y ortogonal al primero) contiene la segunda varianza más grande, y así sucesivamente.

Cuando se utilizan más de 3 bandas, la figura resultante es un hiperelipsoide de revolución, gráficamente no se puede representar, solamente matemáticamente se puede hacer el análisis con la matriz de covarianza entre las bandas y las componentes principales.

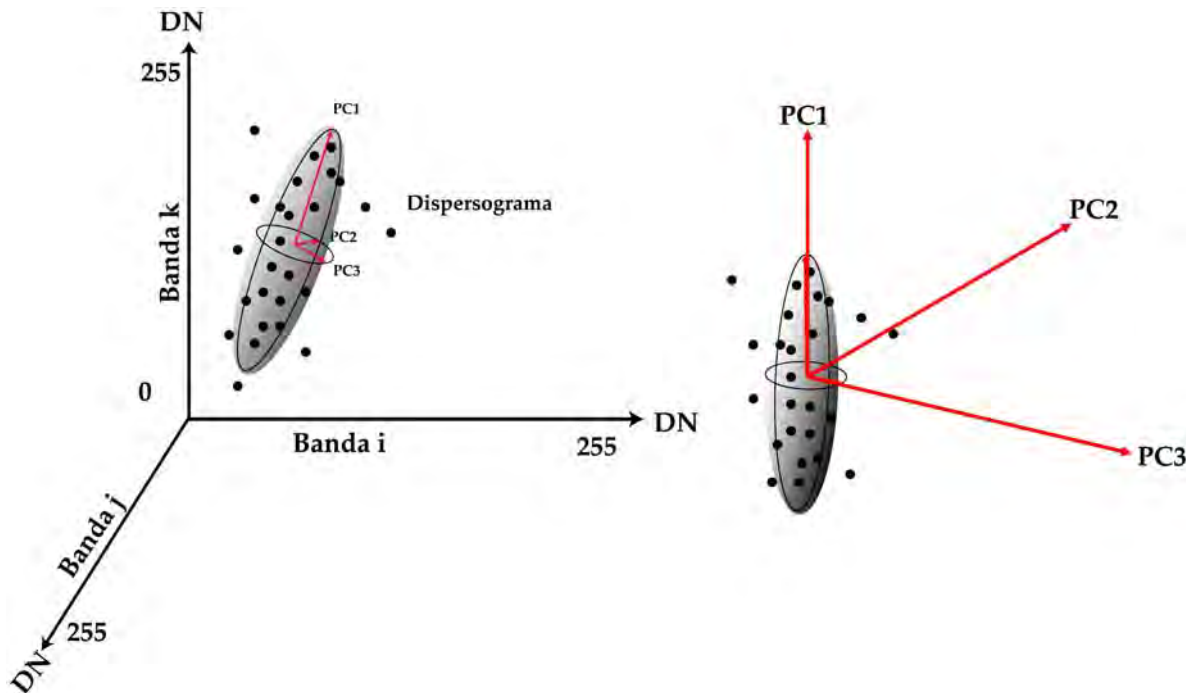


Figura 4.3. Representación gráfica del método de las componentes principales (PCA).

En términos generales, las componentes principales de una imagen se obtienen como:

$$PC_j = \sum_{i=1,p} a_{i,j} DN_i + R_j, \quad j = 1, \dots, p \quad (4.18)$$

En donde PC_j es el DN correspondiente a la componente principal j , $a_{i,j}$ son los coeficientes aplicados al DN de la banda i para generar la componente j y R_j es una constante para desplazar el origen y evitar valores negativos, (Chuvieco, 2008).

Una vez obtenidas las componentes principales se pueden representar con una composición de color que enfatice de la cobertura y el tipo de información que se requiere para el estudio. La componente PC1 representa la mayor parte de la información y es la contribución de todas las bandas al albedo o brillo, PC2 puede representar, por ejemplo, el grado de desarrollo de las plantas, por su parte PC3 puede representar alguna otra variable menos evidente y las demás componentes suelen representar menos información hasta ser prácticamente el ruido de las todas las bandas.

4.6 TRANSFORMACIÓN TASSELED CAP

La transformación *Tasseled Cap* (TTC) es similar al PCA dirigida a obtener nuevas bandas por combinación lineal de la originales, similar al análisis de componentes principales (PCA), la diferencia radica en que TTC está dirigida a obtener componentes con un significado físico preciso, independientemente de la imagen que se analice.

La transformación *Tasseled Cap* fue desarrollada por (Kauth y Thomas, 1976) y planeada para que los ejes transformados maximicen información de importancia en la agricultura, es decir tienen un significado físico. A partir de una serie de imágenes de campos agrícolas el departamento de agricultura de EEUU trató de resaltar los ejes de variación espectral de los cultivos en una gráfica 3D de aspecto similar a un gorro de borla (*Tasseled Cap*). Esta transformación, permite enfatizar espectralmente los fenómenos más importantes que ocurren durante el desarrollo de la vegetación.

La TTC pone más en evidencia el comportamiento espectral de la vegetación y el suelo con la creación de nuevos ejes más ajustados a esos espacios físicos. Los nuevos ejes tratan de que sea más nítida la separación entre ambas cubiertas.

La TTC aplicada a las seis bandas TM (excepto la térmica) de *Landsat*, supone pasar de las 6 bandas de *Landsat* a 3 bandas que representan el brillo de la imagen (albedo), el verdor y la humedad. Estas nuevas bandas se obtienen mediante:

1. Brillantez: está asociada a las diferencias de reflectancia del suelo.

$$\text{brillo} = \sum_{k=1}^6 C_{kb} \text{Banda}_k \quad (4.19)$$

2. Verdor: es un indicador del vigor y desarrollo de las plantas.

$$\text{verdor} = \sum_{k=1}^6 C_{kv} \text{Banda}_k \quad (4.20)$$

3. Humedad: está en función de las bandas en el infrarrojo cercano y es un indicador de la humedad de las plantas y del suelo.

$$\text{humedad} = \sum_{k=1}^6 C_{kh} \text{Banda}_k \quad (4.21)$$

En donde C_{kb} , C_{kv} , y C_{kh} son los vectores con los coeficientes de transformación para cada banda. La tabla 4.1 muestra los coeficientes de transformación para *Landsat ETM+*.

Index	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 7
Brightness	0.3561	0.3972	0.3904	0.6966	0.2286	0.1596
Greenness	-0.3344	-0.3544	-0.4556	0.6966	-0.0242	-0.2630
Wetness	0.2626	0.2141	0.0926	0.0656	-0.7629	-0.5388
Fourth	0.0805	-0.0498	0.1950	-0.1327	0.5752	-0.7775
Fifth	-0.7252	-0.0202	0.6683	0.0631	-0.1494	-0.0274
Sixth	0.4000	-0.8172	0.3832	0.0602	-0.1095	0.0985

Fuente USGS

Tabla 4.1. Coeficientes *Tasseled Cap* para el *Landsat ETM+*, (*United States Geological Survey*).

Considerando la banda roja (banda 3) y la infrarroja (banda 4), la base del gorro se define por la línea de suelos, en donde se encuentran los distintos tipos de suelos, de acuerdo a su brillo y color (fig. 4.4). Conforme la vegetación va ganando más vigor, se va separando de la línea del suelo, acercándose a la banda infrarroja, y llegando hasta un punto máximo, donde alcanza la madurez. A partir de este punto la vegetación empieza a marchitarse, regresando a la línea de los suelo.

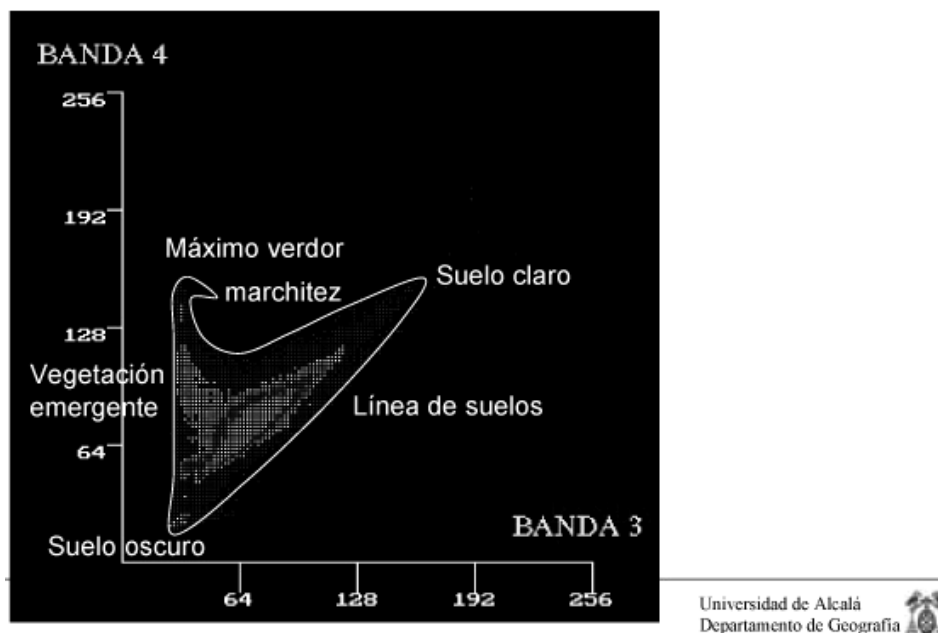


Figura 4.4. Representación del espacio espectral en la transformación *Tasseled Cap*.

Para QuickBird los coeficientes para TCT fueron obtenidos a partir obtenidos a través del proceso de ortogonalización de Gram-Schmidt, en el trabajo publicado por Yarbrough Lance D. et al. (2005) se expone el desarrollo de esta metodología.

Las fórmulas de transformación para obtener el brillo, verdor y humedad para este sensor son:

$$\text{brillo} = 0.319\text{DN}_{\text{Azul}} + 0.542\text{DN}_{\text{Verde}} + 0.490\text{DN}_{\text{Rojo}} + 0.604\text{DN}_{\text{Infrarrojo}} \quad (4.22)$$

$$\text{verdor} = -0.121\text{DN}_{\text{Azul}} - 0.331\text{DN}_{\text{Verde}} - 0.517\text{DN}_{\text{Rojo}} + 0.780\text{DN}_{\text{Infrarrojo}} \quad (4.23)$$

$$\text{humedad} = 0.652\text{DN}_{\text{Azul}} + 0.375\text{DN}_{\text{Verde}} - 0.639\text{DN}_{\text{Rojo}} - 0.163\text{DN}_{\text{Infrarrojo}} \quad (4.24)$$

$$\text{No especificado} = 0.677\text{DN}_{\text{Azul}} - 0.675\text{DN}_{\text{Verde}} + 0.292\text{DN}_{\text{Rojo}} + 0.011\text{DN}_{\text{Infrarrojo}} \quad (4.25)$$

En este trabajo, las transformaciones *HLS*, *Tasseled Cap* y *PCA* se adoptaron para la extraer y enfatizar indicios espectrales en el suelo y la vegetación que puedan vincularse con antiguas transformaciones humanas del paisaje y con la presencia de vestigios arqueológicos bajo la superficie del suelo.

4.7 COCIENTES E ÍNDICES DE VEGETACIÓN

Los cocientes son un procedimiento que se realiza píxel a píxel entre los DN de dos bandas distintas. Son utilizados ampliamente en la percepción remota para enfatizar las diferencias entre dos bandas con un comportamiento espectral distinto, por ejemplo entre el visible y el infrarrojo. También para se emplea para reducir el efecto del sombreado por efectos topográficos. En la percepción remota aplicada a estudios arqueológicos podría ser utilizado provechosamente para ubicar indirectamente yacimientos arqueológicos que influyeran en la composición del suelo y en desarrollo de la vegetación.

El uso de los cocientes para diferenciar las masas vegetales se deriva del comportamiento espectral de la vegetación. La vegetación sana muestra un alto contraste entre la banda del visible (0.4-0.7 μm), especialmente en la banda del rojo (0.6-0.7 μm), con el infrarrojo cercano (NIR, 0.7-1.1 μm). Cuando la vegetación esta sometida a algún tipo de estrés, debido a sequías, nutrientes escasos, plagas, etc., su reflectancia será menor en la banda del infrarrojo cercano (NIR), aumentando en el rojo (debido a menor cantidad de clorofila), por lo que el contraste entre estas bandas será mucho menor. Dicho de otra forma, la diferencia de reflectancias entre las bandas rojo y NIR será mayor cuanto más vigor posea la cubierta vegetal observada. Bajos contrastes indican una vegetación estresada, senescente o enferma, hasta llegar a la línea de los suelos o el agua con reflectancias similares en el rojo y NIR, (fig. 4.5).

Este es uno de los principios en los que se basan los índices de vegetación, uno de los más importantes fue propuesto por Rouse et al (1974):

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Rojo}}{\rho_{NIR} + \rho_{Rojo}} \quad (4.26)$$

en donde ρ_i es la reflectancia en para la banda en el rojo e infrarrojo

NDVI varía entre los márgenes de (-1 a +1) y de esta forma facilita la interpretación. Por ejemplo, el umbral crítico de NDVI para la vegetación está en el orden de 0.1, mientras que para la vegetación densa entre 0.5 y 0.7, (Holben,1986).

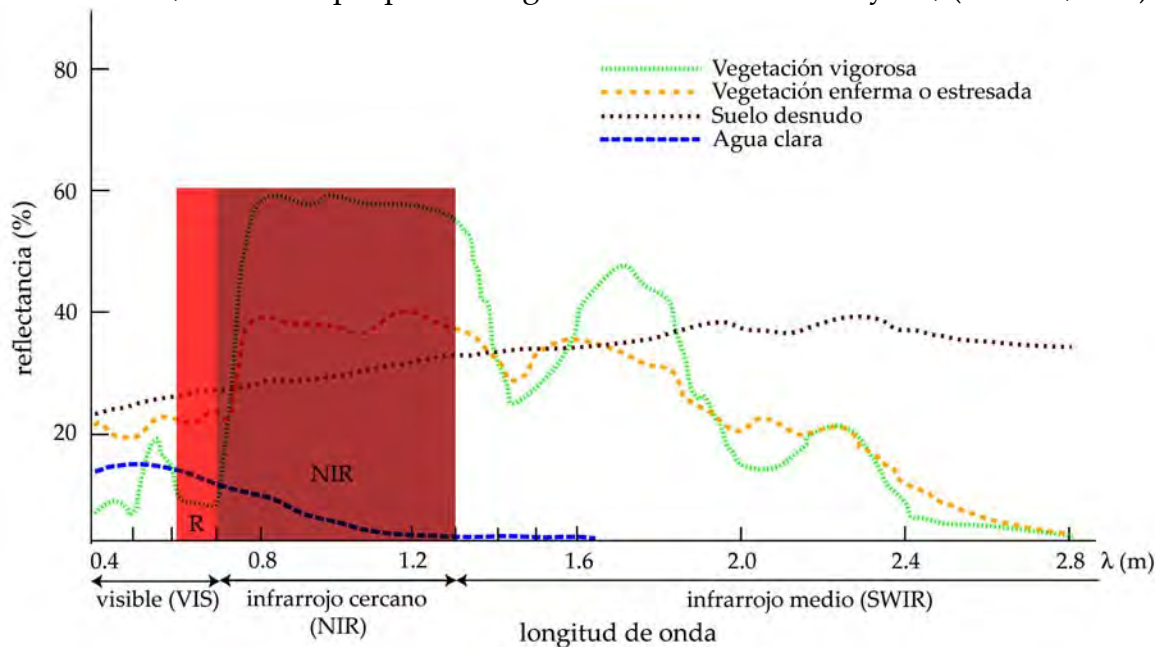


Figura 4.5. Contraste espectral entre la vegetación vigorosa y la estresada.

Los factores que modifican en gran medida el valor de NDVI es el porcentaje de radiación registrada del suelo. Los mismos valores de NDVI pueden corresponder con cubiertas vegetales vigorosas pero poco densas, o al contrario, con cubiertas densas y poco vigorosas. Algunos autores como (Huete, et al, 1992) propusieron incluir el factor suelo en el índice NDVI cuando se trabaja en zonas áridas e incluyeron en la fórmula de NDVI el parámetro (L) para ajustar el índice de reflectancia promedio del suelo. Por lo que creó el índice de vegetación ajustado al suelo SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index).

$$SAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Rojo}}{\rho_{NIR} + \rho_{Rojo} + L} (1 + L) \quad (4.27)$$

en donde L es una constante para ajustar la línea de vegetación-suelo al origen.

Algunos autores como Huete (1992) proponen un valor en torno a 0.5, las pruebas experimentales han demostrado que SAVI reduce sustancialmente las variaciones inducidas por el suelo en comparación con el NDVI y otros índices, en zonas con grandes áreas descubiertas.

Otro índice más robusto creado por Huete (2002) para tomar en cuenta el suelo y las influencias atmosféricas fue el EVI (*Enhanced vegetation index*) y está definido como:

$$EVI = 2.5 \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Rojo}}{\rho_{NIR} + 6\rho_{Rojo} - 7.5\rho_{Azul} + L}, \text{ con } L = 1 \quad (4.28)$$

El valor de EVI varía también entre -1 y +1, y para las cubiertas vegetales de estresadas a vigorosas está de 0.2 a 0.8.

Existen gran variedad de índices creados para objetivos específicos de la vegetación y para cubiertas no vegetales, sin embargo, para este trabajo se consideran sólo los que puedan comparar las respuestas de la vegetación y el suelo de *Landsat*, *Spot* o *QuickBird*.

4.8 CLASIFICACIÓN DE LAS IMÁGENES

Muchas de la técnicas de procesamiento y realce digital de la imágenes se orientan como fase culminante en la clasificación de la imágenes. Con la clasificación se pueden obtener productos asociados con ciertas categorías dependientes del objeto de estudio. En esta fase el DN, asociado a cada píxel, posee una etiqueta que lo identifica dentro de una categoría, con esto se pueden crear imágenes temáticas con su inventario estadístico. La clasificación para los objetivos de este estudio es muy útil para obtener categorías de tipos de vegetación y suelos que se relacionen indirectamente con la presencia de vestigios y con modificaciones al paisaje.

La clasificación digital no tiene como objetivo una clasificación absoluta de las cubiertas analizadas, sino una caracterización relativa, que es válida para una determinada imagen y una investigación concreta. En este contexto, no se persigue establecer modelos entre medidas digitales y propiedades físicas, mas bien, se busca que las medidas digitales de un sensor, para una fecha y una zona determinada, estén asociados con tipos de cubiertas. De esta forma, la clasificación

tiene un enfoque más cualitativo aunque mucho de lo que incorpora tiene un carácter estadístico importante. Es por esto que la clasificación puede ser hecha con valores de DN originales, radiancia o reflectancia. Es importante mencionar que aunque la imagen clasificada posee valores digitales, no es conveniente utilizarla para hacer operaciones numéricas entre las clases ya que son resultado de un análisis semicuantitativo. En consecuencia las clases pueden describir distintos tipos de cubiertas (llamada variable nominal o categórica), o también intervalos dentro de la misma categoría de interés (variable ordinal), (Chuvienco, 2008).

La clasificación en general sigue los criterios que se utilizan en la fotointerpretación. En primer lugar se identifica los patrones visuales asociados a cada cubierta, de acuerdo a los criterios que el analista establezca, por ejemplo: textura, tono, forma, disposición, contexto, etc., posteriormente se establece cuales de las coberturas se ajustan a estos criterios, en función de la semejanza con el patrón tipo identificado previamente. Finalmente se realiza la verificación sobre el terreno en algunos puntos para darle validez a la clasificación.

Para que las imágenes puedan ser clasificadas se debe hacer un trabajo previo que permita identificar cada categoría en base a sus rasgos como el tono, la textura, etc., para esto se debe tener una fase de entrenamiento, que consiste en seleccionar aquellos pixeles representativos de las categorías de interés. Con estos pixeles se puede calcular los DN medios y la variabilidad numérica de las categorías que se incluyen en la clasificación. La adecuada selección de los polígonos para cada clase es vital para obtener estimaciones adecuadas para la clasificación de interés.

Los polígonos de entrenamiento son muy importantes para los métodos de clasificación, que se dividen en dos grupos: el supervisado y el no supervisado. El método supervisado se basa en un conocimiento previo del terreno, a partir del cual se eligen los pixeles para cada una de las categorías. Por otra parte, el método no supervisado se realiza con la búsqueda automática de valores similares dentro de la imagen, con una mínima intervención del usuario.

4.8.1. MÉTODO NO SUPERVISADO

El método no supervisado fue creado para definir las clases espectrales de la imagen. No requiere de ningún conocimiento previo de la zona de estudio, por lo que la intervención del usuario se enfoca más en la interpretación de los resultados. En este método se asume que cada DN de la imagen pertenece a un grupo o conglomerado (cluster) de propiedades similares, con un comportamiento

espectral homogéneo que definen diversas clases temáticas. Desafortunadamente estas categorías espectrales no siempre pueden equipararse a las clases de información que el usuario pretende clasificar, entonces el usuario debe interpretar y darle sentido temático a las categorías.

La delimitación de cada grupo en el espacio espectral se inicia tomando en cuenta dos criterios: el primero mide la similitud entre píxeles y el segundo marca las condiciones del proceso de agrupamiento. Para el primer aspecto se ha propuesto medir la distancia euclidiana entre los píxeles:

$$\overline{AB} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (DN_{A,k} - DN_{B,k})^2} \quad (4.29)$$

en donde \overline{AB} es la distancia entre los píxeles A y B

$DN_{A,k}$ y $DN_{B,k}$, son los valores de los píxeles A y B en la banda k.

m es el número de bandas

Para el segundo criterio, el algoritmo de agrupamiento, se emplea uno de los métodos más utilizados llamado el ISODATA. El método sigue una serie de pasos para clasificar:

1. Se colocan al azar en el espacio espectral una serie de centros de grupos.
2. Los píxeles son asignados a su grupo más cercano.
3. Se calculan de nuevo los centros de los grupos teniendo en cuenta los valores de todos los píxeles que se hayan incorporado.
4. Se vuelven a asignar todos los píxeles de la imagen al centro más cercano, el cual debido al desplazamiento de la etapa anterior no coincidiría con la anterior asignación realizada.
5. Repetir 2 y 3 hasta que el centro del grupo no se desplace significativamente.
6. Combinar los grupos si los centros están muy cercanos.
7. Dividir los grupos con cuando la desviación estándar sea muy grande en cualquier dimensión.
8. Eliminar los grupos que tengan pocos píxeles.
9. Luego reclasificar cada píxel y repetir.
10. Parar cuando se llegue a un número de iteraciones previamente establecido o al límite de convergencia.
11. Finalmente asignar los grupos espectrales a tipos de clases temáticas.

Gráficamente el proceso se puede resumir en la figura 4.9:

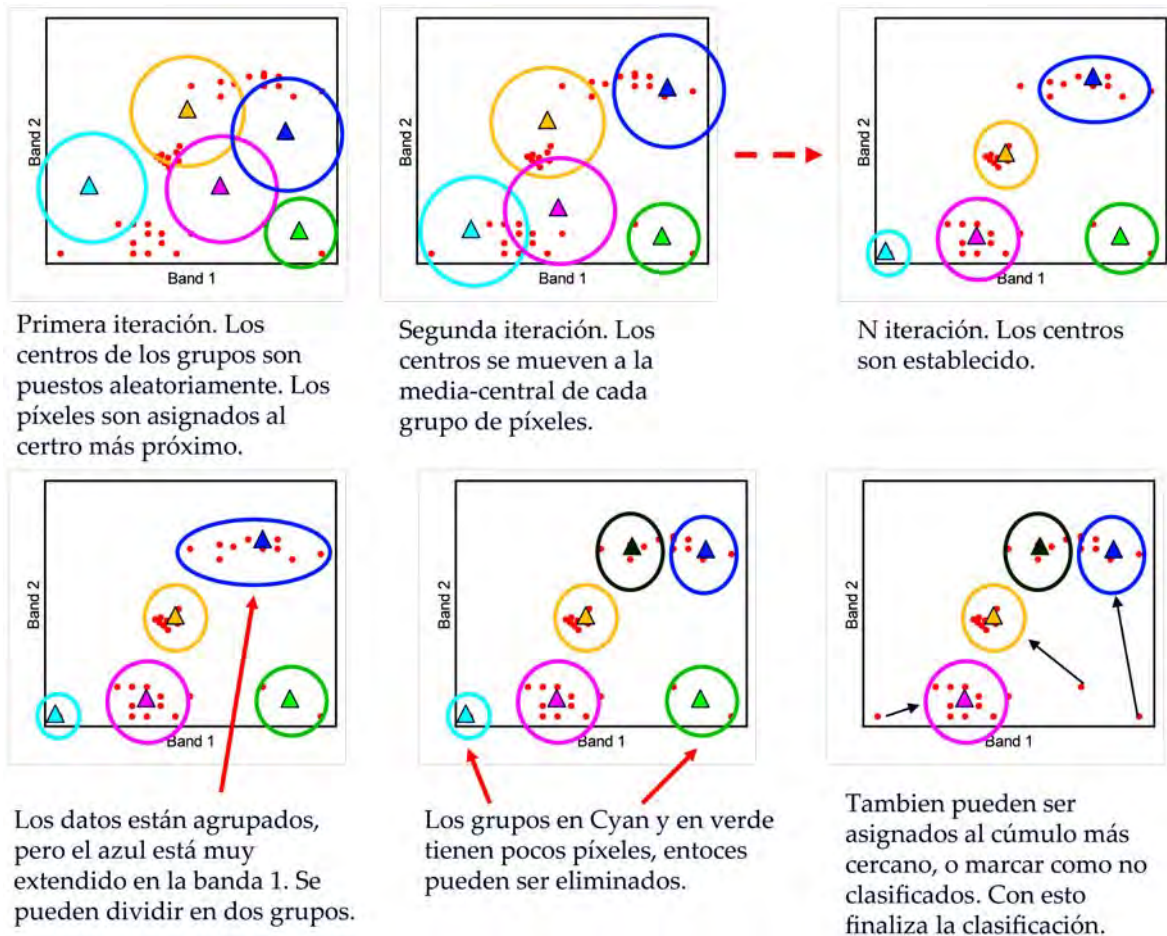


Figura 4.9. Método de clasificación no supervisada utilizando el método *ISODATA*.

4.8.2 MÉTODO SUPERVISADO

El método supervisado requiere de un cierto conocimiento de la zona de estudio. Con este conocimiento el analista puede seleccionar adecuadamente zonas de la imagen que considere representativas de cada categoría. Estas zonas sirven para entrenar al programa de clasificación en el reconocimiento de las distintas categorías. Es decir, es un proceso en que píxeles de identidad conocida, ubicados dentro de las áreas de entrenamiento, se utilizan para clasificar píxeles de identidad desconocida. Se asume que las zonas de entrenamiento son representativas de las distintas categorías, y por lo tanto, las medidas obtenidas a partir de sus DN definen adecuadamente a esas clases. Diversos autores (Jensen,

1996) recomiendan seleccionar un número de píxeles comprendido entre 10 m y 100 m por categoría para una adecuada clasificación. La clasificación supervisada involucra las siguientes etapas:

- Selección de los polígonos de entrenamiento.
- Selección del algoritmo de clasificación adecuado y clasificación.
- Operaciones de post clasificación.

Una vez que se tienen los polígonos de entrenamiento debe tratarse de adjudicar cada uno de los píxeles de la imagen a alguna clase. Entre los algoritmos clásicos para estos fines citemos los siguientes:

- Clasificador por mínima distancia (*Mindist*). Con esta técnica, el píxel se asigna a la clase más cercana, considerando la distancia espectral euclidiana que tiene con los centros de clase de los polígonos de entrenamiento. Un píxel de identidad desconocida, será adjudicado a una clase calculando las distancias euclidianas entre el píxel y el centroide de cada clase. Este clasificador no es muy recomendable para aquellos casos en que las clases espectrales están muy próximas entre sí en el espacio espectral y a la vez tengan elevadas varianzas.

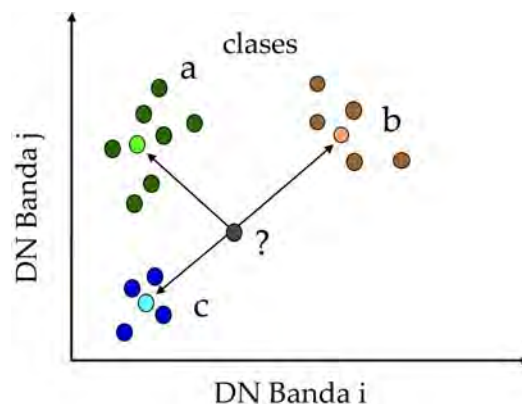


Figura 4.6. Criterio de mínima distancia euclidiana para la clasificación.

- Clasificador por paralelepípedos (*Piped*). Con este método, se selecciona un área de dominio en torno a cada categoría (normalmente considerando su media y desviación estándar). El clasificador se implementa definiendo un subespacio en forma de paralelepípedo o un hiper-rectángulo (para más de 3 clases) para cada clase. Los límites del paralelepípedo quedan definidos por el número de desviaciones estándar para ambos lados de la media del área de entrenamiento. En este caso la regla de decisión es que el píxel de identidad desconocida caiga dentro de alguno de los paralelepípedos para

adjudicarlo a la clase correspondiente. Este clasificador tiene la desventaja de que frecuente hay solapamiento de los paralelepípedos, debido a que un píxel puede caer dentro de más de un paralelepípedo si éstos se solapan. También se da el caso de que no caiga en ninguno, no pudiéndose asignar a ninguna clase.

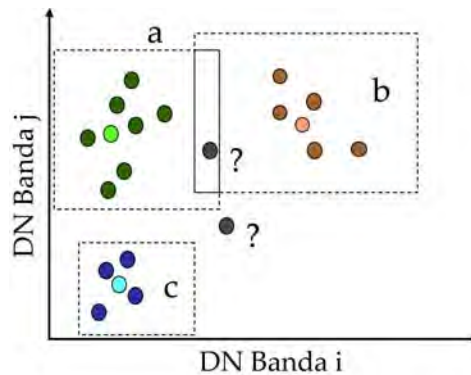


Figura 4.7. Técnica de clasificación por paralelepípedos.

- Clasificador por máxima probabilidad (*Maxlike*). Esta técnica de clasificación parte de considerar la distribución de los DN en distintas categorías como sujetas a una distribución normal, comúnmente la distribución gaussiana para formular sus reglas de decisión en la categorización de los píxeles. En consecuencia, dados los DN de un determinado grupo, puede calcularse la probabilidad de pertenencia a cada una de las clases previamente definidas, asignándose a aquéllas con que cuenta una mayor probabilidad de pertenencia. En general se considera un buen clasificador, y aún mayor si se introduce un criterio bayesiano. Una de sus desventajas es que es lento de cálculo.

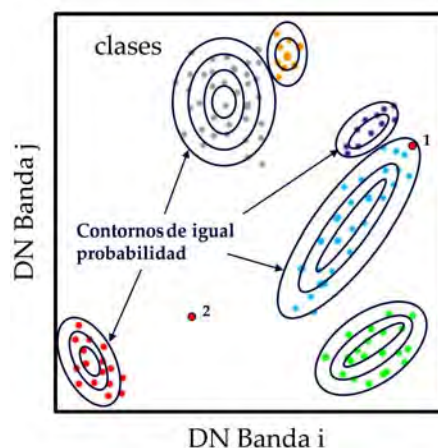
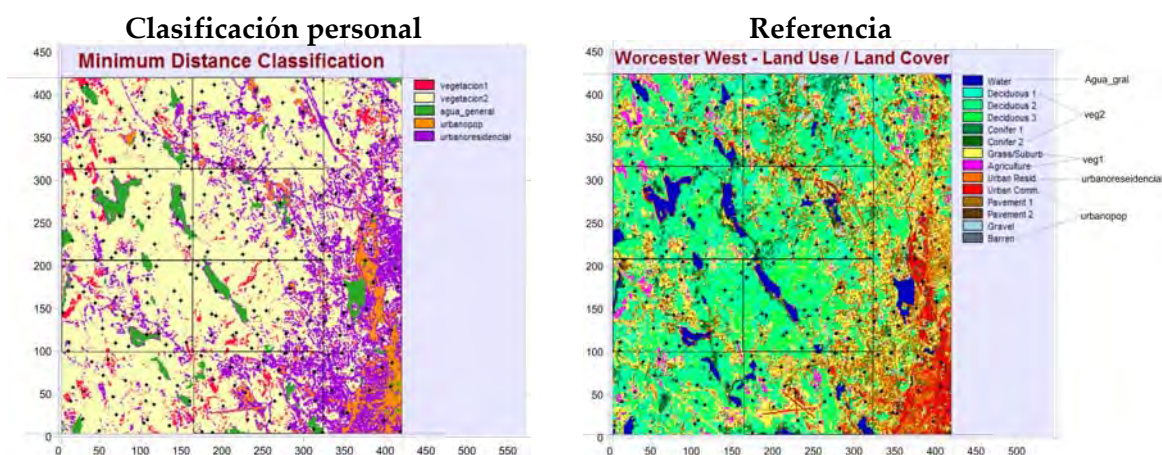


Figura 4.8. Método de clasificación por máxima probabilidad.

4.9. ESTIMACIÓN DE LA EXACTITUD DE LA CLASIFICACION - MATRIZ DE ERROR

El proceso final de la clasificación por cualquier método requiere que se estimen los resultados con los datos reales de campo, ninguna clasificación puede considerarse completa hasta que su grado de exactitud sea evaluado. Este puede definirse como el grado de correspondencia entre las clases asignadas por el clasificador y sus ubicaciones verdaderas en la superficie terrestre recolectadas en el campo o de la información procedente de otras fuentes confiables y consideradas como datos de referencia.



Matriz de error

Personal	Referencia					suma
	Agua gral.	Veg 1	Veg 2	Urbano pop	Urbano pop	
Agua gral.	13					13
Veg 1		8	2		1	11
Veg 2		18	126	3		147
Urbano pop		1		19		20
Urbano res		6	3	18	32	59
					Suma total	250
					Suma diagonal	198
					Aciertos %	79.2
					Errores %	20.8

Figura 4.10. Ejemplo de la evaluación de la matriz de error, (Blancas, 2011).

La herramienta más habitual para evaluar la exactitud de la clasificación es la matriz de error, también llamada matriz de confusión. Consiste en una matriz cuadrada de n x n, donde n es el número de clases. La matriz muestra la relación

entre dos series de datos correspondientes a la zona de estudio. La primera serie corresponde a datos de referencia, adquiridos de observaciones de campo, mapas de vegetación y suelos, interpretación de fotos aéreas y otras fuentes confiables. La segunda corresponde con la clasificación obtenida por el clasificador (*mindist*, *piped*, *maxlike*) para las clases de interés. En la matriz de error generalmente las columnas corresponden a los datos de referencia, mientras que las filas corresponden a las asignaciones del clasificador, (fig.4.10).

A partir de una matriz de error pueden deducirse varios índices relativos a la exactitud de la clasificación. La clasificación ofrece la posibilidad de obtener resultados más confiables para nuestro trabajo, sin embargo requiere que en algunos puntos se haga verificación de campo para reducir el error. La clasificación supervisada exige una gran cantidad de trabajo para llegar a un resultado aceptable, es preferible tener algunos puntos de calibración sobre el terreno y conocer bien el área de estudio para reducir el error en la clasificación.

5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN GEO-ARQUEOLÓGICA DE IMÁGENES LANDSAT ETM+ Y SPOT 5.

Este capítulo se enfoca a la aplicación de distintas técnicas de procesamiento de imágenes para las bandas de *Landsat ETM+ SPOT 5*, y el análisis de sus resultados, para detectar indirectamente la presencia del sitio arqueológico. Las imágenes corresponden a al día 6 de Septiembre del año 2000.

5.1 MATERIALES LANDSAT ETM+

-Imágenes

Para realizar este trabajo se cuenta con las imágenes del sensor *Landsat ETM+*, obtenidas del sitio *Global Land Cover Facility* de la Universidad de Maryland. Las imágenes descargadas de este sitio corresponden con la siguiente clasificación en el catálogo: WRS-2, Path 025, Row 047, 2000-09-06, USGS, Ortho, GLS2000, 207-681, México, los detalles son los siguientes:

Banda	Resolución espectral (μm)	Resolución espacial (m)	Resolución temporal(días)	Resolución radiométrica (bits)	Cobertura Km ² swath
TM1	0.45-0.52 azul	30	16	8	185x172
TM2	0.52-0.60 verde	30			
TM3	0.63-0.69 rojo	30			
TM4	0.77-0.90 infrarrojo	30			
TM5	1.55-1.75 IR medio	30			
TM6	10.4-12.5 IR TÉRMICO	60			
TM7	2.08-2.35 IR medio	30			
TM8	0.52-0.90 pancromática	15			

Tabla 5.1. Datos de las bandas del sensor Landsat ETM.

Adicionalmente *Landsat ETM+* cuenta con dos bandas térmicas (10.40 – 12.50 μm), la TM61 y TM62, de baja y alta ganancia con resolución espacial de 60 m.

- Imagen pancromática aérea.

También se cuenta con una imagen digital aérea proporcionada por la mapoteca del IIA-UNAM de INEGI del año 1997, bloque norte Tlaxcala, zona 18R, R-149, L16, resolución de 3 m.

- La firma espectral de la vegetación y el suelo.

En la firma espectral de la vegetación, figura 5.1, se observa una menor reflectancia en las bandas del visible (azul y rojo), como consecuencia de la absorción de la

radiación por la clorofila en las bandas TM1 (0.45-0.62 μm) y TM3 (0.63-0.69 μm). En la banda TM2 se produce un pico de reflectancia en 0.54 μm , con menor absorción de la radiación por los pigmentos (clorofila) en la banda verde. Este fenómeno es el que da la coloración verde de la mayoría de las plantas. En las plantas existen en menor proporción otros pigmentos como los carotenos y las xantofilias (pigmentos amarillos) y en algunas especies la antocianina (pigmento rojo), que se incrementan en la época de senescencia, cuando la cantidad de clorofila disminuye (Chuvienco, 2008).

En el infrarrojo cercano TM4 se incrementa bruscamente la reflectancia de las plantas, reflejando la mayoría de la energía en esta banda del espectro. Posteriormente la reflectancia vuelve a disminuir en 1.43 μm y nuevamente se incrementa en el infrarrojo medio, TM5, hasta alcanzar un aumento relativo en 1.7 μm . El agua en el interior de las hojas reduce drásticamente la reflectancia en TM7, presentándose un aumento relativo en 2.25 μm . En resumen, las plantas reflejan casi toda la energía en las bandas TM4 y TM5, mientras que en TM1, TM2, TM3 y TM7 hay una fuerte absorción por la clorofila, el agua y por su estructura celular. Para la vegetación estresada o enferma, el comportamiento está muy alejado de lo anteriormente descrito, ver figura 5.1.

En lo que respecta a los suelos, su comportamiento es más uniforme que el de la vegetación, los factores que modifican la reflectancia en las distintas bandas están en función de su composición química, textura, estructura, porosidad, materia orgánica y principalmente el contenido de agua que tiende a disminuir la reflectancia del suelo (ver apartado 2.9).

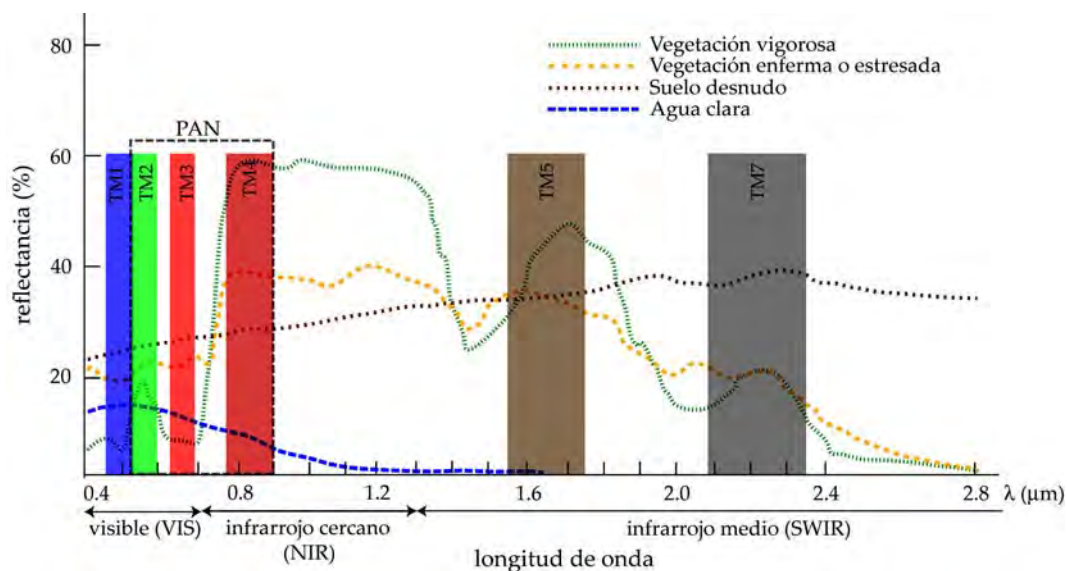


Figura 5.1 Firma espectral de la vegetación vigorosa, estresada, suelo y agua.

5.2 PREPARACIÓN DE LAS IMÁGENES

Al proponer este tema de investigación se pretende utilizar inicialmente las imágenes de los sensores *Landsat ETM+*, sin embargo, no cuenta con la resolución suficiente para reconocer patrones arqueológicos de dimensiones métricas, por otra parte, posee un número suficiente de bandas para obtener más información de la cubierta vegetación-suelo.

Para trabajar con las imágenes adecuadas se propone la técnica de fusión de imágenes para sustituir la imagen pancromática de *Landsat ETM+*, por una imagen aérea digital de la zona de estudio con mayor resolución espacial, y comprobar si existe una mejora en la resolución de las bandas espectrales.

De la imagen original obtenida del catálogo de *Global Land Cover Facility*, con un tamaño de la escena de 185x172 Km, se realizó un recorte para trabajar con el área del norte de Tlaxcala, los pasos para obtener las imágenes de trabajo fueron los siguientes:

- Recorte de las imágenes originales *Landsat ETM+* con el programa *Idrisi Taiga*, fijando una ventana de 3 x 3 Km sobre el área de interés y en puntos que se pudieran reconocer también en la imagen aérea.
- Obtención de las bandas espectrales con coordenadas UTM Z14 WGS84 del recorte hecho a la imagen *Landsat ETM+*. SW c: 2550 r: 935 x: 603105 m y: 2156775 m, NW c: 2550 r: 836 x: 603105 m y: 2159775 m, SE c: 2649 r: 935 x: 606105 m y: 2156775 m, NE c: 2649 r: 836 x: 606105 m y: 2159775 m, (fig. 5.2).
- Apoyándose en las coordenadas UTM de *Landsat* se recortó y georeferenció la imagen aérea utilizando el programa de libre distribución llamado *Multispec v 3.1 de Purdue Research Foundation*.
- Una vez georeferenciada la imagen aérea se importó al programa *Idrisi Taiga* para prepararla para el procesamiento de las bandas multiespectrales de *Landsat*.

5.3. CONVERSIÓN DN-RADIANCIA-REFLECTANCIA-TEMPERATURA

Los DN de la imagen original se convirtieron a variables físicas, siendo esto un paso previo de gran utilidad en las fases de la interpretación de imágenes, ya que permite trabajar con variables físicas de significado estándar, comparables con un mismo sensor a lo largo del tiempo, entre distintos sensores y entre otros métodos de detección de energía electromagnética. Para esto se convirtieron primero los DN originales (fig. 5.2) a radiancia, después a reflectancia al tope de la atmósfera o temperatura (TM61 y TM62) (fig. 5.3), utilizando las fórmulas (4.1), (4.2), (4.6), (4.9), y los parámetros calibración de cada banda del archivo de *metadatos* (ver apéndice 1), los parámetros para conversión a radiancia se presentan en la tabla 5.2, y para la reflectancia en la tabla 5.3.

Banda	L_{MAX}	L_{MIN}	Q_{CALMAX}	Q_{CALMIN}	Gain $\left(\frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{Q_{CALMAX} - Q_{CALMIN}} \right)$	Bias $\left(L_{MIN} - \left(\frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{Q_{CALMAX} - Q_{CALMIN}} \right) Q_{CALMIN} \right)$
TM1	191.60	-6.20	255	1	0.778740157	-6.978740157
TM2	196.50	-6.40	255	1	0.798818898	-7.198818898
TM3	152.90	-5.00	255	1	0.621653543	-5.621653543
TM4	241.10	-5.1	255	1	0.969291339	-6.069291339
TM5	31.06	-1.00	255	1	0.126220472	-1.126220472
TM61	17.04	0.00	255	1	0.067086614	-0.067086614
TM62	12.65	3.20	255	1	0.037204724	3.162795276
TM7	10.8	-0.35	255	1	0.043897638	-0.393897638
TM8	243.1	-4.7	255	1	0.975590551	-5.675590551

Tabla 5.2. Parámetros para el cálculo de la radiancia del sensor *LANDSAT ETM+*.

Banda	Día del año de la adquisición	D Distancia Tierra-Sol (UA)	$E_{0,k}$ Irradiancia espectral solar (watt/m ² μm)	θ_e Ángulo elevación solar (grad)	θ_i Ángulo cenital solar (grad)
TM1	250	1.00775	1997	61.6925476	28.3074524
TM2	250	1.00775	1812	61.6925476	28.3074524
TM3	250	1.00775	1533	61.6925476	28.3074524
TM4	250	1.00775	1039	61.6925476	28.3074524
TM5	250	1.00775	230.8	61.6925476	28.3074524
TM61	250	1.00775	N/A	61.6925476	28.3074524
TM62	250	1.00775	N/A	61.6925476	28.3074524
TM7	250	1.00775	84.9	61.6925476	28.3074524
TM8	250	1.00775	1362	61.6925476	28.3074524

Tabla 5.3. Parámetros para el cálculo de la reflectancia del sensor *LANDSAT ETM+*.

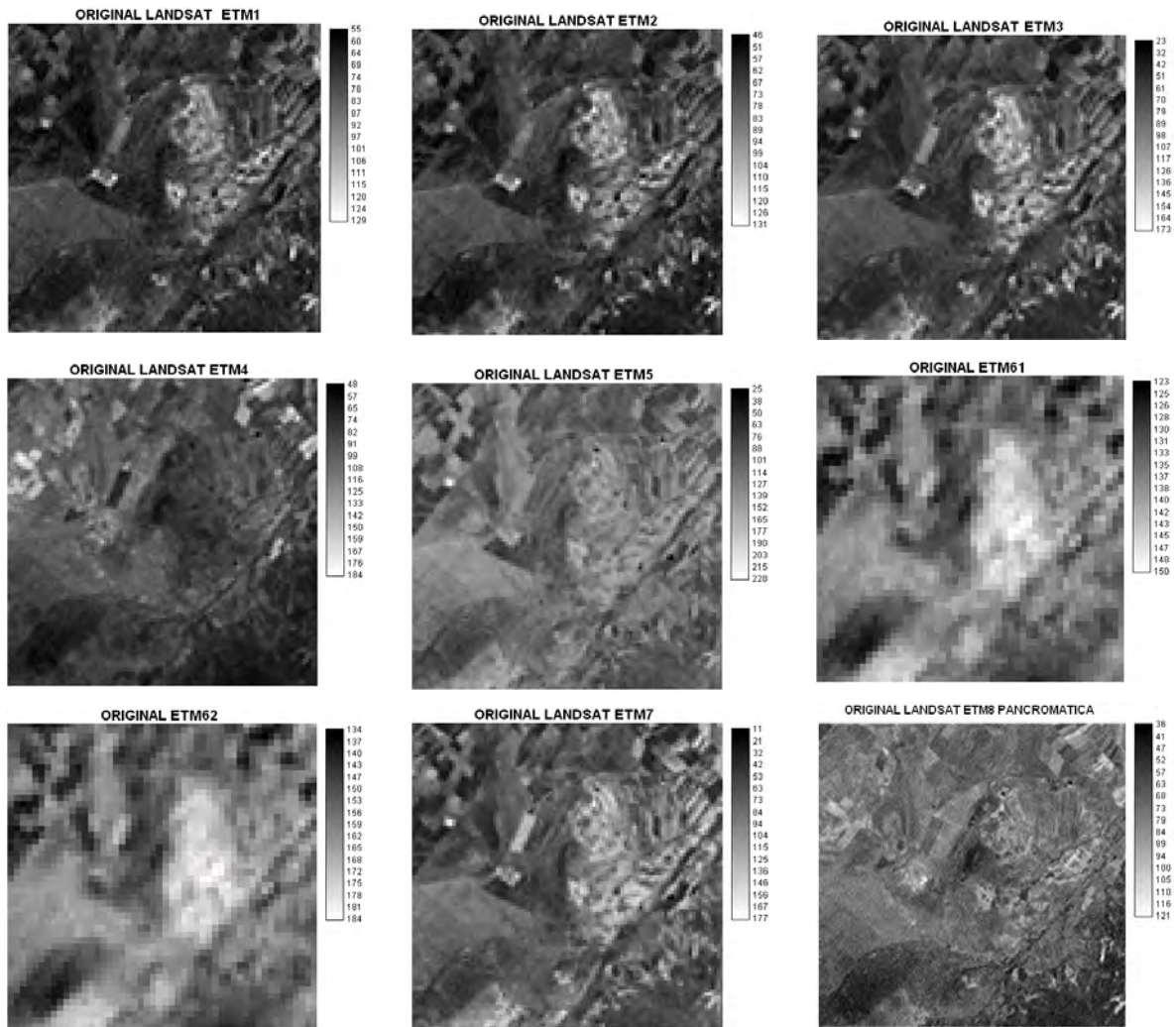


Figura 5.2. Bandas originales, espectrales, térmica y pancromática del sensor Landsat ETM+.

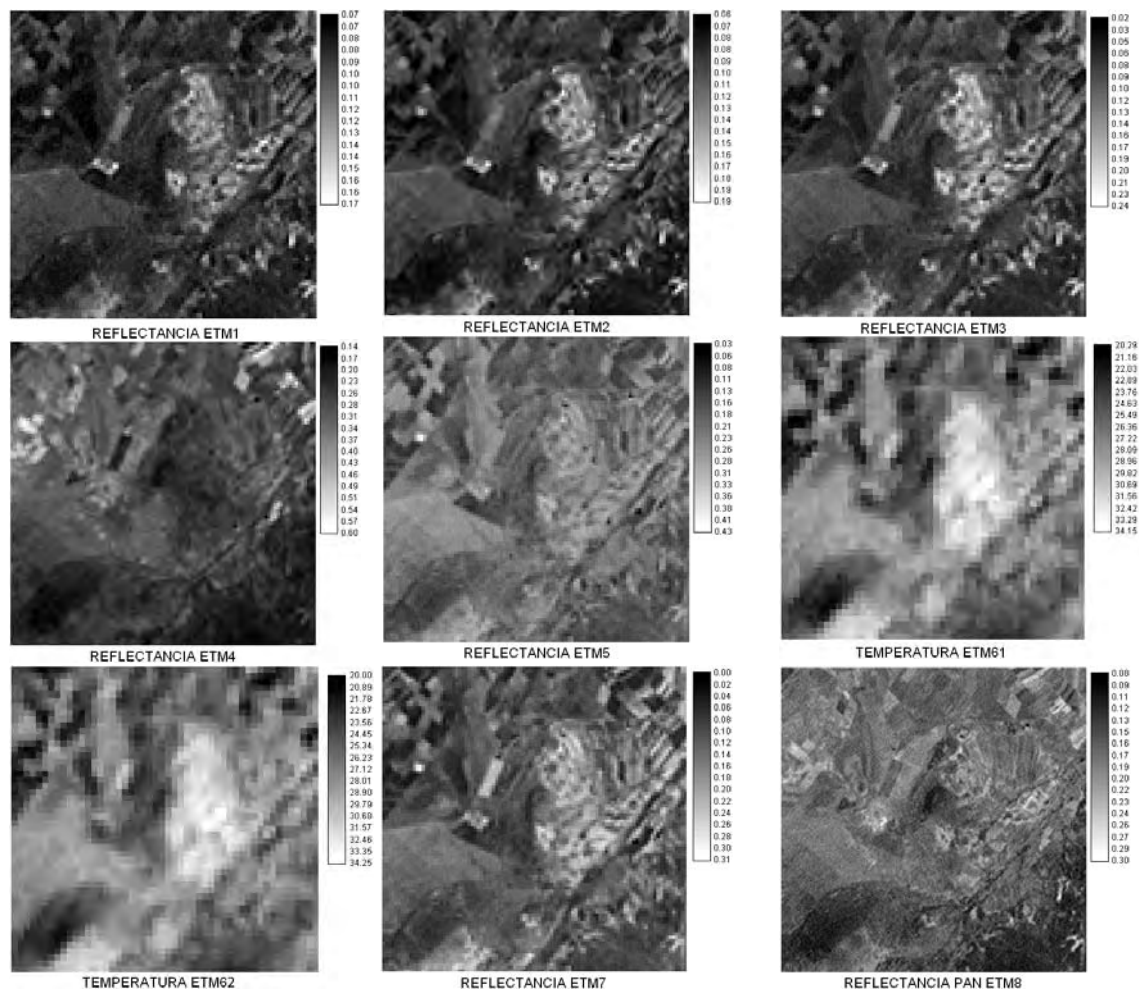


Figura 5.3. Conversión a reflectancia y temperatura a partir de las bandas originales.

5.4 CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA

Un paso muy importante para el análisis de la información es la corrección radiométrica, para esto se corrigieron las imágenes multiespectrales por dispersión atmosférica, empleando el método el método propuesto por Chavez (1996), empleando la fórmula (4.12) y los valores de transmisividad atmosférica incidente $\tau_{k,i} = 0.70$ (TM1), 0.78 (TM2), 0.85 (TM3), 0.91 (TM4), 0.81 (TM8) y 1 para las bandas de SWIR (TM5 y TM7). Como se expuso anteriormente en el apartado (4.2), el método propuesto por Chávez permite estimar la reflectancia de la superficie terrestre a partir de la reflectancia aparente al tope de la atmósfera (TOA).

Para el cálculo se utilizaron los valores mínimos del histograma para cada imagen, que presentaron un valor superior a cero, atribuibles a la dispersión atmosférica

producida por aerosoles y gotas de agua (Chuvieco, 2008). Las imágenes no tienen nubosidad, por lo que la dispersión es principalmente selectiva y debida a la dispersión de Rayleigh y de Mie. Este efecto fue mayor en las longitudes de onda cortas (VIS y PAN, TM1, TM2, TM3 y TM8), menor en el infrarrojo cercano (NIR, TM4) y medio (SWIR, TM5, TM7), y mucho menor en la banda térmica (TIR, TM61, TM62), en donde no se realizó la corrección porque se consideró una atmósfera transparente para simplificar la estimación de la temperatura de la superficie (ver apartado 5.11). Las imágenes corregidas son las siguientes:

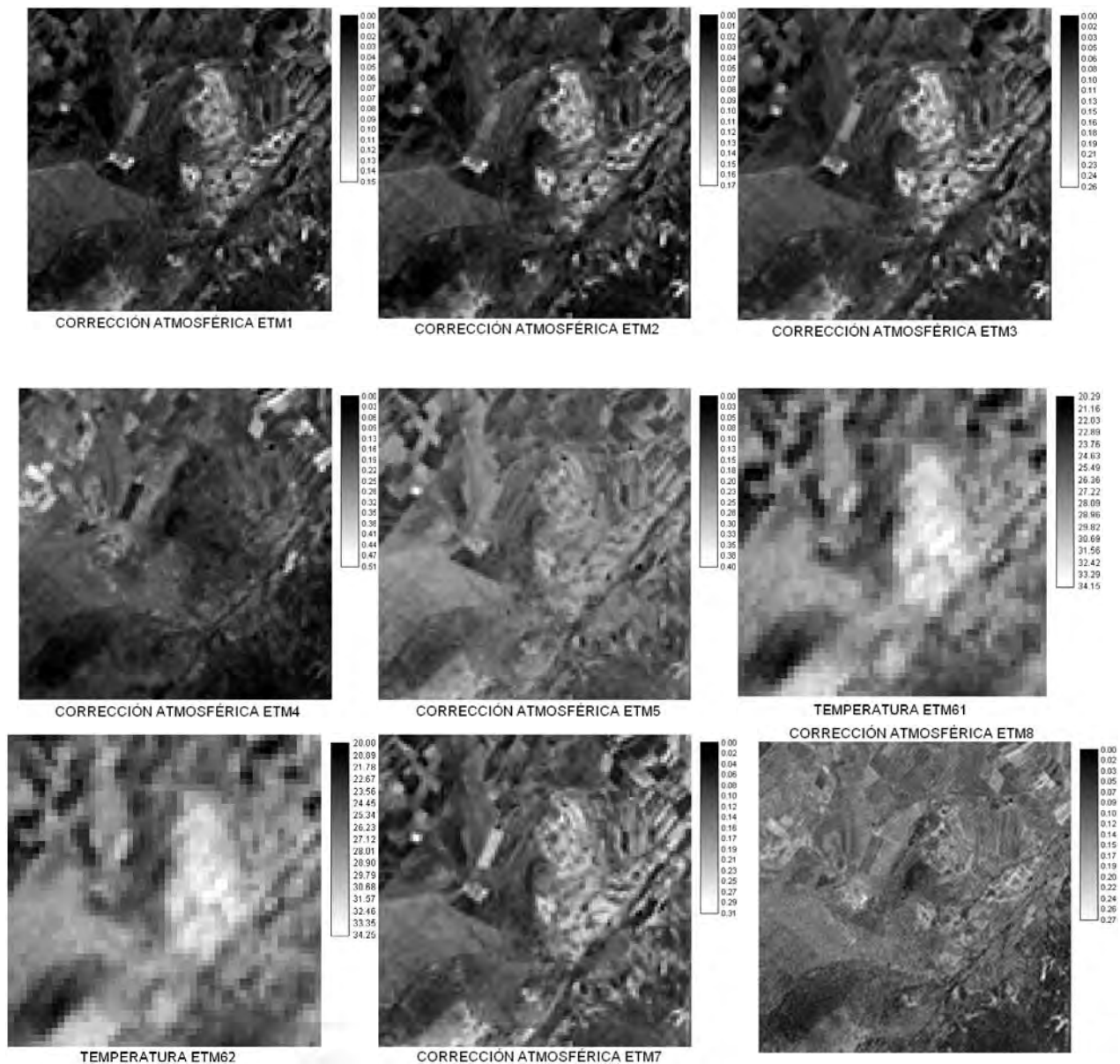


Figura 5.4. Bandas multiespectrales corregidas atmosféricamente por el método de Chavez.

5.5 FUSIÓN DE IMÁGENES LANDSAT ETM+ CON IMAGEN PANCROMÁTICA AÉREA

Con las imágenes multispectrales corregidas atmosféricamente se continuó el pre-procesamiento con la fusión de la imagen pancromática aérea de mejor resolución espacial con las imágenes de *Landsat*. Comparando la imagen pancromática de *Landsat* y la aérea, se aprecia a simple vista, la diferencia en resolución espacial, la primera con 15 m y la otra con 3 m, (fig.5.5). Una alternativa lógica sería utilizar la imagen pancromática de *Landsat* para el proceso de fusión con sus bandas multispectrales, este proceso tiene sus ventajas al reducir mucho la deformación espacial, sin embargo, no sería suficiente para discriminar alteraciones inducidas por vestigios arqueológicos de pequeña escala.

Aunque se desconoce el mes y el día de la toma aérea, para saber si es comparable con la pancromática de *Landsat*, rigurosamente no sería muy representativo este análisis, porque algunos elementos en tierra pudieron haber cambiado, mostrando distinta reflectancia, sin embargo, en las dos imágenes se observa que aparentemente corresponden con fechas muy cercanas, esto es, por la densidad similar de vegetación, los límites entre las parcelas, los caminos, las construcciones y áreas desnudas en los cerros.

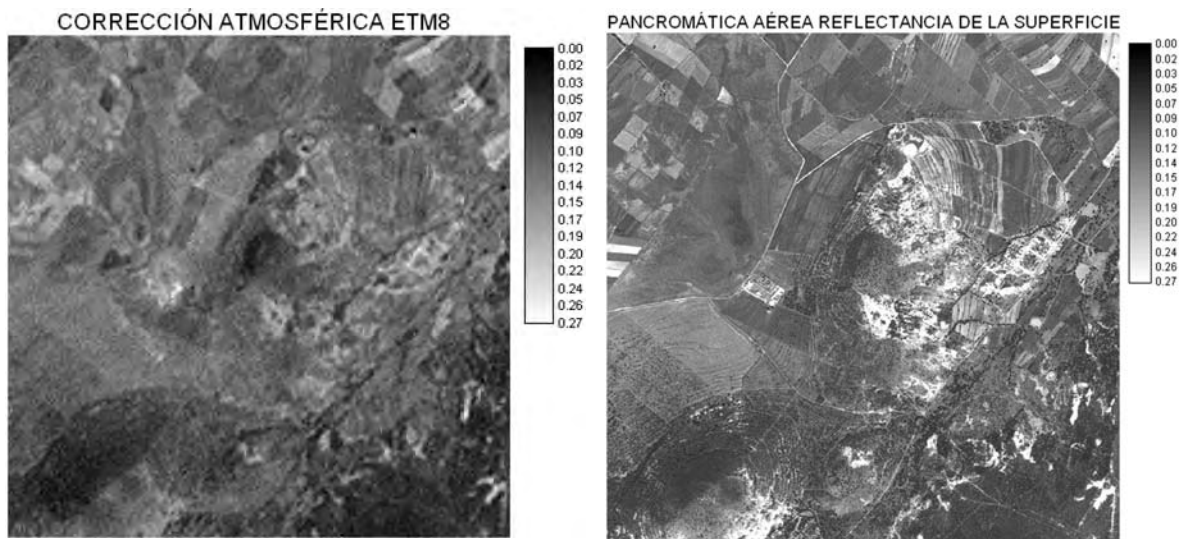


Figura 5.5. Comparativo de resolución espacial entre las imágenes pancromáticas de *Landsat ETM+* y aérea.

A manera ejercicio, es posible valerse de la imagen aérea georeferenciada para mostrar las ventajas de este proceso y generar información importante para nuestra investigación. Para hacer equivalente la sustitución de la imagen aérea por

la pancromática y aprovechar su mejor contraste de brillo y resolución espacial, fue necesario normalizar los DN de la imagen aérea a los valores mínimo y máximo de reflectancia de la imagen pancromática, de esta forma se obtuvo una imagen sintética de la reflectancia de la superficie, equivalente a la pancromática original, pero con mayor resolución espacial y mejor contraste en el brillo de las distintas cubiertas. Cabe mencionar que la imagen aérea original poseía una dispersión atmosférica despreciable, por lo que, teóricamente estaría mostrando sólo la reflectancia relativa de la superficie, circunscrita en los DN originales y equivalente con la normalización, a la reflectancia de la imagen TM8 corregida por dispersión atmosférica.

El proceso de fusión de imágenes puede hacerse por distintos métodos, existen en la literatura una gran cantidad de trabajos en donde se comparan los métodos de fusión, como el de Amit Agarkar, (2003), en donde expone las ventajas y desventajas de los métodos de fusión PCT, multiplicación y por transformación Brovey. Otros autores como Te-Ming Tu, et al., (2005), proponen una técnica ajustable para fusionar imágenes de *QuickBird* e *Ikonos* por los métodos RGB-HLS y por la transformación Brovey.

Para este trabajo se empleó la herramienta *pansharpen* del software *Idrisi Taiga* en dos modalidades, por transformación RGB-HLS y PCA. Las dos técnicas ofrecieron resultados similares, sin embargo, por el método de fusión por RGB-HLS se observó una ligera mejora en el acoplamiento espacial y la luminosidad de las imágenes fusionadas.

Como se detalla en el apartado 4.4.1, esta transformación desacopla la información espectral de una composición de tres bandas en el espacio de color RGB (rojo, verde y azul) en las componentes H (tono) y S (saturación), y aíslan la componente L (luminosidad) que contiene gran parte de la información espacial y el brillo.

Con esta transformación se generan nuevas imágenes de H, L y S, en el espacio de color HLS. La componente de luminosidad (L) se sustituye por la imagen pancromática aérea (con mayor resolución espacial y brillo). Posteriormente se realiza la transformación HLS inversa para volver al espacio de color RGB, obteniéndose tres nuevas bandas a las que se ha incorporado el detalle espacial y el brillo de la imagen pancromática. La figura 5.6 muestra los resultados obtenidos de este método de fusión.

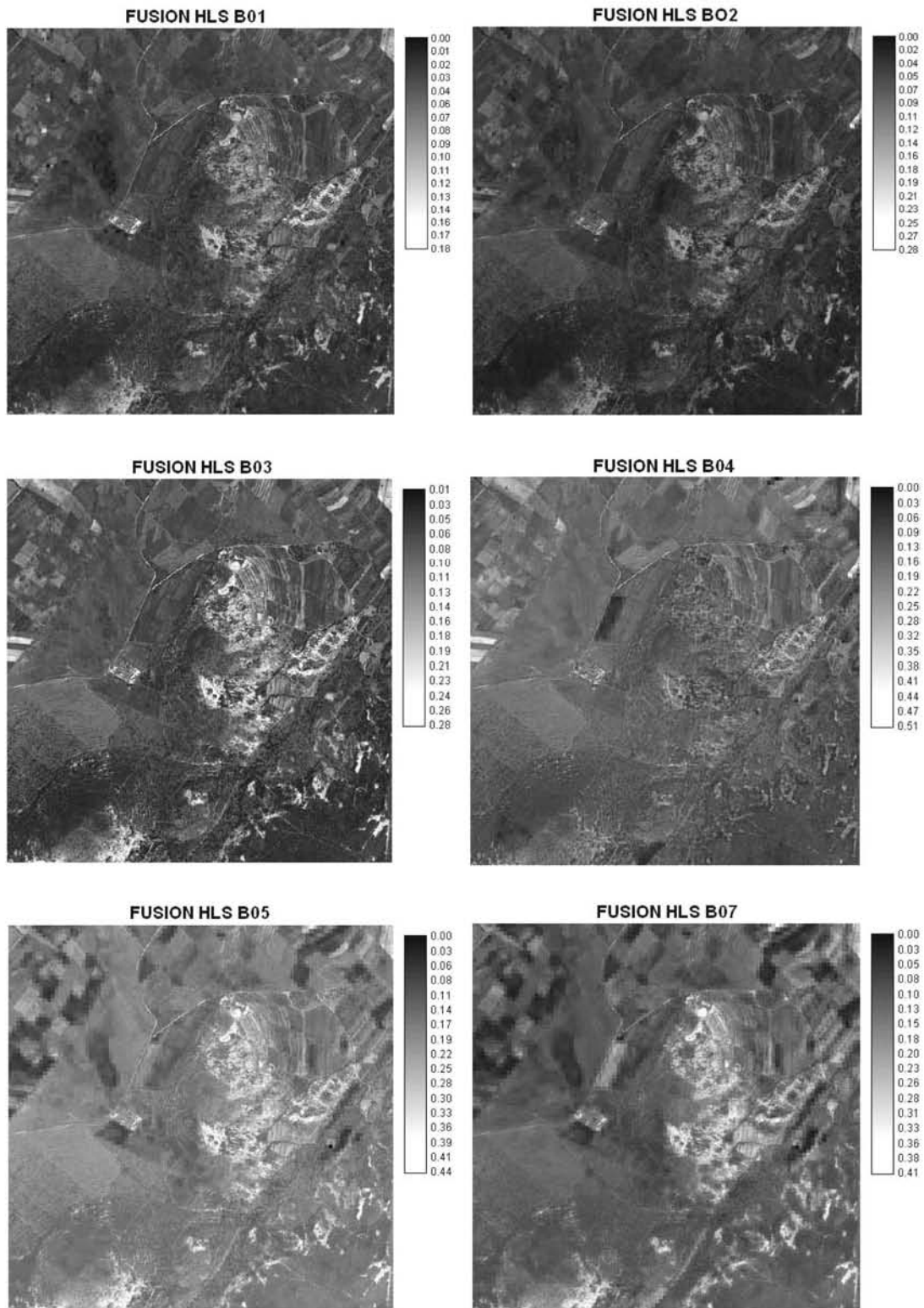


Figura 5.5. Resultado de la fusión de imágenes multiespectrales de *Landsat ETM+* con imagen pancromática aérea por el método RGB-HLS (*Pansharpen*).

5.6 COMPOSICIONES DE COLOR

La siguiente parte del proceso fue realizar composiciones de color para destacar la reflectancia de las plantas y el suelo en distintas bandas. Las bandas empleadas fueron obtenidas a partir de la fusión por el método HLS, que mostró un mejor acoplamiento espacial y en el brillo de las imágenes fusionadas.

En el cerro que está ubicado al centro de la imagen (cerro Las Palmas), se observa en la zona circundante a la cima, suelo desnudo y vegetación escasa, en colores azules verdosos, que sugiere una cubierta vegetal sometida a estrés y un suelo desnudo con avanzada erosión, (fig.5.6).

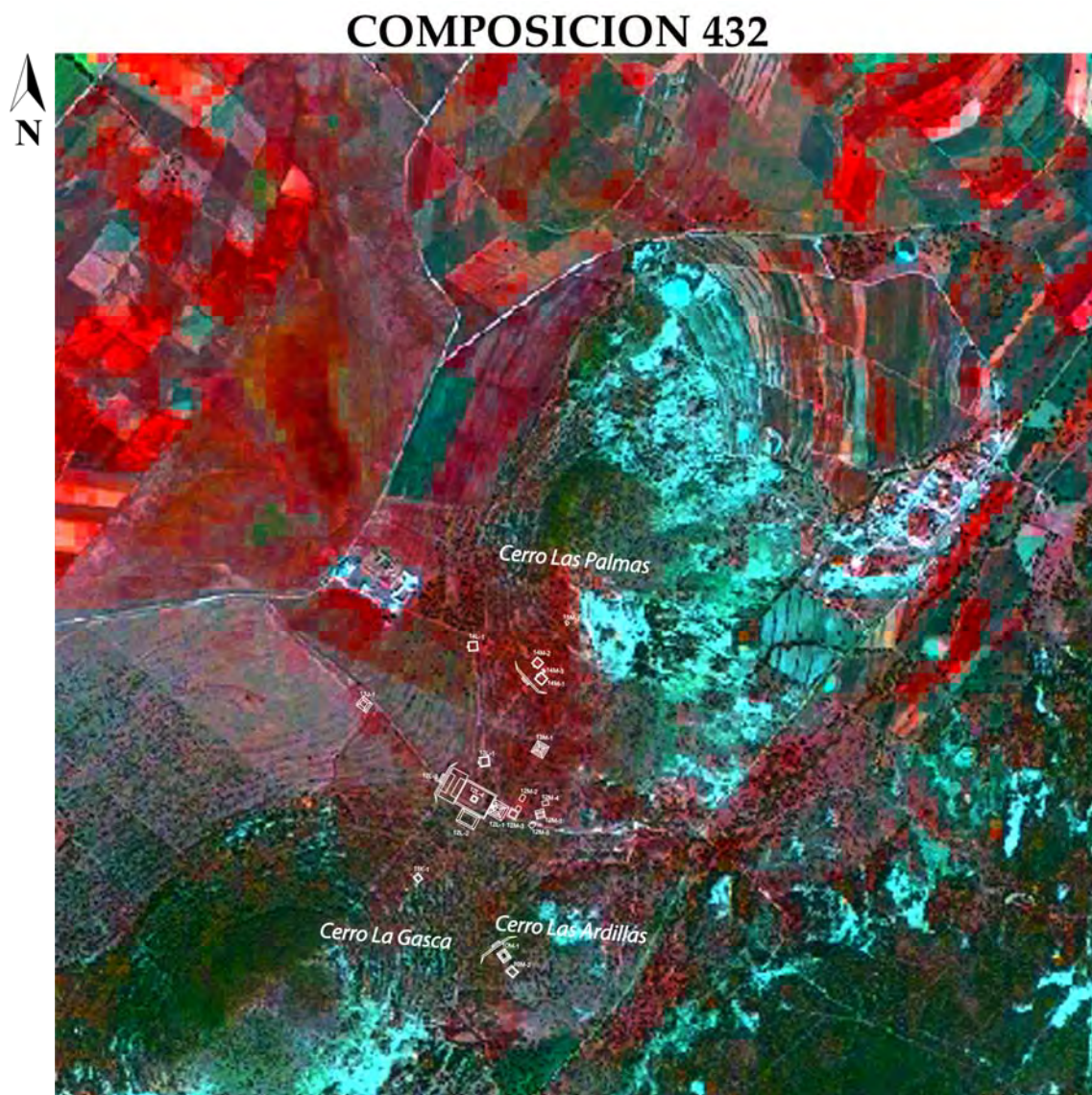


Figura 5.6. Composición de color 432, en donde se destaca la vigorosidad de la vegetación.

En la zona central ubicada entre los cerros, Las Palmas, La Gasca y Las Ardillas, la coloración cambia a un color rojo opaco y la textura de la imagen cambia a pequeñas concentraciones de color distribuidas en las faldas de los cerros y en las partes bajas del terreno. En esta zona se incluye la zona arqueológica de la laguna, en donde se han encontrado por los recorridos de superficie y por las excavaciones, modificaciones al terreno (terrazas y muros de contención) y estructuras arquitectónicas (públicas y domésticas) de distintos tamaños, como son: pirámides, una de 30x30 m de base por 6.1 metros de altura (E13M-1), otra pirámide de 38x38 m de base por 5.4 m de altura (E12L-1), un juego de pelota (E12L-3), una plaza mayor (E12L-4), así como diversos espacios y estructuras menores de uso doméstico. El tamaño de la parte nuclear del sitio según las estimaciones de los arqueólogos mide por lo menos 1 Km². La mayoría de las grandes estructuras son visibles por cambios topográficos en la superficie, sin embargo, otras han sido completamente sepultadas.

En cuanto a los suelos y rellenos presentes en el sitio es importante mencionar que después de que el sitio se abandonó y dejó de utilizarse, se inició un proceso natural de deterioro y destrucción durante el cual se presentaron varias etapas de deposición de horizontes y la formación de suelos, el más importante es lo que denominamos horizonte A enterrado (fig. 5.7).

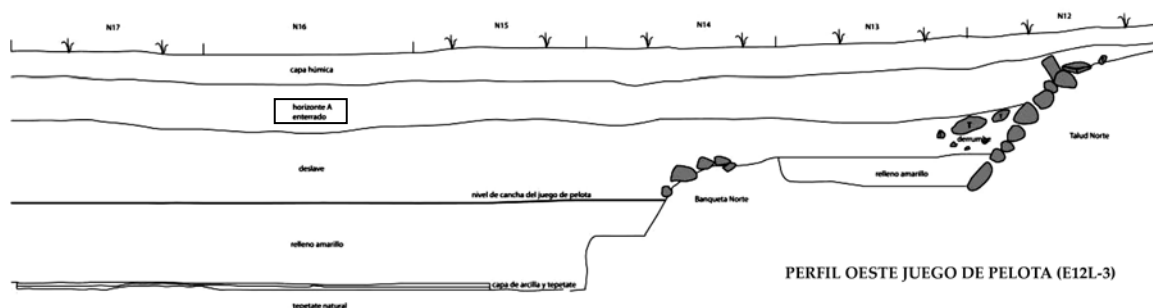


Figura 5.7. Perfil de la cala de excavación en la Estructura 12L-3, (Carballo et al 2009).

Lo primero que se presentó, por ejemplo en el juego de pelota (E12L-3,) fue el derrumbe de parte de la sección superior de los taludes internos y de los muros rectos de los descansos para después presentarse varias capas de declave de tierra hasta que el área de cancha fue rellenada. La formación del Horizonte A fue producida porque después del abandono del sitio durante muchos años el área no fue alterada culturalmente, lo que permitió una mayor actividad biológica y con ella la formación de un nuevo suelo, (Borejsza, 2006, 2008).

Evidencia de esto lo es, las características físicas del estrato, que es principalmente una tierra arcillosa muy compactada que presenta un rango de color que va del negro (10YR 2/1) al gris oscuro (10YR 2/3). Después se formó un último suelo sobre el horizonte A enterrado gracias a deslaves graduales de tierra que lo cubrieron. Este nuevo suelo es la capa superficial actual, comprendida por una tierra arcillosa de tonalidad marrón con muchos materiales orgánicos y sobretodo mezclada con material cultural del Postclásico y moderno, (Borejsza, 2006, 2008). Es sobre este último horizonte, como lo relatan las historias de los trabajadores, sobre el cual fueron cultivados cereales y magueyes antes de que el área pasara a ser utilizada como lugar para la cría de ganado vacuno, (Carballo et al 2009).

La composición 432 (infrarrojo-rojo-verde), de las imágenes *Landsat*, muestra en la parte NW y NE de la imagen un color rojo intenso que es resultado de vegetación vigorosa, principalmente de sembradíos, (fig. 5.6). El color verde y rojo muy tenue es producido por pastizales con poca agua, que dominan casi en toda la escena. Las zonas de vegetación con sombra en los cerros aparecen en color verdoso, con el proceso de cociente entre bandas veremos si es posible reducir el efecto de sombreado y recuperar la reflectividad real de la cubierta.

El cambio apreciable en la textura y color de la imagen parece ser producida por depósitos aluviales y coluviales de espesor variable que, a través del tiempo, han contribuido al sepultamiento del sitio, sólo las estructuras más grandes han sobresalido como pequeños montículos, otros espacios como las plazas y el juego de pelota han sido rellenados, conservándose el relieve del terreno con mesetas y pequeños desniveles. Sobre los montículos hay una gran variedad de vegetación, algunos tienen árboles medianos, recientemente sembrados, otros sólo arbustos y pastos. La vegetación sobre las plazas y el juego de pelota incluye principalmente pastizales para el ganado y matorrales. En las faldas de los cerros hay poca vegetación original, recientemente se han sembrado pinos y magueyes para controlar el proceso de erosión a que está sometida esta zona (comunicación personal con trabajadores del proyecto).

Se distinguen distintos tipos de cobertura que pueden ser clasificados visualmente de la forma siguiente:

- Terrenos agrícolas con vegetación vigorosa en color rojo intenso.
- Pastizales y matorrales que cubren la mayoría del terreno en color rojo muy tenue, con tonalidad verde-azulado.
- Suelo desnudo y áreas en proceso de erosión en la cima de los cerros y las zonas circundantes, en color azul claro.

- Vegetación estresada en las faldas de los cerros y en las partes bajas del terreno, en colores verde azulado con pequeñas motas de color rojo.
- Vegetación semiestresada con baja saturación de color rojo pálido y con textura en forma de manchas semicirculares. Presentes en la parte central de la imagen, zonas llanas y terrazas de los cerros. En esta zona se encuentra la parte nuclear del sitio arqueológico.

Otra composición de falso color que muestra muy bien la alta reflectancia de la vegetación y la humedad del suelo en las bandas TM4 y TM5, es la composición 453, en comparación con la banda TM3 donde la respuesta es mínima (fig. 5.8).

En el área donde se encuentra la zona arqueológica, se distingue la textura de la cubierta, similar a cúmulos difuminados, en tonos de color rojo pálido, distinta a la textura de la cubierta vegetal vigorosa en color rojo saturado.

La humedad del suelo y la vegetación, asociada con la banda TM5, destaca en colores verdes de tonos oscuros, mientras que, en color verde claro se representan los terrenos con vegetación estresada y pastizales secos. Los terrenos con roca desnuda y tierra seca en el cerro las Palmas y en otras partes del sitio, presentan colores azules claros, asociados a la banda TM3 que resultó muy útil para distinguir las zonas sin vegetación.

La vigorosidad de la vegetación es evidente en este tipo de composición, generalmente las áreas más cuidadas, como son las zonas de cultivos, destacan en la banda rojo. La zona asociada al sitio presenta también vegetación vigorosa, sin embargo, la textura es muy distinta a las áreas de cultivo y esto puede ser un indicador de las zonas que han sido cubiertas por depósitos coluviales de los cerros circundantes e indirectamente de la presencia de elementos culturales sepultados. Las zonas donde la vegetación es nula o está muy estresada se muestran en color azul claro, mientras que, el suelo húmedo se presenta en tonalidades azul oscuro.

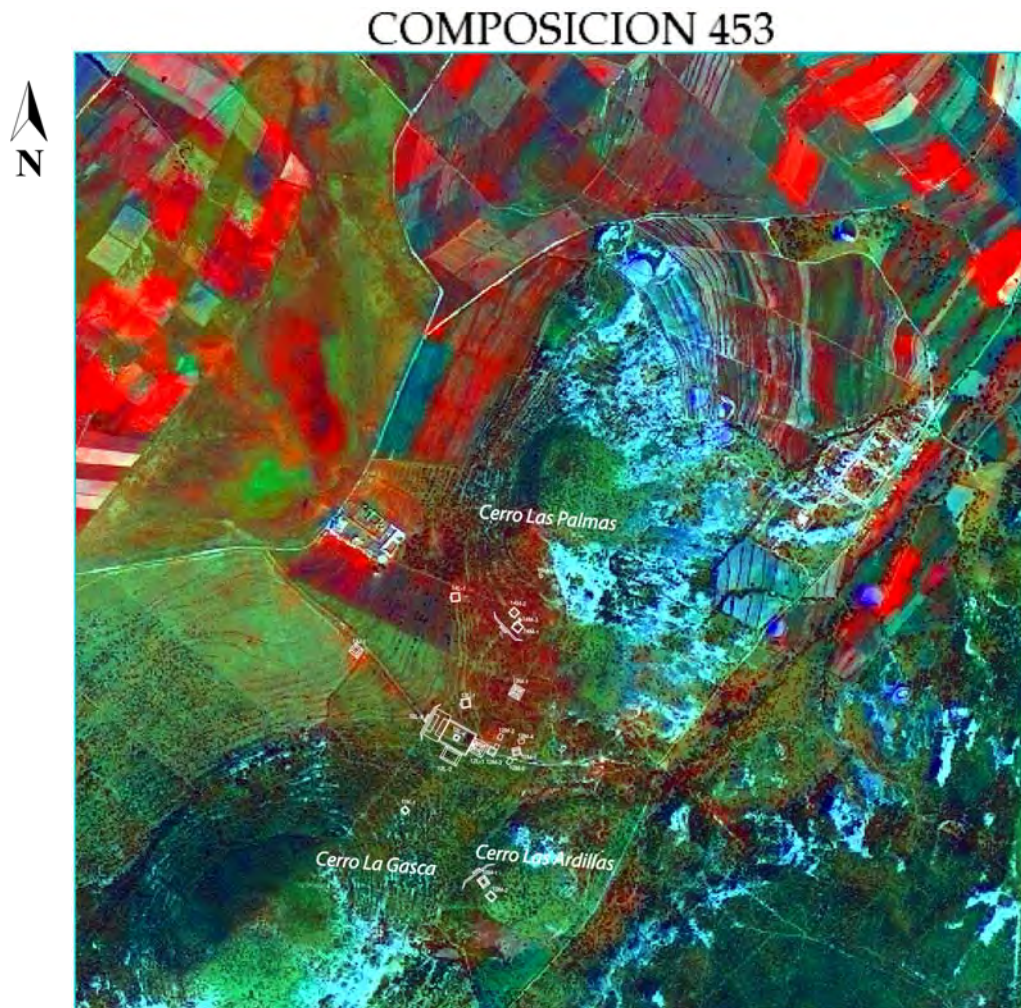


Figura 5.8. Composición de color 453 para destacar la reflectancia de la vegetación en las bandas 4 y 5, contrastándolas con la banda 3.

Por otra parte, otra composición que aprovecha el alto contraste entre la alta reflectividad de la vegetación en las bandas 5 y 4, con respecto a la baja reflectividad en la banda 7, es la composición 547 (fig.5.9).

La salud y el estrés de la vegetación se puede discriminar bien con esta composición, en la banda 4 la vegetación vigorosa posee una alta reflectancia en el canal verde, mientras que, en la banda 5 la reflectancia es alta, sí el contenido de humedad aumenta, siendo esto un indicador del nivel del estrés. Las zonas asociadas con presencia de humedad en el suelo y las plantas se distinguen como la mezcla aditiva del color rojo y verde, dando un color café sí la cubierta posee más humedad, y con un color café claro a amarillento cuando la vegetación está más estresada.

Por otro lado, la banda 7 es muy útil para diferenciar la vegetación del suelo desnudo, en esta composición se observa las zonas de tierra y roca desnuda en color violeta claro. Al igual que las composiciones anteriores, destaca la vegetación vigorosa de la banda 4 en el canal verde. Con un color verde menos saturado y con textura distinta, se distingue en la parte central, una tipo de cubierta con patrones de color ligeramente distintos, éstos pueden relacionarse directamente con la cubierta vegetal y con los depósitos coluviales, e indirectamente con las modificaciones al paisaje y con las estructuras arqueológicas enterradas.

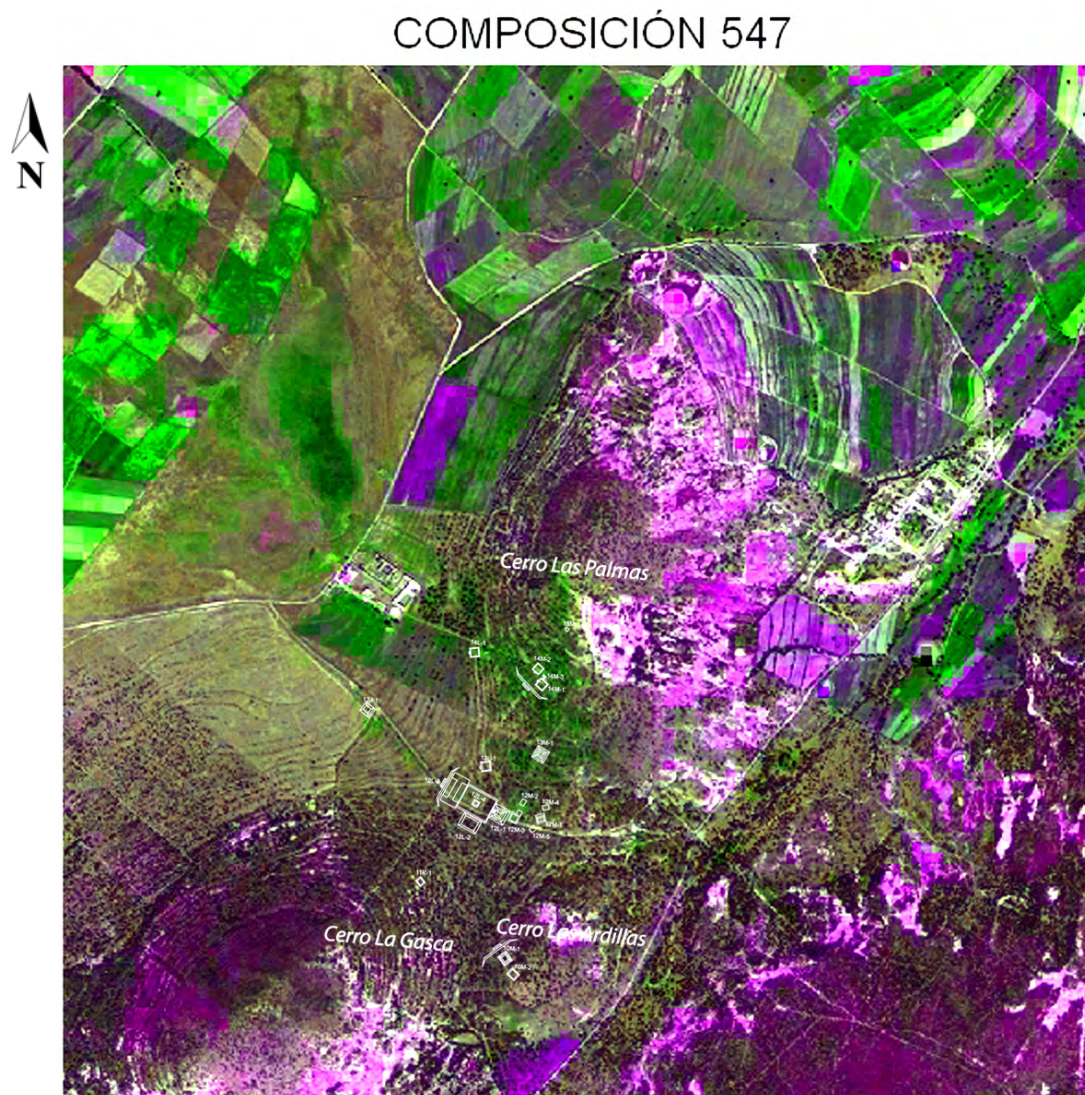


Figura 5.9. Composición de color para enfatizar la vigorosidad de las plantas y el suelo desnudo.

5.7. COCIENTE ENTRE BANDAS

Las bandas 3, 4, 5 y 7 de *Landsat ETM+* son las más sensibles a la vegetación, y entonces son las más útiles en la detección del impacto humano en la vegetación. La banda 3 tiene un rango dinámico muy bajo para la vegetación, en comparación con las bandas 4, 5 y 7 que son más altos. En investigaciones forestales el cociente entre las bandas (4/5) se utiliza para determinar el brillo y la densidad de las copas de los árboles (Rothaus, R. M., 1999). Como el propósito de este estudio es detectar la actividad cultural, el cociente inverso (5/4) es útil para reducir el brillo de las copas de los árboles y combinarlo con los cocientes (7/5) y (7/4) para crear una composición de color que acentúe la actividad cultural, (Rothaus R. M., 1999).



Figura 5.9. Cociente entre bandas para destacar rasgos culturales.

El cociente (5/4) se pone en el canal rojo, el (7/5) en el verde y (7/4) en el azul. La imagen con la composición de color aplicada, efectivamente reduce el efecto de las copas de los árboles en las zonas llanas y en las faldas de los cerros, (fig. 5.10), y permite destacar mejor, en el canal rojo, las modificaciones al paisaje en la parte central del sitio, en la terrazas de los cerros y en la mayor parte de las zonas agrícolas, también reduce un poco el efecto de sombreado. Este proceso también discrimina mejor la textura de la cubierta asociada con actividades culturales, en especial a la que corresponde con la zona arqueológica en el centro de la imagen.

5.8 COMPONENTES PRINCIPALES (PCA)

Otra parte del proceso de los datos fue el empleo del análisis de las componentes principales, para este caso utilizamos la información de las tres primeras componentes, PC1, PC2 y PC3. Con sólo tres componentes se consiguió reunir aproximadamente el 95% de la información aportada por las bandas fusionadas de *Landsat ETM+*.

Como se abordó en el apartado 4.5, las PCA se obtienen para generar información no correlacionada a través de la combinación lineal de las bandas originales, con esta transformación se logra separar, en muchos casos, la información redundante y común de las bandas analizadas, con lo que se analizará sólo la información más relevante y no correlacionada de las bandas, facilitando en la mayoría de los casos la interpretación de los datos.

Para la componente PC1, la mayor parte de los autores coinciden en que representa la información relacionada con el albedo o brillo de todas las bandas, similar a una imagen pancromática, (Chuvienco, 2008). Para la componente PC2, no puede establecerse una interpretación a priori, ya que la transformación PCA es puramente estadística, (Chuvienco, 2008), destacará algún rasgo importante, bien puede ser el verdor, la humedad o cualquier otra propiedad que tenga un peso importante en las bandas analizadas. Las demás componentes pueden destacar otras propiedades de la cubierta, hasta que la varianza entre ellas sea mínima, registrándose el ruido de todas las bandas en las últimas componentes.

Una vez obtenidas las componentes principales -nuevos ejes en el espacio espectral no correlacionados entre sí- con el programa de procesamiento *Idrisi Taiga*, se representan en una matriz de datos, llamada matriz de carga, en donde se colocan las bandas analizadas y las componentes principales obtenidas, en forma de renglón-columna, con sus respectivos coeficientes de carga o factores de peso.

Estos coeficientes de carga representan el grado de correlación de cada banda con respecto a cada componente principal y son obtenidos a partir de la operación matemática entre los eigenvectores (indican la dirección de los nuevos ejes), los eigenvalores (indican la longitud de cada eje nuevo) y la varianza de cada banda en la matriz de covarianza.

El uso de la matriz de carga es para facilitar la interpretación de los resultados, es decir, para determinar que tan correlacionadas están las bandas con respecto a cada componentes principal, y de esta forma saber que representa cada componente. Si los coeficientes tienen valores positivos y cercanos a uno, indican que una banda o un conjunto de bandas están directamente relacionadas con la componente en cuestión, contrariamente, si tienen valores negativos, indican que se relacionan inversamente; por otra parte, si el valor es cercano a cero, sugeriría que no tienen relación.

En los primeros renglones de la matriz se suele colocar el porcentaje de varianza de cada componente, en donde la mayor varianza está asociada con la primera componente. La explicación estadística de esta transformación se puede consultar en forma extensa en el libro de Jensen (1996).

En la matriz de carga, tabla 5.4, se determina que el mayor porcentaje de varianza está en las componentes PC1 y PC2, que acumulan el 94.9% de total de la varianza. Si le sumamos la varianza de PC3, el porcentaje acumulado será del 98.5%, esto representa una extraordinaria compresión de la información de las 6 bandas originales a sólo 3 componentes, con una pérdida del 1.5% de la información.

COMPONENTE PRINCIPAL	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	PC 6
% var.	78.06044	16.844607	3.58343	0.86213	0.457406	0.191987
% var. acumulativa	78.06044	94.905047	98.488477	99.350607	99.808013	100
Banda						
ETM1 0.45-52 (μm)	0.974752	-0.084117	-0.154632	-0.042179	-0.129076	-0.020773
ETM2 0.52-0.60 (μm)	0.980697	0.001667	-0.153574	-0.081116	0.053162	0.072379
ETM3 0.63-0.69 (mm)	0.975016	-0.127964	-0.140773	0.032479	0.087072	-0.067199
ETM4 0.76-0.90 (μm)	0.181913	0.980579	-0.066211	0.030879	-0.002469	-0.005379
ETM5 1.55-1.75 (mm)	0.919796	0.129181	0.356976	-0.09761	0.007142	-0.016668
ETM7 2.08-2.35 (μm)	0.970538	-0.09487	0.126005	0.178417	-0.017861	0.032041

Tabla 5.4. Matriz de carga obtenida a partir del análisis de componentes principales.

En la figura 5.10, se muestra la gráfica de los coeficientes de carga con respecto a la longitud de onda central de cada banda de ETM, la curva de la componente PC1 (curva gris oscuro) muestra un comportamiento casi constante, con un descenso en el infrarrojo (ETM4), esto representa el promedio de las reflectancias en el azul (ETM1), verde (ETM2), rojo (ETM3) e infrarrojo (ETM4, ETM5 y ETM7). Esto lo podríamos interpretar como el aporte de brillo del suelo y la vegetación, con un menor peso de la vegetación vigorosa en la banda 4 con respecto a la primera componente.

La componente PC2 (curva verde), presenta un comportamiento similar a la firma espectral de la vegetación (ver fig.5.1), con un pequeño pico en el verde (ETM2), un descenso en el azul (ETM1) y rojo ((ETM3), y un incremento fuerte en el infrarrojo (ETM4), disminuyendo gradualmente en el infrarrojo medio (ETM5 y ETM7). Para esta escena en particular, se observa que la vigorosidad de la vegetación, en la banda ETM4, está relacionada directamente con PC2, esto significa que esta componente está representando la vigorosidad de la vegetación en la banda ETM4 y un poco en la banda ETM5.

Para la componente PC3 (curva azul) se tiene un incremento en la reflectancia de la vegetación en las bandas del infrarrojo medio, en donde la curva presenta un pico en la banda ETM5 y disminuye paulatinamente hacia ETM7. La interpretación sería que esta componente estaría relacionada principalmente con la humedad en la vegetación, en donde la banda ETM5 es sensible, y en menor medida con la humedad del suelo en la banda ETM7.

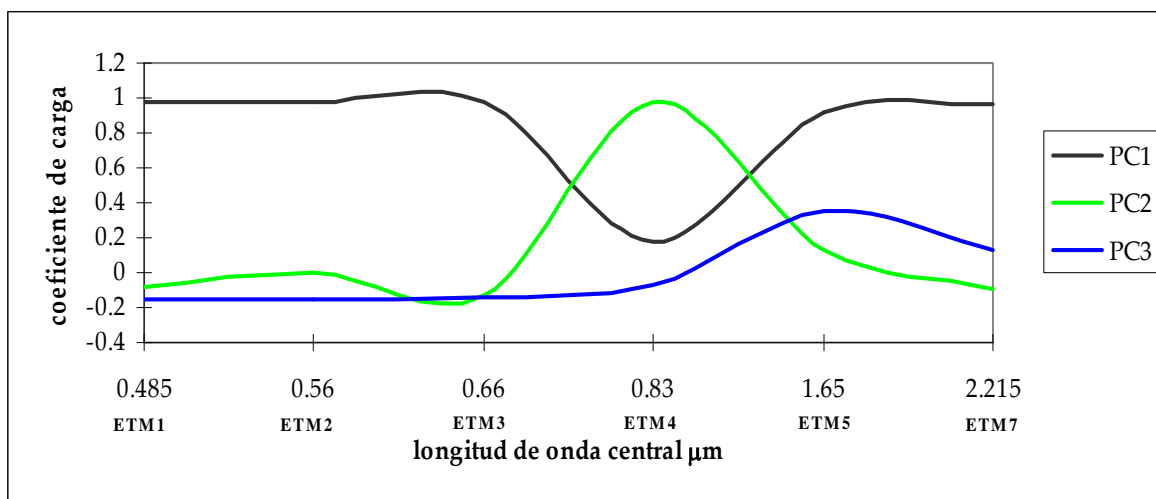


Figura 5.10. Comportamiento de los coeficientes de carga con respecto a las bandas fusionadas.

Las demás componentes, no representadas en la gráfica (ver tabla 5.4), aportan cada vez menos información útil, hasta representar prácticamente el ruido de cada banda.

Las imágenes de las componentes principales muestran lo que la matriz de carga determina numéricamente (fig. 5.11), mientras que en la gráfica se representa el peso de cada banda ETM con respecto a cada componente principal. La mayor parte de la información de todas las bandas originales se encuentra comprimida en estas componentes, en PC1 tenemos el aporte de todas las bandas del espectro al brillo y al detalle espacial, mientras que en PC2 y PC3 tenemos información de la respuesta de la vegetación y el suelo en las bandas ETM4, ETM5 y ETM7.

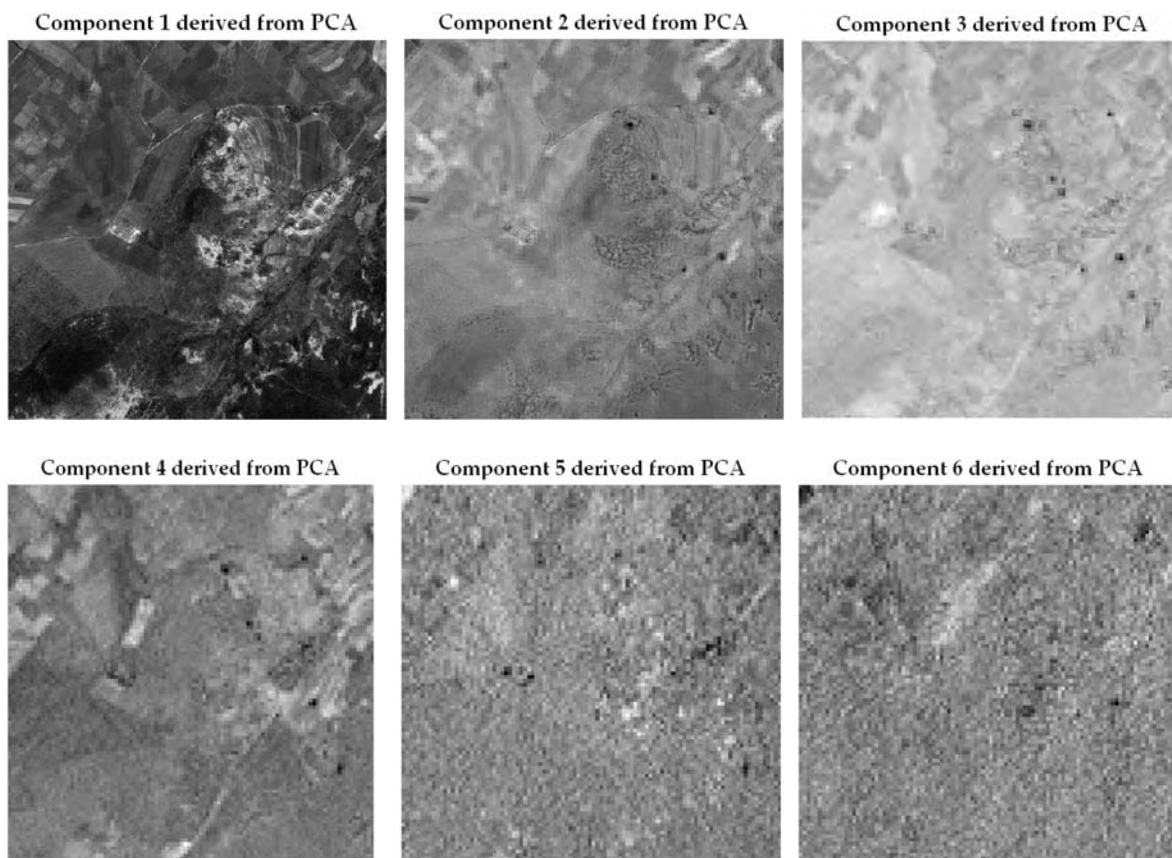


Figura 5.11. Comportamiento de los coeficientes de carga con respecto a las bandas fusionadas.

En la componente PC4 se observa una menor varianza, la imagen es redundante y aportan muy poca información adicional para ser tomada en cuenta en el análisis de los datos. Las componente PC5 y PC6 muestran muy poca información, es muy

homogénea con una varianza muy pequeña, representan principalmente el ruido de todas las bandas ETM.

Una vez obtenidas las componentes principales se generó la composición de color PC1-PC2-PC3, (fig. 5.12). La PC1 se puso en el canal rojo para el brillo, en el verde la componente PC2, para relacionarla directamente con la vigorosidad de la vegetación, y PC3 en el azul para registrar la humedad en el suelo y la vegetación.

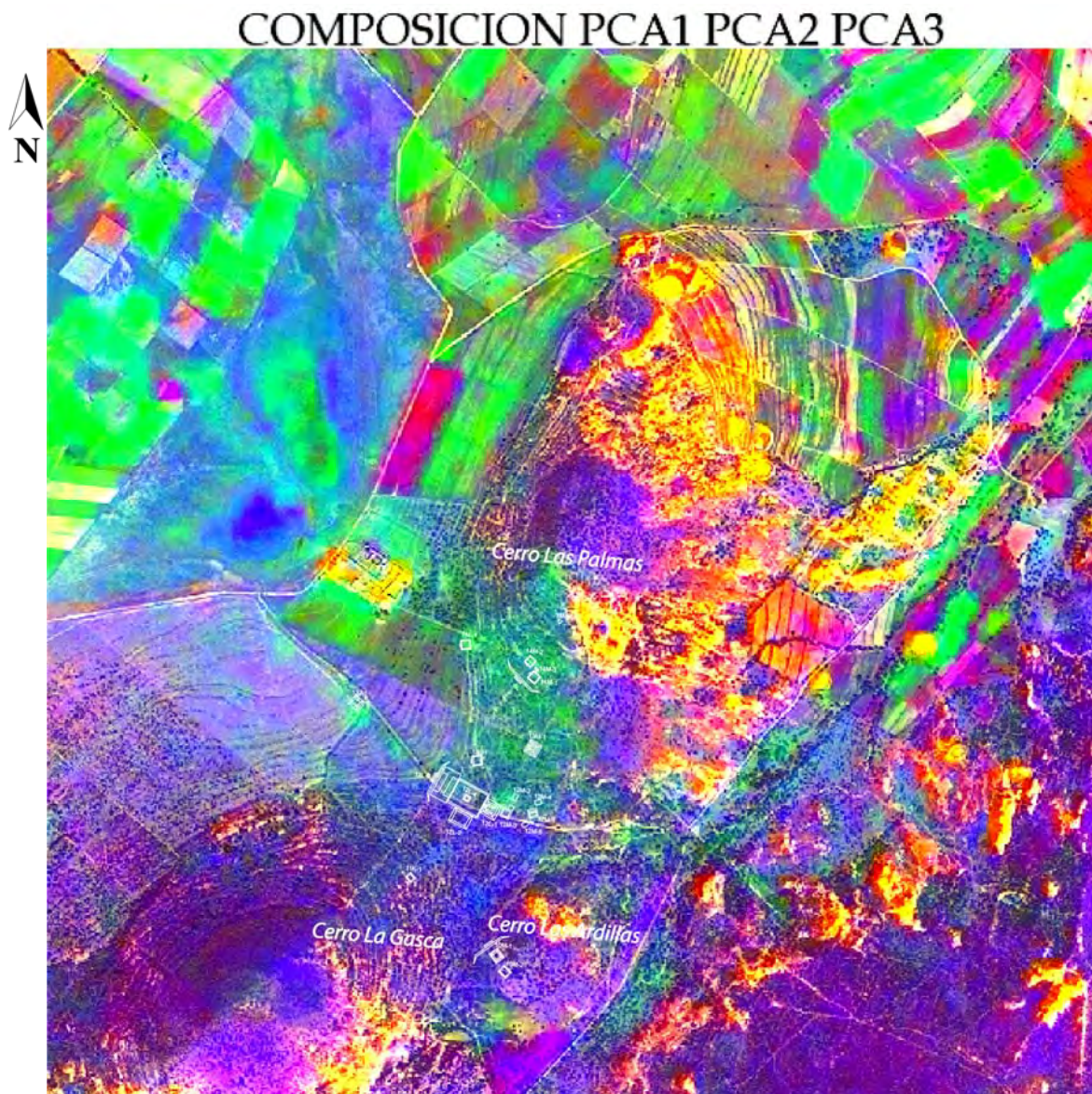


Figura 5.12. Composición de color de las componentes principales RGB-PC1 PC2 PC3.

El área central, donde se encuentra gran parte del sitio arqueológico, posee un color verde pálido, con menos saturación y con una textura distinta a las zonas agrícolas que por lo regular presentan patrones rectangulares. El área asociada a la actividad cultural tiene un color verde más difuminado y una textura con manchas semicirculares, y abarca desde las faldas de la parte sur del cerro de Las Palmas, pasa por la parte central del sitio y se va desvaneciendo en las faldas de los cerros La Gasca y Las Ardillas, es aquí donde se encuentra la mayor parte de sitio arqueológico sepultado y puede estar marcando indirectamente sus límites. Es probable que las características espectrales de la vegetación y el suelo de esta parte estén relacionadas con los suelos y materiales que sepultaron al sitio después de que fue abandonado.

Esta composición dejar ver las características del tipo de cobertura en forma más evidente. Esto se debe a que las componentes obtenidas para estos datos, enfatizan la respuesta del suelo, la vegetación y la humedad de la cubierta. La PC1, en colores rojos y amarillos, representa muy bien las zonas que más contribuyen al brillo de la imagen, como las cimas rocosas de los cerros, construcciones modernas, caminos y el suelo desnudo. En el canal verde asociado a la componente principal PC2, la imagen compuesta en falso color contrasta muy bien la vegetación vigorosa en color verde con alta saturación, relacionada principalmente con zonas de cultivo y con vegetación sana. En tonalidades magentas, de la mezcla de los canales rojo y azul, destacan las zonas con tierra, pastizales secos y vegetación estresada. La PC3, en tonalidades azules, representan las zonas de humedad en la vegetación natural y el suelo.

5.9 ÍNDICES DE VEGETACIÓN

Existen en la literatura gran cantidad de índices de vegetación sensibles a distintos factores y con distintas correcciones dependiendo de las bandas involucradas en el cálculo, sin embargo para este trabajo hay dos técnicas especialmente útiles para obtener información de la salud de la vegetación, tomando en cuenta el aporte del suelo, estos índices son: el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) y el SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*), en el apartado 4.7 se revisan las características de estos índices de vegetación.

El sitio arqueológico se encuentra en un pequeño valle que ha sido rellenado por depósitos coluviales, en él se ha acumulado durante casi 2 mil años una gran cantidad de material proveniente de los cerros circundantes, las zonas en donde estaban las principales estructuras arqueológicas, como el juego de pelota, la plaza principal y pequeños patios. Todo este conjunto de estructuras fue cubierto

principalmente por material arcilloso con cantidades menores de limo y arcilla. En algunas partes con rocas y suelos incipientes, crecen pastizales y arbustos pequeños, por el contrario, en las grietas y en las zanjas donde el agua y material con nutrientes se acumulan, la vegetación es más vigorosa. En zonas con pisos, muros, alfardas, escalinatas y muros de contención, las raíces no penetran demasiado por lo cual su desarrollo se ve afectado, adaptándose sólo las especies más pequeñas con menos requerimientos como los matorrales. Recientemente se han sembrado pinos para contener la erosión del sitio, esto de alguna forma incrementa el valor del índice NDVI.

La imagen de la figura 5.13a muestra la composición con 3-NDVI-1 para contrastar la respuesta de la vegetación. Este índice permite discriminar bien las masas vegetales: los verdes más brillantes corresponden con las zonas de cultivo, los más oscuros corresponden con la vegetación en los cerros, y en color verde-magenta los pastos y matorrales secos.

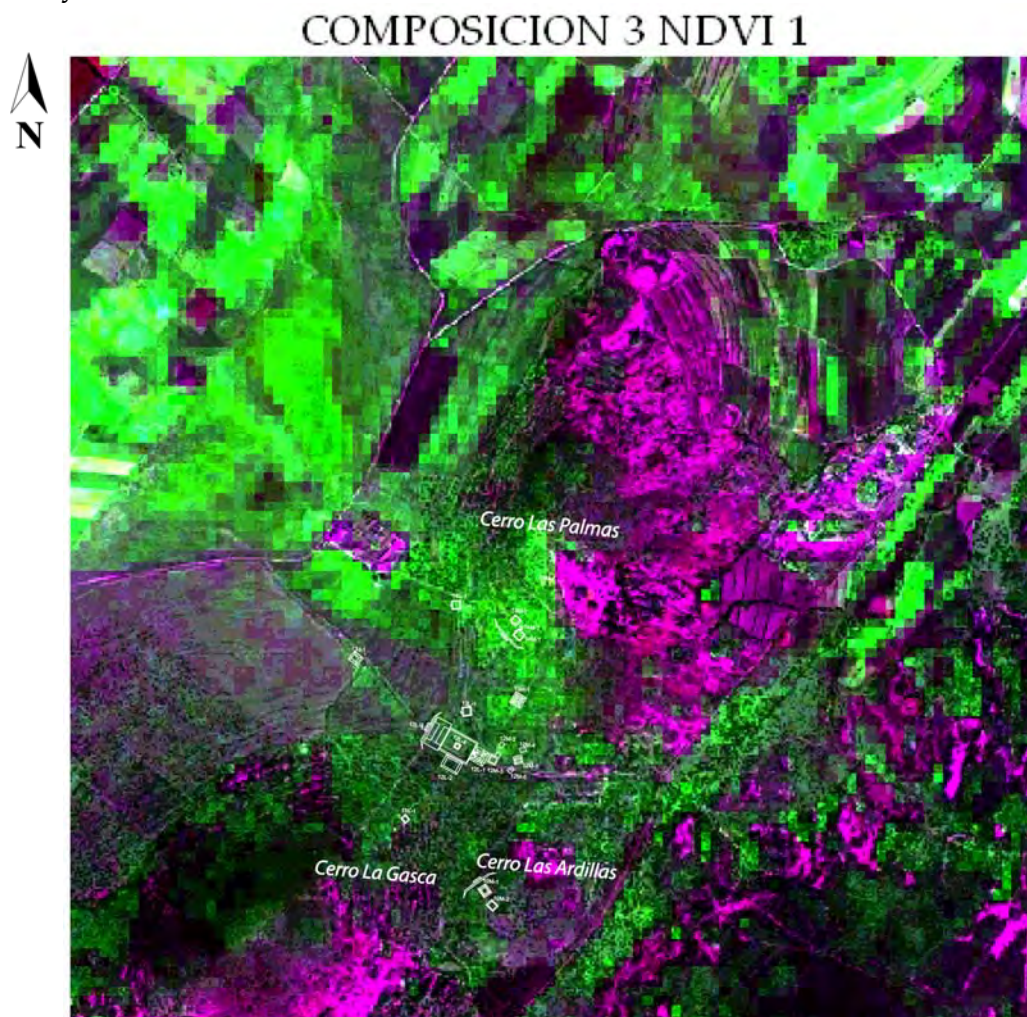


Figura 5.13a. Composición de color para el índice de vegetación NDVI.

El color magenta resulta de la mezcla aditiva del azul y rojo, bandas donde la vegetación tiene una reflectancia muy baja, las cimas de los cerros con roca y suelos desnudos presentan este color, mientras que, los pastos secos poseen un color verde-magenta, relacionado con la vegetación estresada.

La parte nuclear del sitio se ubica en una zona mixta entre vegetación vigorosa y estresada, no se observa un patrón evidente en la reflectancia de la imagen, o en su textura, que permita inferir indirectamente la presencia del sitio arqueológico por las características de la vegetación.

Por otra parte, el índice SAVI permite reducir el brillo que el suelo aporta a la vegetación y de esta forma diferenciar mejor las masas vegetales, (fig. 5.13b). La composición de color que incluye a SAVI, distingue mejor dentro del canal verde tres niveles de brillo, asociados con distintos tipos de vegetación.

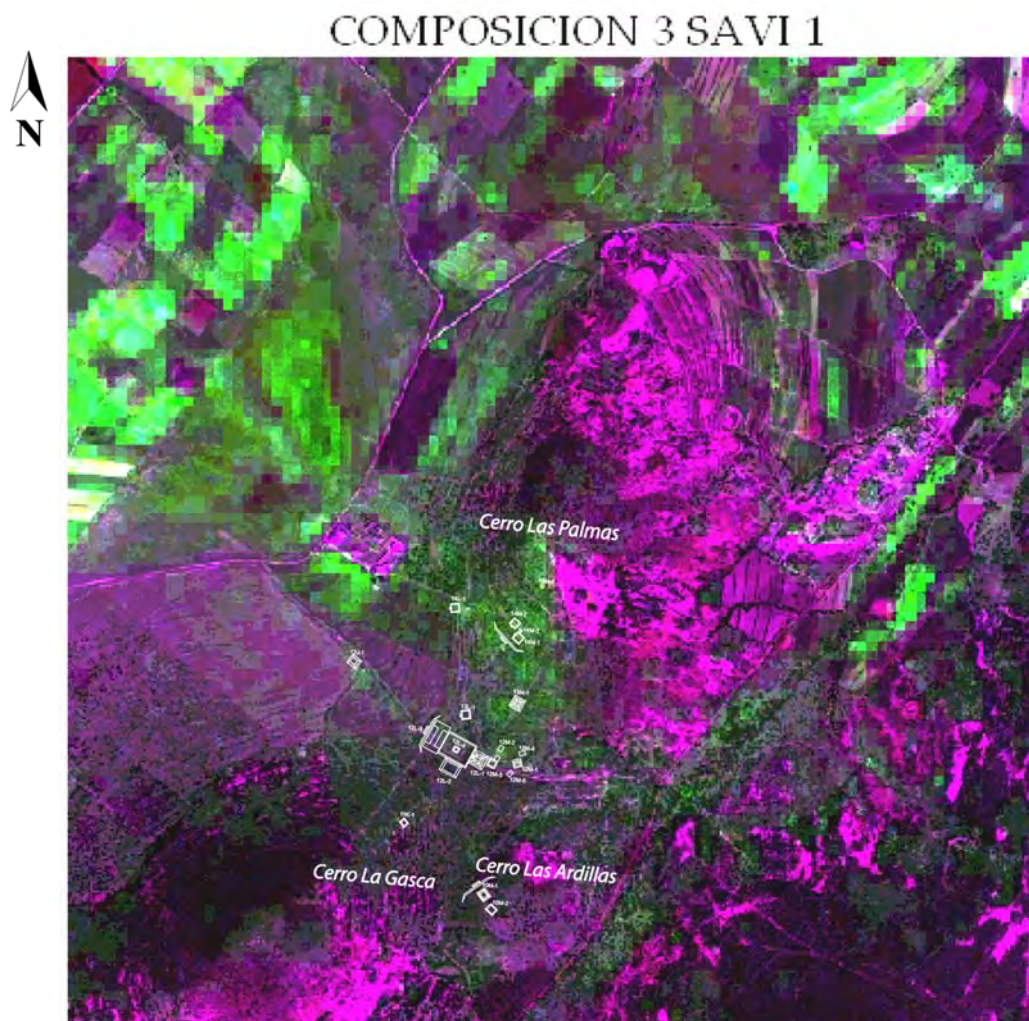


Figura 5.13. Composición de color para los índices de vegetación NDVI y SAVI.

El color magenta y verde-magenta corresponde con suelo desnudo, rocas, construcciones y vegetación estresada. En la zona donde se encuentra el sitio arqueológico, hay una vegetación mixta entre pinos, arbustos y pastizales secos, esto se registra en la composición en un color verde de brillo intermedio y magenta, posiblemente el material coluvial que cubre gran parte de este espacio favorezca las combinación de este tipo de vegetación, y junto con el contexto en el que se ubica, podría ser un indicador de la presencia del sitio.

5.10 TRANSFORMACIÓN *TASSELED CAP* (TCT)

La transformación *Tasseled Cap* (gorro de borla), aunque tiene una orientación enfocada principalmente a la agricultura, se implementó en este trabajo para ver si la información de brillo, verdor y humedad podía relacionarse indirectamente con la modificación al paisaje y con la presencia de vestigios enterrados. Los conceptos teóricos de esta transformación pueden revisarse en el apartado 4.6.

Las componentes de brillo, verdor y humedad se muestran generalmente en escala de grises, la banda de brillo destaca las zonas sin cubierta vegetal, generalmente en las cimas y en las faldas de los cerros. Las bandas de verdor y humedad presentan altos valores en las zonas de cultivo, los bosques, las zanjas y las zonas topográficamente bajas, en donde habitualmente se retiene gran cantidad de agua.

Con la composición de color aplicada a las bandas de *Tasseled Cap* se representa la información de las tres bandas (brillo, verdor y humedad) en una sola imagen, el canal rojo se asocia con el brillo, el verde al verdor y el azul a la humedad, (fig. 5.14). En la composición de falso color, el rojo y amarillo representa el brillo de la superficie del terreno, relacionado con suelo desnudo, tierra seca, construcciones y caminos. El verdor y la humedad se combinan en color cian para destacar las áreas que tienen más humedad, en las zonas de sombra no es muy precisa esta representación ya que está influenciada por la menor reflectancia que producen las áreas que no reciben radiación solar directa. Las tonalidades amarillo verdosas son debidas a la vegetación estresada con menor humedad.

La zona arqueológica se encuentra en una zona intermedia, entre vegetación estresada y sana, no es muy fácil distinguirla claramente, es por la textura y el contexto en el que se encuentra que se puede interpretar adecuadamente la imagen. La TCT para *Landsat ETM+* no ofrece, para esta aplicación, un contraste suficiente en las bandas brillo, verdor y humedad para poder evidenciar indirectamente la presencia del sitio, ya que sólo por detalles sutiles en el color y la

textura es posible distinguir pequeñas diferencias en la cubierta. Esto se debe posiblemente a que la transformación *Tasseled Cap* exige una rigurosa corrección atmosférica y por el efecto de las sombras (Kauth y Thomas, 1976). En este caso la textura, el contexto y las imágenes derivadas de otros procesos ayudaron a ubicar indirectamente la zona donde se encuentra el sitio. Sin embargo, es un buen experimento para evaluar las posibilidades que puede aportar esta técnica, que puede mejorar reforzando las interpretaciones con otras composiciones y con los recorridos de superficie para conocer mejor los distintos tipos de cubiertas.

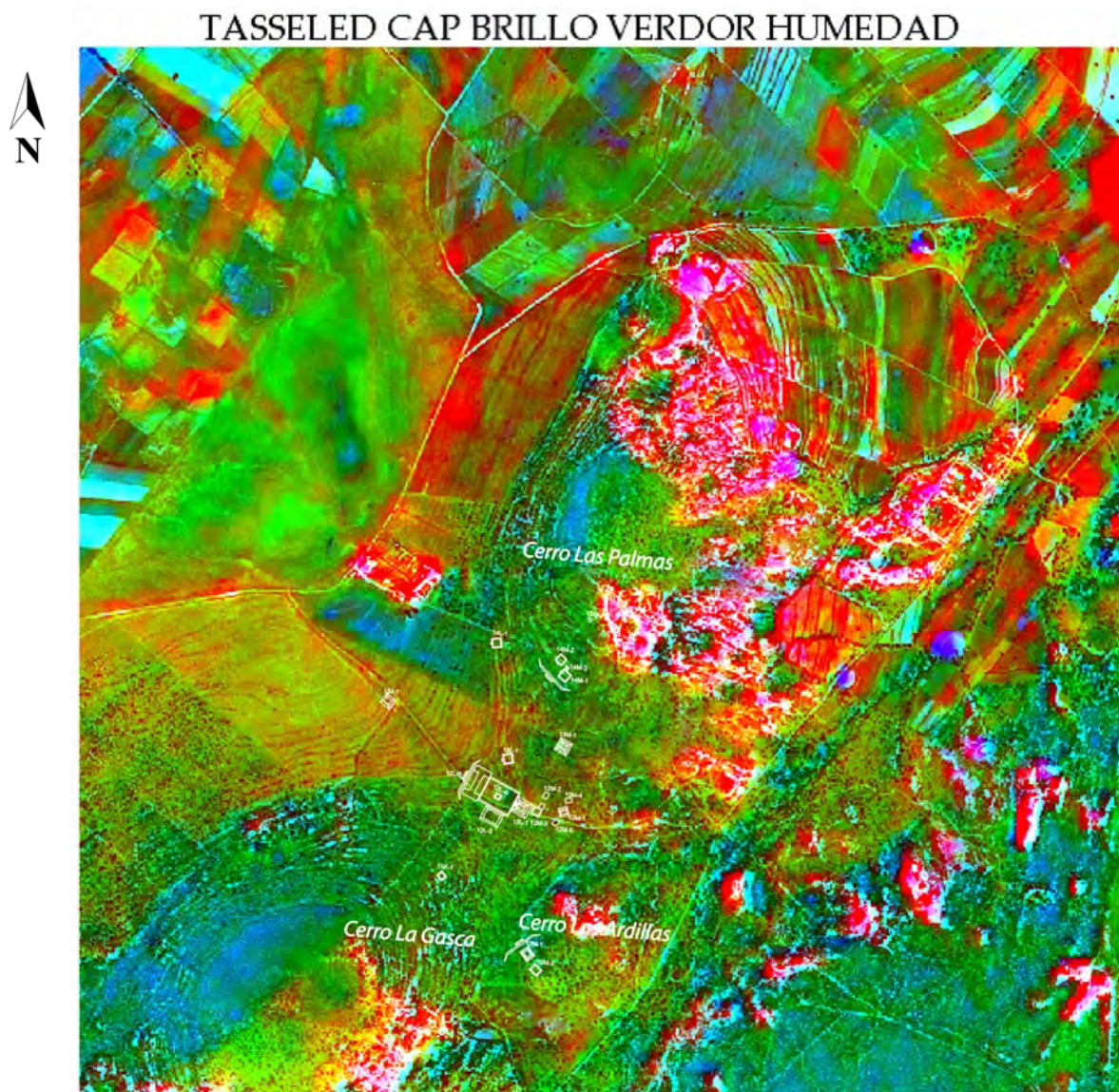


Figura 5.14. *Tasseled Cap* con composición de color de las bandas de brillo, verdor y humedad.

5.11 BANDA TÉRMICA LANDSAT ETM

Para emplear adecuadamente la banda térmica (ETM61) y darle un sentido físico útil a los datos, se convirtieron primero los DN a valores de radiancia espectral, y posteriormente a valores de temperatura, utilizando los parámetros de calibración del sensor (Tabla 5.2) y las fórmulas de conversión (4.8) y (4.9). Cabe mencionar que la resolución espacial de la banda térmica de *Landsat ETM+* es de 60 m, muy grande en relación con el tamaño y la resolución que se requiere para este tipo de aplicaciones. Aún con esta desventaja, se decidió probar si es capaz de detectar pequeñas diferencias en la temperatura de la superficie que estén relacionadas indirectamente con estructuras arqueológicas enterradas, hechas de roca en la mayoría de los casos, y con los distintos materiales que han rellenado el sitio.

El objetivo no es calcular como en las otras bandas la reflectancia de la superficie, que es la relación entre el flujo incidente en el suelo y el reflejado al sensor, sino entre el flujo emitido desde el suelo ($L_{suelo,k}$) y el recibido por el sensor ($L_{sen,k}$). El mayor problema para el cálculo de la temperatura de la superficie es la distorsión que provoca la atmósfera, ya que ésta absorbe y emite su propia energía. Para este trabajo se está suponiendo una atmósfera transparente y la emisividad promedio de la superficie de acuerdo a los valores de la fórmula 4.9. Para mejorar la resolución espacial de la imagen de temperatura, se realizó un muestreo bi-cúbico para dejar el tamaño del píxel de 3 m, y un filtro de suavizado para darle continuidad a los valores y ofrecer una mejor representación visual, (fig. 5.15).

La temperatura de la superficie esta inversamente relacionada con el vigor de la vegetación, debido a la evapotranspiración que libera calor, y en consecuencia reduce la temperatura de la cubierta vegetal en comparación con la del suelo desnudo. La imagen térmica muestra en color rojo y amarillo los valores con las temperaturas más altas, relacionadas con las construcciones, las cimas rocosas de los cerros, las áreas con suelo desnudo y vegetación estresada. Por otra parte, los contornos morados y azules corresponden con cuerpos de agua, humedad en el suelo y la vegetación, áreas de cultivo, vegetación vigorosa y zonas de sombra.

En la parte donde se encuentra el sitio arqueológico hay valores de temperatura entre 25 y 30 °C, que pueden considerarse de medianos a altos, sólo la parte sur del sitio entre los cerros La Gasca y Las Ardillas corresponden con valores altos y probablemente pueden tener relación con los rellenos y los vestigios, no obstante, también pueden tener relación con el suelo desnudo y un camino que cruza el sitio. La banda térmica ofrece un indicador general de la distribución de las temperaturas de la superficie y para este tipo de aplicaciones exige una mayor resolución y modelos más efectivos de corrección atmosférica para distinguir

pequeñas diferencias de temperatura y asociarlas con anomalías encima y bajo la superficie.

BANDA TÉRMICA LANDSAT ETM61

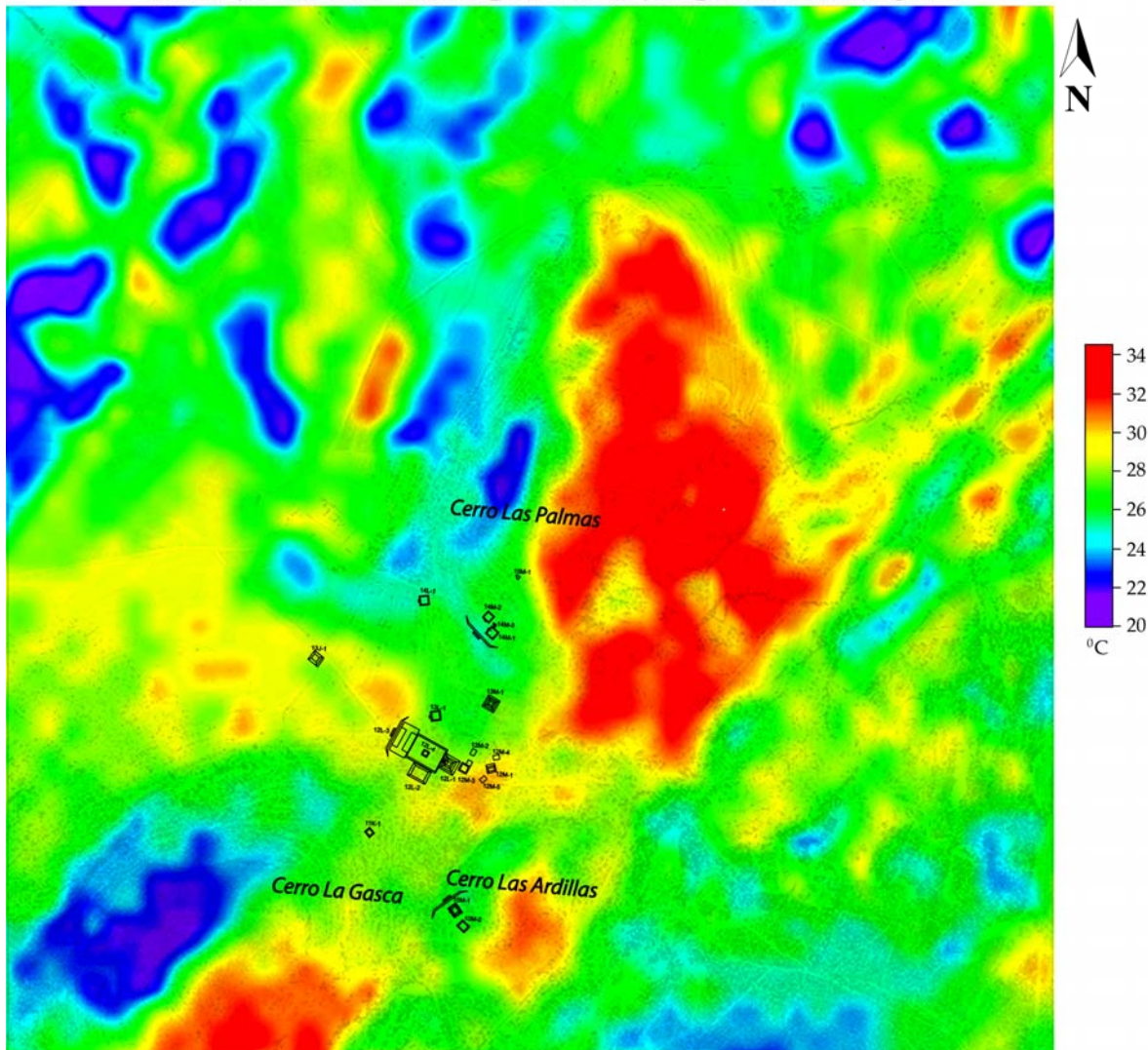


Figura 5.15. Imagen de falso color de la banda térmica Landsat ETM+ de sitio La Laguna.

5.12. CLASIFICACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE LANDSAT ETM+

Los datos derivados de las distintas bandas de *Landsat ETM+* pueden ser analizados por técnicas de clasificación supervisada y no supervisada para extraer información temática útil para nuestra investigación. La clasificación multispectral es una de las técnicas más usadas para la extracción de la información, este procedimiento asume que la imagen de una determinada zona

geográfica adquirida en múltiples bandas del espectro electromagnético se puede utilizar para clasificar las distintas cubiertas sobre la superficie terrestre.

Para este estudio hay que establecer una primera distinción entre las variables que son medidas de modo directo y otras que se derivan a partir de ellas. Las primeras son la reflectancia en el VIS, NIR y SWIR, telemetría y la temperatura. Las variables derivadas son: la clorofila, la humedad del suelo y las plantas, evapotranspiración, entre otras. A partir de estas propiedades, podemos inferir a su vez, información que esté orientada hacia el objeto de estudio, en particular, el impacto que tuvo la cultura que se asentó en el sitio de La Laguna, y que pudo haber dejado algún rastro en el paisaje y en el subsuelo que aún hoy en día lo podemos relacionar indirectamente con el suelo y con las plantas.

Para la clasificación temática de las cubiertas, acorde con las respuestas espectrales y de textura derivadas de los procesos anteriores, se empleó la clasificación supervisada, para esto, previamente se dibujaron los polígonos de entrenamiento sobre las cubiertas más representativas de la imagen para enseñar al programa de clasificación los criterios iniciales para los algoritmos de clasificación: mínima distancia (*Mindist*), paralelepípedos (*Piped*), y máxima probabilidad (*Maxlike*). Como imagen base se utilizó la composición de las componentes principales porque es una de las que mejor separa las distintas cubiertas, (fig. 5.16).

El algoritmo que logró clasificar mejor la imagen fue por el de máxima probabilidad (*Maxlike*), con criterios de igual probabilidad para cada cubierta, (fig. 5.17). En la imagen base se observa un gran número de cubiertas, dentro de cada una se puede distinguir varias categorías, sin embargo, se trató de simplificar la clasificación marcando las categorías más importantes, y sobretodo, las que tuvieran relación con la textura y el color de la zona donde están la mayor parte de las estructuras arqueológicas. Por ejemplo, la zona con roca, tierra seca, suelo desnudo y construcciones, muestran respuestas muy parecidas y es difícil diferenciarlas, por lo que se clasificaron en una sola categoría.

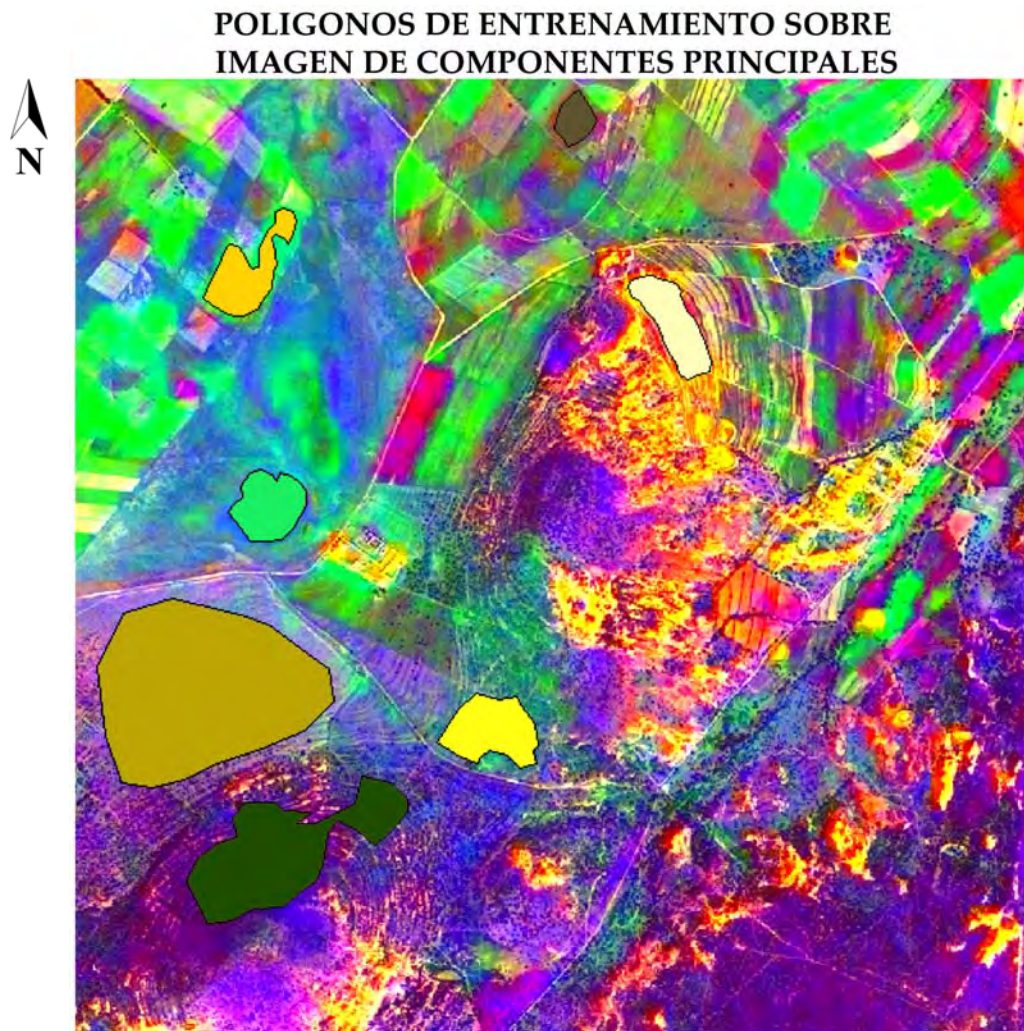


Figura 5.16. Polígonos de entrenamiento en las cubiertas más distintivas de la imagen.

La zona de interés arqueológico se encuentra dentro de tres categorías principales, vegetación vigorosa, vegetación estresada y el bosque. La imagen resultante muestra una clasificación temática general del sitio, aún así, es posible distinguir en la parte central de la imagen, los píxeles morados asociados con el suelo y la vegetación que están sobre las principales estructuras arqueológicas. Por otra parte, en las faldas de los cerros que rodean al sitio, se registran algunas zonas que tienen relación con las terrazas de interés arqueológico, lo cual coincide con los sitios reportados por los recorridos de superficie y que podrían ser verificados en un futuro con excavaciones directas.

La clasificación obtenida es una aproximación a la representación real de los distintos tipos de cubierta sobre el terreno. Marca como zonas culturales algunos

lugares que no corresponden con el sitio arqueológico del Formativo al centro de la imagen, esto se debe a los criterios elegidos en los polígonos de entrenamiento y en algoritmo de clasificación. Es aquí donde los estudios arqueológicos pueden refinar los resultados de la clasificación, de tal forma que podamos contar con un mapa útil para la investigación.

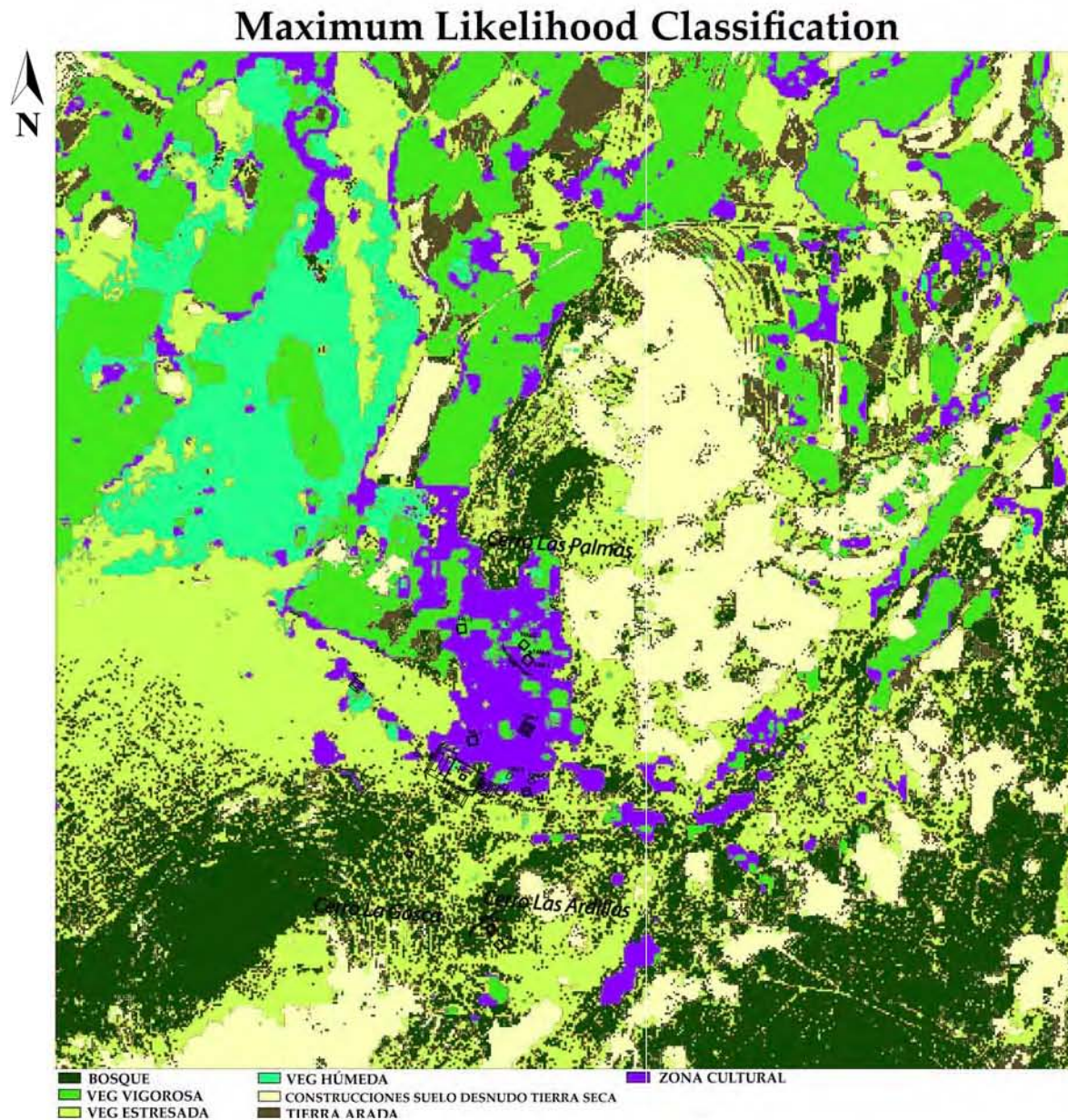


Figura 5.17. Resultado de la clasificación supervisada por el algoritmo de máxima probabilidad.

Después de probar distintas técnicas de procesamiento digital de imágenes y representarlas en composiciones de color para darle una interpretación geo-arqueológica, podemos comentar lo siguiente:

- Las técnicas de fusión de imágenes para mejorar la resolución espacial son una herramienta imprescindible para abordar una investigación de este tipo, ya sería muy complicado distinguir alteraciones inducidas por estructuras arqueológicas de pequeñas dimensiones, comparadas con el tamaño del píxel que ofrecen las imágenes satelitales.
- Es necesario conocer en que zona del espectro electromagnético se ubica cada banda y que información proporciona, con esto podemos interpretar más certeramente los composiciones obtenidas de los distintos procesos aplicados.
- En las composiciones 432, 453 y 547, utilizadas para destacar la vigorosidad de la vegetación y la humedad del suelo y la vegetación, se pueden encontrar elementos que sugieran indirectamente la presencia del sitio arqueológico, sólo si hay el suficiente contraste entre las bandas y que la textura de la cubierta sea distintiva en el área de interés.
- La composición del cociente entre bandas $(5/4)-(7/5)-(7/4)$ empleado para destacar la actividad cultural según (Rothaus R. M., 1999), dio buenos resultados en este lugar, y permitió destacar la zona asociada al sitio con un color y textura particular .
- El uso de la transformación PCA fue muy útil para separar la información redundante y común de las bandas analizadas, con lo que se consiguió utilizar la información más relevante y no correlacionada de las bandas, facilitando de esta forma la interpretación de los datos. Desafortunadamente al ser una técnica puramente estadística, obtenida de los propios datos, no se pueden generalizar los resultados para sitios con otras características o en otras aplicaciones.
- Las composiciones con los índices de vegetación NDVI y SAVI, no aportaron elementos suficientes en las masas vegetales para asociarlos con el sitio, solamente SAVI ofreció una ligera mejora al incorporar el factor suelo y de esta forma distinguir mejor las distintas masas vegetales que pudieran relacionarse con la presencia del sitio.

- La transformación *Tasseled Cap* crea bandas específicas de brillo, verdor y humedad. En la composición obtenida, se evidenció indirectamente la presencia del sitio por el contexto en el que se ubica y por detalles sutiles en el color y la textura de la vegetación. Para aplicarse adecuadamente, el método exige corregir el efecto de las sombras y una rigurosa corrección atmosférica, elementos que no siempre se consiguen.
- La banda térmica que raramente se aplica a este tipo de estudios, ofrece una imagen con la distribución de las temperaturas de la superficie, y en este tipo de aplicaciones también exige una buena corrección atmosférica, para diferenciar pequeñas diferencias de temperatura que permitan relacionarlas con la presencia de vestigios sobre y bajo la superficie.
- La clasificación supervisada para los datos del sitio, necesita del conocimiento de las distintas cubiertas que están sobre el terreno para que genere resultados acordes con la realidad. De los procesos abordados en este trabajo que ofrecieron el mejor contraste en color y en textura relacionados con la zona de interés, destacan las composiciones de: cociente entre bandas y las componentes principales. Cualquiera de estas imágenes podría servir como base para la clasificación, en este caso, se seleccionó la composición de PCA porque cada componente estadísticamente representaba una propiedad particular de la cobertura, el brillo (en todas las bandas), la vigorosidad (ETM4) y la humedad (ETM5), y esto podría aportar elementos físicos para asociarlos indirectamente con la cobertura del sitio. De los algoritmos empleados para la clasificación supervisada, el método de máxima probabilidad (*maxlike*), probó ser mejor, para este caso, que otros métodos que maneja el programa de clasificación. Esto puede ser porque en el área de interés tenemos categorías mixtas de vegetación y suelo, y para este tipo de coberturas parece funcionar mejor el método de máxima probabilidad, al asignarle distintas probabilidades a las coberturas de pertenecer a una clase previamente definida.
- En general, los distintos procesos aplicados estas imágenes satelitales para la investigación geo-arqueológica, ofrecen resultados prometedores, que pueden ser mejorados con un mejor conocimiento del sitio, apoyados en estudios multidisciplinarios para interpretar adecuadamente las imágenes generadas.

5.13. ANÁLISIS E INTERPRECIÓN DE IMÁGENES SPOT 5.

El procesamiento de las bandas del *Spot 5* se realizó con el objetivo de analizar los resultados de un sensor con resolución intermedia entre *Landsat ETM+* y *QuickBird*. Al igual que para estos sensores, el interés es determinar las características directas o indirectas del suelo y la vegetación relacionadas con antiguas transformaciones humanas del paisaje, para este propósito se realizará solamente el análisis de las componentes principales (PCA), que ha demostrado, para este caso, ser un proceso que concentra muy bien la información de todas las bandas en solo tres, con este proceso se espera detectar anomalías sutiles en la cubierta, ya sea espectralmente, en la textura de la imágenes o en las formas, y de esta manera establecer su relación con el contexto arqueológico.

El satélite *Spot5* ofrece imágenes de alta resolución espacial del instrumento *HRG – High Geometrical Resolution–* y el *HRS –High Resolution Stereoscopic–*, en este trabajo sólo se incluyen las imágenes del primer sensor. El *HRG* se diseñó para trabajar de manera simultánea o independiente en el modo pancromático (PAN) o multiespectral (XS), ofreciendo resoluciones de 2.5 m a 5 m y de 10 m, respectivamente, esta cualidad permite generar cartografía de muy buena calidad con un mínimo de distorsión geométrica.

5.13.1. MATERIALES

-Imágenes *Spot 5*

Las imágenes del sensor *HRG* incluyen bandas multiespectrales y pancromáticas, obtenidas de la estación de recepción de *Spot Image* en México, llamada *ERMES*, las cuales fueron solicitadas a la Secretaría de Marina por medio del Dr. Raúl Aguirre del Laboratorio de Análisis Geoespacial del Instituto de Geografía de la UNAM. Las imágenes fueron seleccionadas del catálogo de *Spot Image*, correspondientes al número E55903110604181J2A03001, del 18 de Abril del 2006, los detalles son los siguientes:

Banda	Resolución espectral (µm)	Resolución espacial (m)	Resolución temporal (días)	Resolución radiométrica (bits)	Cobertura Km, <i>swath</i>
B01 (XS1)	0.50 – 0.59 verde	10	2-3 depende de la latitud	8	60
B02 (XS2)	0.61 – 0.68 rojo	10			
B03 (XS3)	0.78 – 0.89 infrarrojo cercano	10			
B04 (SWIR)	1.58 – 1.75 infrarrojo medio	10			
PAN	0.48-0.71 Pancromática	2.5			

Tabla 5.5. Datos de las bandas del sensor *SPOT 5*.

- La firma espectral de la vegetación y el suelo.

El sensor *HRG* de *Spot 5* cuenta sólo con 2 bandas en el visible – verde y rojo-, una en el infrarrojo cercano (NIR) y una en el infrarrojo medio (SWIR), (fig. 5.18). La firma espectral de la vegetación en la banda verde (B01) muestra un ligero aumento de la reflectancia debido a una menor absorción de esta longitud de onda por la clorofila de las hojas, dándole su color verde característico. El suelo desnudo y la vegetación enferma presentan características similares en las bandas B01 y B02, con mayor reflectancia en comparación la vegetación vigorosa. La vegetación vigorosa en la banda roja (B02) presenta baja reflectancia debido a la absorción de esta longitud de onda por los pigmentos de las hojas. En el infrarrojo cercano (B03) la vegetación sana tiene la reflectancia más alta, mientras que, en la vegetación estresada y el suelo desnudo disminuye notoriamente. Para el infrarrojo medio (B04) la reflectancia de la vegetación sana disminuye debido a la absorción de agua por su estructura fisiológica, en contraparte, el suelo desnudo y la vegetación estresada tienen una reflectancia más baja y muy similar. La banda pancromática de *Spot 5* promedia proporcionalmente la reflectancia de las cubiertas en las bandas verde y roja.

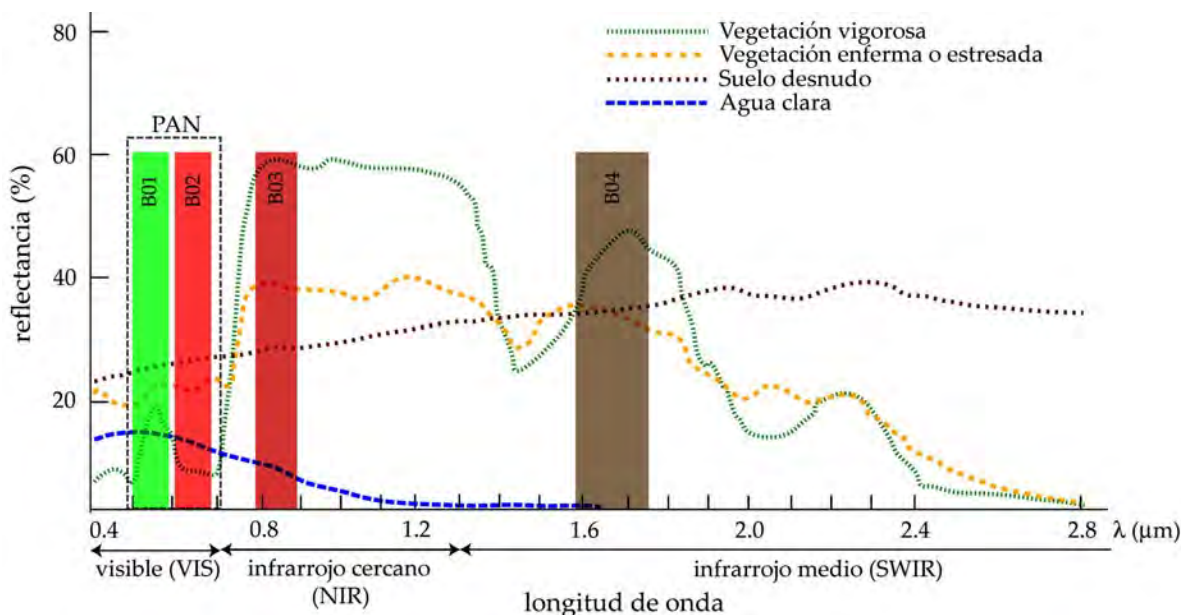


Figura 5.18 Firma espectral de la vegetación, suelo desnudo y agua para las bandas de SPOT 5.

5.13.2. CONVERSIÓN DN-RADIANCIA-REFLECTANCIA Y CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA

- **Conversión DN-Radiancia-Reflectancia.** Las imágenes *Spot 5* tienen un pretratamiento llamado nivel 2A, incluidas dentro de las imágenes que

proporciona la estación de recepción ERMES. Esto incluye la corrección radiométrica de las distorsiones debidas a las desviaciones de sensibilidad entre los detectores del sensor para la toma de imágenes. Corrección geométrica de los efectos sistemáticos (efecto panorámico, curvatura y rotación de la Tierra). Las distorsiones internas de la imagen corregidas permiten medir distancias, de ángulos y de superficie. La corrección geométrica es realizada dentro de la proyección UTM WGS84.

Las imágenes originales, (fig. 5.19), codificadas en números digitales (DN), se transformaron a variables físicas para realizar la interpretación de acuerdo a las observaciones de campo. El primer paso fue obtener la radiancia a partir de los DN originales utilizando la fórmula que está en el manual de *Spot5*, (ver referencia del Manual Técnico de Spot 5), y posteriormente se efectuó la conversión a la reflectancia aparente en el tope de la atmósfera con las fórmulas (4.4), (4.5) y (4.7), para este procedimiento fue necesario obtener los parámetros calibración del sensor, incluidos en el archivo de *metadatos* (ver Apéndice 2), los resultados de los cálculos se muestran en la tabla 5.6.

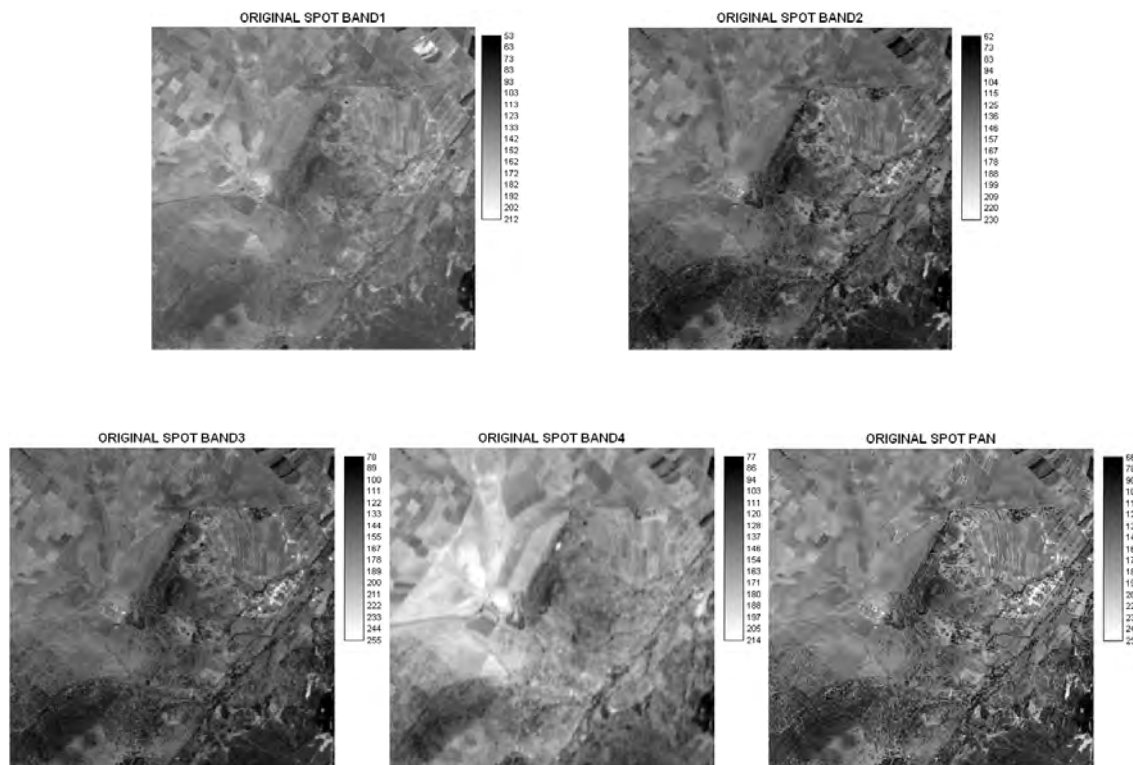


Figura 5.19. Bandas originales, mutiespectrales y pancromática del sensor *HRG* de *SPOT 5*.

Parámetros	Bandas Spot 5				
	Verde B01	Rojo B02	Infrarrojo B03	Infrarrojo medio B04	Pancromática
gain	1.829788	1.597198	1.748925	6.355000	1.955482
bias	0	0	0	0	0
Irradiancia espectral solar	1852	1565	1041	225	1628
Año	2006	2006	2006	2006	2006
Mes	04	04	04	04	04
Día	18	18	18	18	18
Hora	17	17	17	17	17
Minutos	05	05	05	05	05
Segundos	24.3	24.3	24.3	24.3	21.9
Tiempo Universal UT $UT = hh + \frac{mm}{60} + \frac{ss.dddddd}{3600}$	17.09008333	17.09008333	17.09008333	17.09008333	17.08941667
$A = \text{entero}\left(\frac{\text{año}}{100}\right)$	20	20	20	20	20
$B = 2 - A + \text{entero}\left(\frac{A}{4}\right)$	-13	-13	-13	-13	-13
Día Juliano (JD) según (4.7)	2453844.212	2453844.212	2453844.212	2453844.212	2453844.212
$D = JD - 2451545$	2299.212	2299.212	2299.212	2299.212	2299.212
$g = 357.529 + (0.098560028D)$	2623.633	2623.633	2623.633	2623.633	2623.633
$D_{\text{Tierra-Sol}} = 1.00014 - 0.01671 \cos(g) - 0.00014 \cos(2g)$ Distancia Tierra-Sol UA (unidades astronómicas) fórmula (4.7)	0.983970693	0.983970693	0.983970693	0.983970693	0.983970693
Angulo elevación Solar	67.236475	67.236475	67.236475	67.236475	67.225673
Angulo cenital solar $\theta_i = 90 - \theta_{\text{elevación solar}}$	22.763525	22.763525	22.763525	22.763525	22.774327
Radiancia espectral promedio que recibe el sensor al tope de la atmósfera ($L_{\lambda \text{ sen},k}$)	(DN/gain) +bias	(DN/gain) +bias	(DN/gain)+b ias	(DN/gain) +bias	(DN/gain) +bias
Reflectancia espectral aparente al tope de la atmósfera $\rho_k = \frac{D_{\text{Tierra-Sol}}^2 \pi L_{\lambda \text{ sen},k}}{E_{0,k} \cos \theta_i}$	0.000973397 * ($L_{\lambda \text{ sen},k}$)	0.001319649 * ($L_{\lambda \text{ sen},k}$)	0.001811798 * ($L_{\lambda \text{ sen},k}$)	0.002306925 * ($L_{\lambda \text{ sen},k}$)	0.001036234 * ($L_{\lambda \text{ sen},k}$)

Tabla 5.6. Parámetros para el cálculo de la radiancia y reflectancia de las bandas de SPOT 5.

- **Corrección atmosférica**

Posteriormente se realizó la corrección atmosférica a las imágenes de reflectancia para minimizar la dispersión y absorción de la radiación por la atmósfera. Cabe señalar que este efecto ya de por sí está minimizado en las imágenes originales, debido a que la mayor parte de la dispersión se da en la banda azul, y esta banda no la posee el sensor HRG. Para hacer la corrección atmosférica es deseable contar con los coeficientes atmosféricos de transmisividad incidente estándar, sin embargo para *Spot 5* aún no se tienen, en este sentido, la forma práctica sería utilizar la información contenida en los propios datos, mediante el ajuste del histograma al origen. Para esto se asume que el histograma de una imagen siempre presenta un valor mayor a cero debido principalmente a la dispersión atmosférica, el procedimiento consiste en restar el valor mínimo del histograma de cada banda, de tal forma que el cero siempre sea el valor mínimo, con esto aseguramos que la reflectancia registrada se aproxima a la reflectancia real de la cubierta. Las imágenes corregidas atmosféricamente son las siguientes (fig. 5.20):

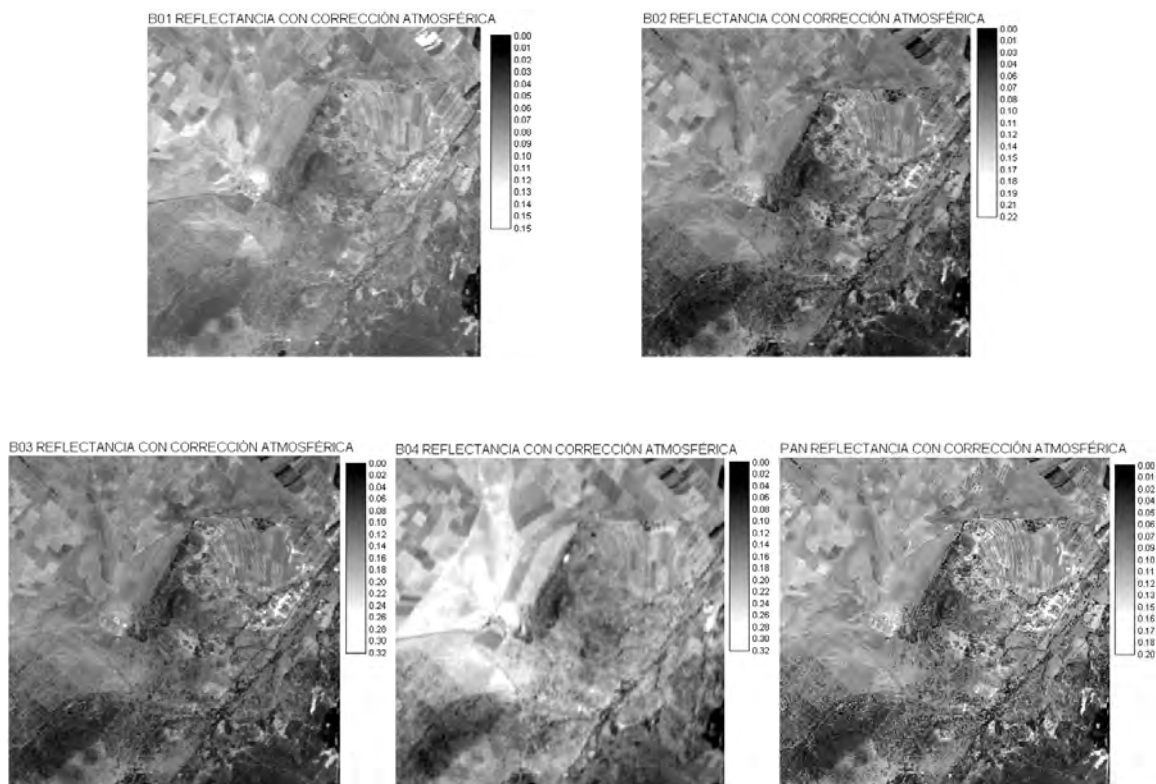


Figura 5.20. Reflectancia de las bandas multiespectrales y pancromática del sensor HRG de SPOT 5, corregidas atmosféricamente.

5.13.3 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES Y CLASIFICACIÓN SUPERVISADA

Una vez corregidas atmosféricamente las imágenes, se realizó el análisis de las componentes principales (PCA) a las bandas de *SPOT 5*, con el cual se obtuvieron nuevas bandas con cuatro componentes no correlacionadas. Posteriormente se fusionaron con la imagen pancromática por el método *pansharpen RGB-HLS* (ver apartado 4.4.1) para aumentar la resolución espacial y obtener la composición de falso color.

El proceso PCA es especialmente útil cuando se emplea para comprimir la información de varias bandas en sólo tres PC1, PC2 y PC3, con una pérdida insignificante de información y generar una composición de color que represente adecuadamente la información más importante contenida en las distintas clases espectrales. Cabe mencionar que la interpretación de dichas componentes no es universal, ya que se extraen de los propios datos, y corresponden con el momento y las condiciones particulares de las distintas cubiertas sobre el terreno, esto resulta muy útil en estudios multitemporales y en la detección de cambios.

Para auxiliarnos en la interpretación de los datos empleamos la matriz de carga, observamos que el mayor porcentaje de varianza está en las componentes principales 1 y 2, sumando el 92.28 % de total de la varianza de los datos. Si le sumamos la varianza de la componente 3, el porcentaje de varianza acumulada será del 99.62 %, comprimiendo prácticamente toda la información de las cuatro bandas en sólo 3, con una pérdida menor al 0.5 % de la información, (tabla 5.7).

COMPONENTE	C 1	C 2	C 3	C 4
% var.	88.135165	8.151938	3.336832	0.376071
% var. acumulativa	88.135165	96.287103	99.623935	100
Banda	C 1	C 2	C 3	C 4
B01 0.50 - 0.59 (μm)	0.948796	0.02907	-0.314528	0.003633
B02 0.61 - 0.68 (μm)	0.970636	-0.202227	0.093957	-0.090229
B03 0.78 - 0.89 (μm)	0.957876	-0.25275	0.108323	0.082815
B04 1.58 - 1.75 (μm)	0.874947	0.469526	0.118253	0.005493

Tabla 5.7. Matriz de carga generada del análisis de componentes principales (PCA) de las bandas de *SPOT 5*.

Otra herramienta útil para el análisis de la información es la gráfica de los coeficientes de carga con respecto a la longitud de onda central de cada banda de

SPOT 5, (fig. 5.21). La primera componente, PC1 (curva gris oscuro), tiene un comportamiento casi constante, disminuyendo ligeramente hacia las bandas infrarrojo (B03) e infrarrojo medio (B04). Esta componente representa el albedo o el aporte de brillo de cada banda al total de la componente, (fig. 5.22 a).

La segunda componente, PC2 (curva verde), la forma de la curva es parecida a la firma espectral de la vegetación desplazada hacia el infrarrojo medio. Presenta un incremento en la banda verde (B01), un mínimo en el rojo (B02) y en el infrarrojo (B03), hasta llegar a un máximo en el infrarrojo medio (B04). Esta componente parecer representan el contenido de humedad en el suelo y la vegetación en la banda 4, y puede influir indirectamente en el desarrollo de la vegetación, ya sea promoviendo o limitando su desarrollo por las características del suelo y posiblemente por las estructuras arqueológicas debajo de la superficie, (fig. 5.22 b).

La tercera componente, PC3 (curva azul), no tiene una interpretación sencilla. Si observamos la gráfica y la tabla 5.7, veremos que entre B01 y B02 la curva es similar a la firma espectral de la vegetación estresada, y el segmento entre B02 y B04 es parecido a la firma espectral del suelo húmedo, entonces, la combinación de estas dos características podría representar la respuesta de la vegetación estresada asociada a las características de humedad del suelo, (fig. 5.22 c).

La componente PC4, no ofrece información útil para el análisis ya que su aporte es mínimo al representar menos del 0.5% de la información, constituye el aporte de ruido de cada banda, (fig. 5.22 d).

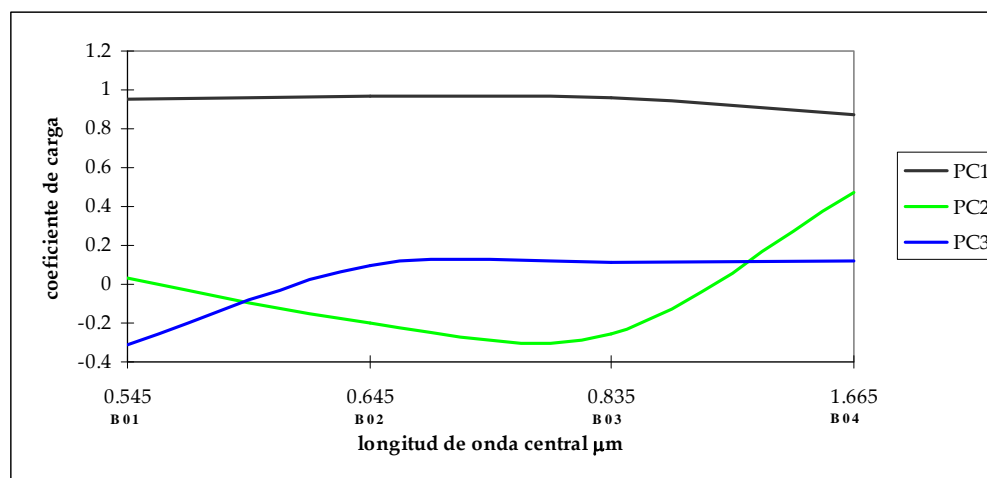


Figura 5.21. Representación de los coeficientes de carga con respecto a las bandas de multispectrales de *Spot 5*.

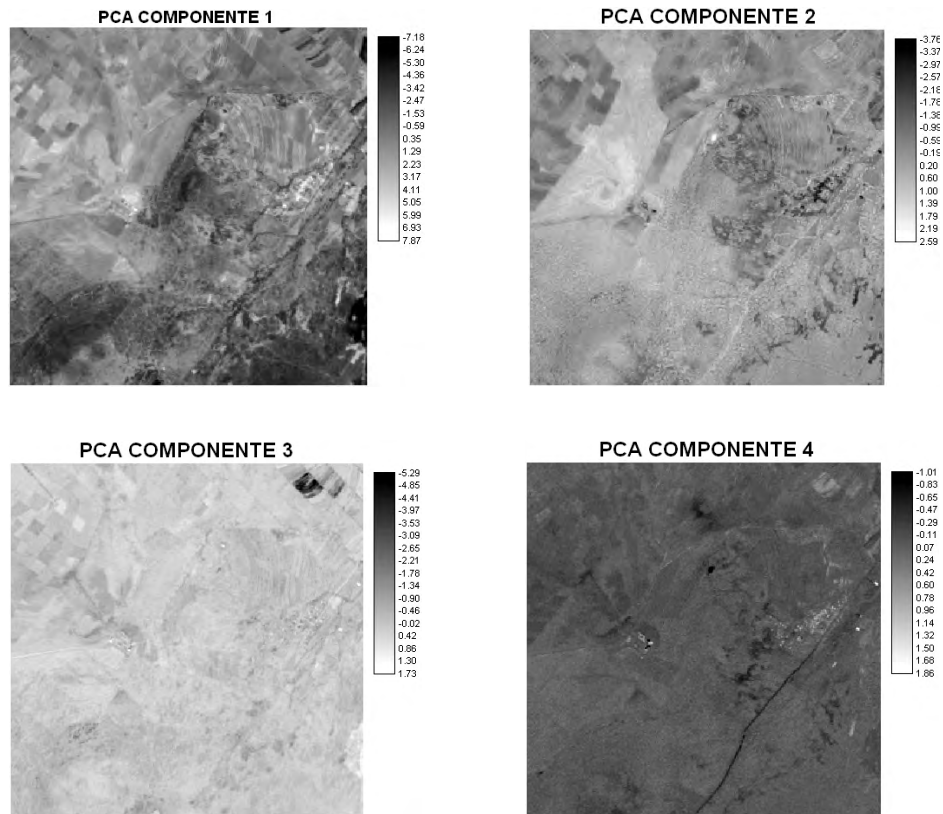


Figura 5.22. Componentes principales de las bandas multiespectrales *SPOT 5*.

En la composición de falso color obtenida del análisis de las componentes principales PC1-PC2-PC3, (fig. 5.23), el canal rojo corresponde con la componente PC1 para el brillo y el detalle espacial, en el verde la componente PC2 se asocia con la humedad en el suelo y la vegetación, y en el azul la componente PC3 se relaciona con la respuesta de la vegetación estresada ligada a la humedad del suelo.

En la componente PC1, el color rojo y magenta se relacionan con las zonas de suelo desnudo, tierra seca y construcciones, que aportan gran parte del brillo de la imagen.

El color verde y el amarillo, corresponden principalmente con la componente PC2 y PC1, la vegetación y el suelo con más humedad se presentan en color verde, relacionado principalmente con una parte de los bosques, suelos húmedos y algunas zonas de cultivo. Por otra parte, el color amarillo está relacionado con suelos y vegetación sana con menor cantidad de humedad.

Para el color azul, correspondiente a la componente PC3, se interpreta que las áreas con vegetación abundante, terrenos arados y suelos, presentan colores azules que varían de tonalidad, áreas con suelos secos y vegetación estresada presentan tonalidades claras, mientras que, las zonas de suelos y vegetación con un ligero incremento de humedad presentan más tonalidades oscuras.

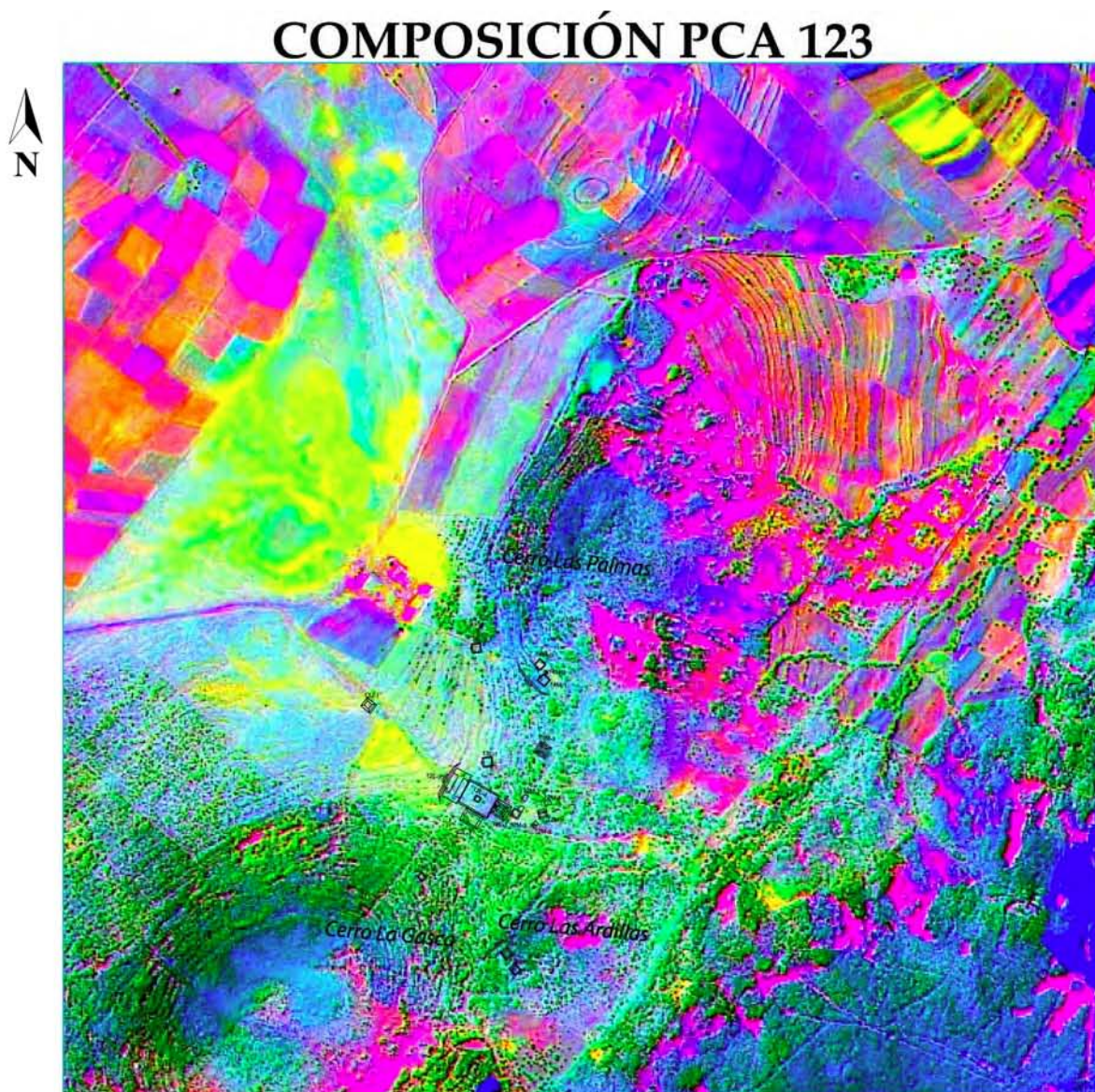


Figura 5.23. Composición de falso color de las componentes principales PC1 PC2 PC3.

En la zona donde se encuentra gran parte del asentamiento arqueológico se observan principalmente los colores verde y azul, así como la mezcla aditiva de ambos, el color cian. Las características de la vegetación en esta zona se interpretaron en base a la tonalidad y la textura, como vegetación sana y en mayor proporción como semiestresada. Por otra parte, la humedad del suelo y la vegetación son de tonalidades azules intermedias, esto significa que el terreno debe retener agua, debido probablemente a la acumulación de depósitos coluviales sobre las estructuras constructivas debajo de la superficie.

La imagen de las componentes principales no revela un patrón evidente y fácil de interpretar, las características espectrales de la vegetación y el suelo en la zona central, pueden ser resultado de la combinación de las estructuras arqueológicas enterradas y los depósitos acumulados después de que el sitio fue abandonado. La interpretación en estos casos debe hacerse en conjunto, con la densidad de la vegetación, la textura de la imagen, la respuesta espectral del suelo y la vegetación, así como el contexto arqueológico. Con estos elementos, la composición PCA muestra sutilmente, entre los cerros La Gasca y Las Palmas, la zona donde se encuentra sepultado la parte nuclear del sitio.

- **Clasificación supervisada**

Finalmente se realizó la clasificación supervisada empleando como imagen base las componentes principales, los criterios que se utilizaron para los polígonos de entrenamiento y posteriormente generar el mapa temático fueron el color, tono, textura y el contexto en el que se ubicaban dentro de la imagen, (fig. 5.24). Después que se establecieron las distintas clases se corrió el programa de clasificación por máxima probabilidad (*Maxlike*) del programa *ENVI EX V4.7* que en comparación con *Idrisi* dio mejores resultados. Con el método de máxima probabilidad se logró clasificar mejor las distintas coberturas en zonas mixtas o en donde no estaban claramente diferenciadas.

El mapa temático obtenido a partir de esta clasificación contiene las principales clases del terreno para ese momento. La zona de interés, en el centro de la imagen, está entre las categorías bosque, vegetación estresada, suelo desnudo. La mezcla de estas categorías, su color y textura, dan como resultado una clase muy particular que se interpretó de acuerdo al contexto y a los antecedentes arqueológicos como la zona cultural que contiene gran parte del asentamiento del formativo. La clase de color violeta, asigna las áreas del terreno que se ajustan a los criterios de clasificación, sin embargo, hay zonas del terreno que no parecen tener mucha relación con la zona cultural, como las que encuentran lejos del área nuclear del

sitio. Es necesario realizar verificaciones de campo fuera del área central para comprobar los resultados de la clasificación.

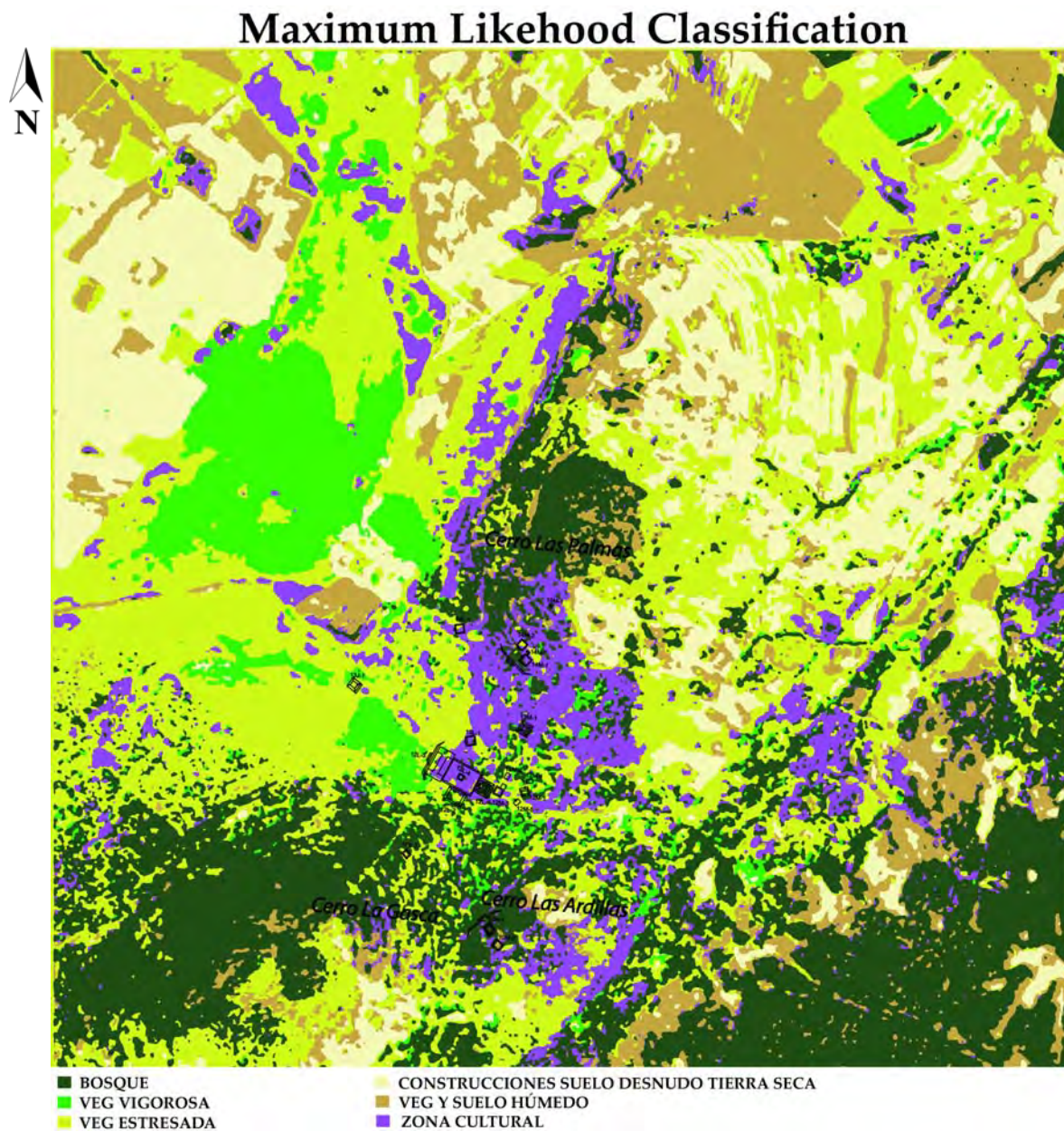


Figura 5.24. Mapa temático generado con la clasificación supervisada utilizando el criterio de máxima probabilidad.

La clasificación con el sensor de *Spot 5* sigue siendo gruesa y similar a la del sensor de *Landsat ETM+*, sin embargo, la resolución es un poco más fina permitiendo distinguir elementos individuales dentro de la zona cultural.

6. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN GEO-ARQUEOLÓGICA DE IMÁGENES QUICKBIRD.

En este capítulo se aborda el procesamiento e interpretación de las imágenes multiespectrales adquiridas con el sensor de alta resolución de *QuickBird*, para la extracción de características directas o indirectas en el suelo y la vegetación, ligadas con antiguas transformaciones humanas del paisaje. Actualmente, *QuickBird* es uno de los satélites comerciales que proporciona imágenes alta resolución espacial con sus sensores, (61-72 cm) para la banda pancromática y (2.44 2.88 m) para las bandas multiespectrales. Una de las principales ventajas de los datos de satélite *QuickBird* en comparación con fotografías aéreas, es la posibilidad de aprovechar las propiedades de los datos multiespectrales.

La capacidad espectral junto con la alta resolución espacial de los sensores de *QuickBird*, *BGIS 2000* y *BHRC 60*, hacen que las imágenes de este satélite sean una fuente de información valiosa para la investigación arqueológica, que va desde los pequeños detalles, es decir, marcas sobre el terreno y pequeñas estructuras, hasta una perspectiva en conjunto, como es, la arqueología del paisaje. Los estudios más recientes han estado enfocados en determinar la capacidad de las imágenes *QuickBird* en la reconstrucción de la forma urbana de los asentamientos enterrados y en la detección de pequeñas construcciones sobre la superficie, (Lasaponara et al, 2007). El desarrollo de este capítulo mostrará el uso de este tipo de imágenes para la investigación dirigida a la detección de características vinculadas con antiguos cambios humanos al paisaje.

6.1 MATERIALES

-Imágenes *QuickBird*

Las imágenes en modo *bundle*, multiespectral y pancromático, fueron seleccionadas del catálogo de *Digital Globe*, correspondientes al número 90100100746C4A00, del 4 de Abril del 2009, los detalles son los siguientes:

Banda	Resolución espectral (μm)	Resolución espacial (m)	Resolución temporal (días)	Resolución radiométrica (bits)	Cobertura Km^2 , <i>swath</i>
B01	0.45 – 0.52 azul	2.44	2.4	11	16.8
B02	0.52 – 0.60 verde	2.44			
B03	0.63 – 0.69 rojo	2.44			
B04	0.76 – 0.90 infrarrojo	2.44			
PAN	0.45-0.90 Pancromático	0.61			

Tabla 6.1. Datos de las bandas del sensor *QuickBird*.

- La firma espectral de la vegetación y el suelo.

La firma espectral de la vegetación para las bandas de *QuickBird*, figura 6.1, posee menor reflectancia para la vegetación vigorosa en las bandas del visible (azul y rojo), debido a la absorción de la radiación solar por la clorofila en las bandas B01 (0.45– 0.52 μm) y B03 (0.63-0.69 μm). Para la banda B02 (0.52-0.60 μm) hay un aumento en la reflectancia, debido a que esta longitud de onda no es tan absorbida por los principales pigmentos de las plantas, es por esto que la combinación de los pigmentos y la estructura fisiológica produce el color característico de la vegetación. Para otras cubiertas como la vegetación enferma, suelo desnudo y agua, la reflectancia varía en un margen menor.

Otra banda muy importante de este sensor es el infrarrojo cercano, B04 (0.76-0.90 μm), para estas longitudes de onda el incremento en la reflectancia para la vegetación es muy notorio, aumenta incluso cuando la vegetación está enferma o estresada. Para el suelo desnudo hay un ligero aumento lineal en las bandas del visible, mientras que, para el agua clara hay una disminución significativa. La banda pancromática de *QuickBird* promedia proporcionalmente la reflectancia de las cubiertas en todas las bandas.

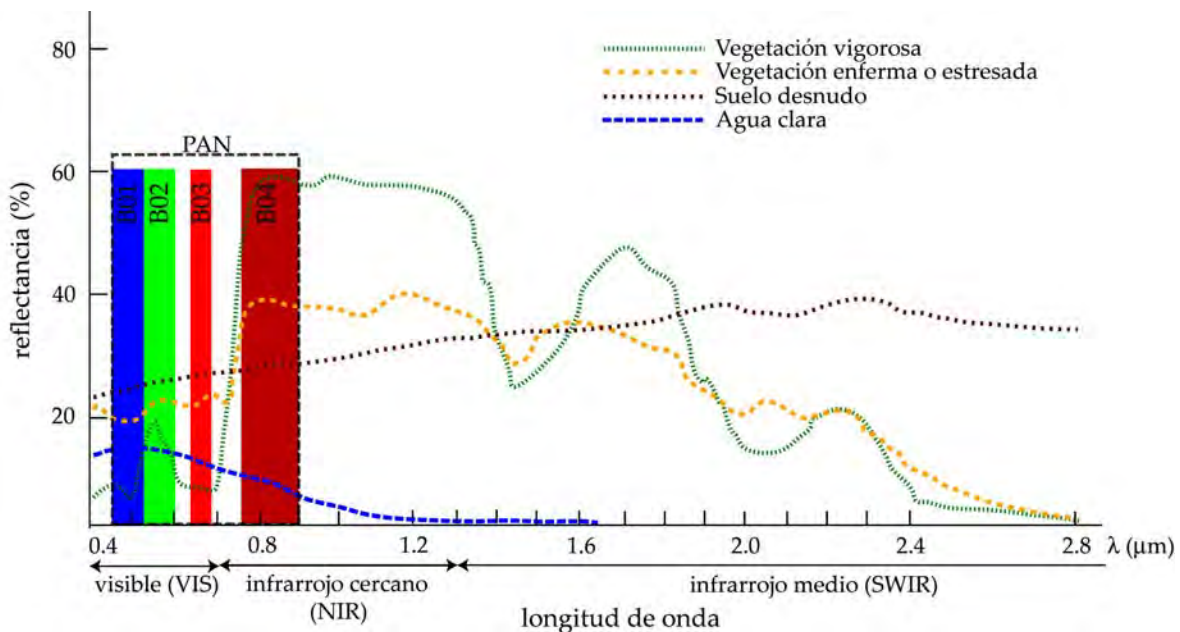


Figura 6.1 Firma espectral de la vegetación y otras cubiertas con las bandas de *QuickBird*.

A diferencia de *Landsat ETM+*, *QuickBird* no cuenta con bandas en el SWIR y en el TIR, lo cual limita el análisis a solo 5 bandas, incluyendo la pancromática, aún así se pueden hacer la mayoría de los procesos descritos para este trabajo, con la ventaja adicional de tener una resolución espacial muy superior, con la cual es

posible distinguir cubiertas de orden métrico a sub-métrico, adecuadas para los estudios arqueológicos.

6.2 PREPARACIÓN DE LAS IMÁGENES

Las imágenes originales cubren un área de 25 Km², muy grande para el nivel de detalle requerido en aplicaciones arqueológicas. Para tener un conjunto de imágenes adecuadas, fue necesario seleccionar un área más pequeña sin perder información de los elementos más importantes de la escena. Para este propósito, al igual que con las imágenes de *Landsat ETM+*, se escogió un área de 9 Km² (3 Km E-W x 3 Km N-S), con la parte nuclear del sitio en el centro de las imágenes.

Siguiendo un procedimiento similar al de las imágenes *Landsat*, se recortó la imagen original para obtener las imágenes que serían procesadas, los pasos fueron los siguientes:

- Recorte de las imágenes originales de *QuickBird* con el programa *Idrisi Taiga*, con una selección de 3 x 3 Km del área de interés, con puntos de control reconocibles en la superficie y correspondientes con las imágenes *Landsat ETM+*.
- Obtención de las imágenes multiespectrales en coordenadas UTM Z14 WGS84 : min x= 603104.4, max x= 606104.4, min y= 2156775.6, max y= 2159775.6, (fig. 6.2).
- Para la imagen pancromática, se recortó en las coordenadas: min x= 603104.1, max x= 606104.1, min y= 2156775.3, max y= 2159775.3, que es el mejor ajuste permitido por el programa *Idrisi Taiga*.
- Se comparó las imágenes multiespectrales y la pancromática, observándose un pequeño desfase de 0.30 m, tolerable para el área cubierta y previo a la fusión con las imágenes multiespectrales.

6.3. CONVERSIÓN DN-RADIANCIA-REFLECTANCIA

La imagen original está en valores de DN (fig. 6.2), estos se convirtieron a variables físicas, para basar las interpretaciones en información consistente con las observaciones de campo. Para realizar la conversión, primero se obtuvo la radiancia a partir de los DN originales, y posteriormente se convirtieron a la reflectancia aparente en el tope de la atmósfera (fig. 6.3), empleando las fórmulas (4.4), (4.5) y (4.7), (4.9), y los parámetros calibración del sensor, contenidos en el archivo de *metadatos* (ver Apéndice 3), los valores necesarios para los cálculos se muestran en la tabla 6.2.

Parámetros	Bandas QuickBird				
	Azul B01	Verde B02	Rojo B03	Infrarrojo B04	Pancromática
absCalfact	191.60	196.50	152.90	241.10	31.06
Ancho de banda efectiva $\Delta\lambda_{banda}$ (μm)	-6.20	-6.40	-5.00	-5.1	-1.00
Irradiancia espectral solar	1924.59	1843.08	1574.77	1113.71	1381.79
Angulo de elevación solar	67.8	67.8	67.8	67.8	67.8
Angulo cenital solar	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2
Año	2009	2009	2009	2009	2009
Mes	04	04	04	04	04
Día	04	04	04	04	04
Hora	17	17	17	17	17
Minutos	22	22	22	22	22
Segundos	23.68471	23.68471	23.68471	23.68471	23.454467
Tiempo Universal UT $UT = hh + \frac{mm}{60} + \frac{ss.ddddddd}{3600}$	17.37324	17.37324	17.37324	17.37324	17.37318
$A = \text{entero}\left(\frac{\text{año}}{100}\right)$	20	20	20	20	20
$B = 2 - A + \text{entero}\left(\frac{A}{4}\right)$	-13	-13	-13	-13	-13
Día Juliano (JD) según (4.7)	2454926.224	2454926.224	2454926.224	2454926.224	2454926.224
$D = JD - 2451545$	3381.224	3381.224	3381.224	3381.224	3381.224
$g = 357.529 + (0.098560028D)$	3690.064208	3690.064208	3690.064208	3690.064208	3690.064208
$D_{Tierra-Sol} = 1.00014 - 0.01671 \cos(g) - 0.00014 \cos(2g)$ Distancia Tierra-Sol UA (unidades astronómicas) fórmula (4.7)	1.00029873	1.00029873	1.00029873	1.00029873	1.00029873
Angulo elevación Solar	67.8	67.8	67.8	67.8	67.8
Angulo cenital solar $\theta_i = 90 - \theta_{\text{elevación solar}}$	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2
Radiancia espectral al tope de la atmósfera ($L_{\lambda,k}$)	$\frac{(absCalFactor)(Q_k)}{Q_k = DN, \text{ en B01}}$	$\frac{(absCalFactor)(Q_k)}{Q_k = DN, \text{ en B02}}$	$\frac{(absCalFactor)(Q_k)}{Q_k = DN, \text{ en B03}}$	$\frac{(absCalFactor)(Q_k)}{Q_k = DN, \text{ en B04}}$	$\frac{(absCalFactor)(Q_k)}{Q_k = DN, \text{ en PAN}}$
Radiancia espectral promedio que recibe el sensor al tope de la atmósfera ($L_{\lambda, sen,k}$)	$(L_{\lambda, sen,k}) / \Delta\lambda$	$(L_{\lambda, sen,k}) / \Delta\lambda$	$(L_{\lambda, sen,k}) / \Delta\lambda$	$(L_{\lambda, sen,k}) / \Delta\lambda$	$(L_{\lambda, sen,k}) / \Delta\lambda$
Reflectancia espectral aparente al tope de la atmósfera $\rho_k = \frac{D_{Tierra-Sol}^2 \pi L_{\lambda, sen,k}}{E_{0,k} \cos \theta_i}$	0.000416149 * $(L_{\lambda, sen,k})$	0.000267658 * $(L_{\lambda, sen,k})$	0.00038484 * $(L_{\lambda, sen,k})$	0.000412463 * $(L_{\lambda, sen,k})$	0.000398045 * $(L_{\lambda, sen,k})$

Tabla 6.2. Parámetros para el cálculo de la radiancia y reflectancia de las bandas de QuickBird.

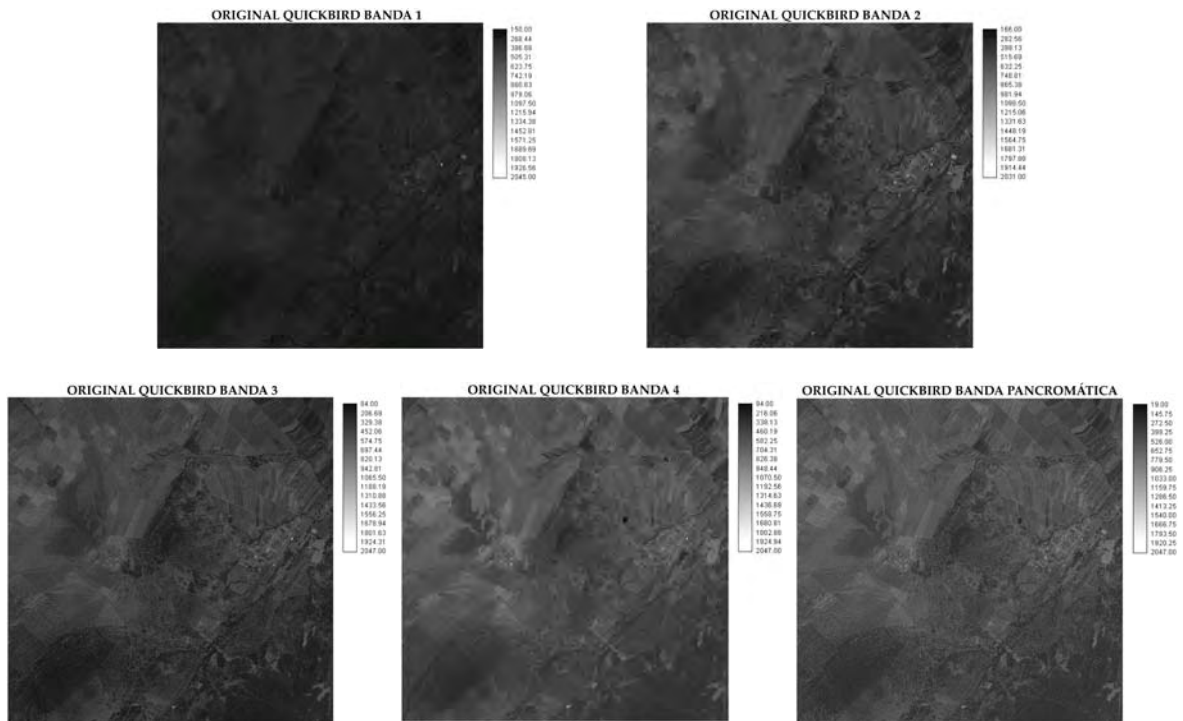


Figura 6.2. Bandas originales, mutiespectrales y pancromática del sensor de *QuickBird*.

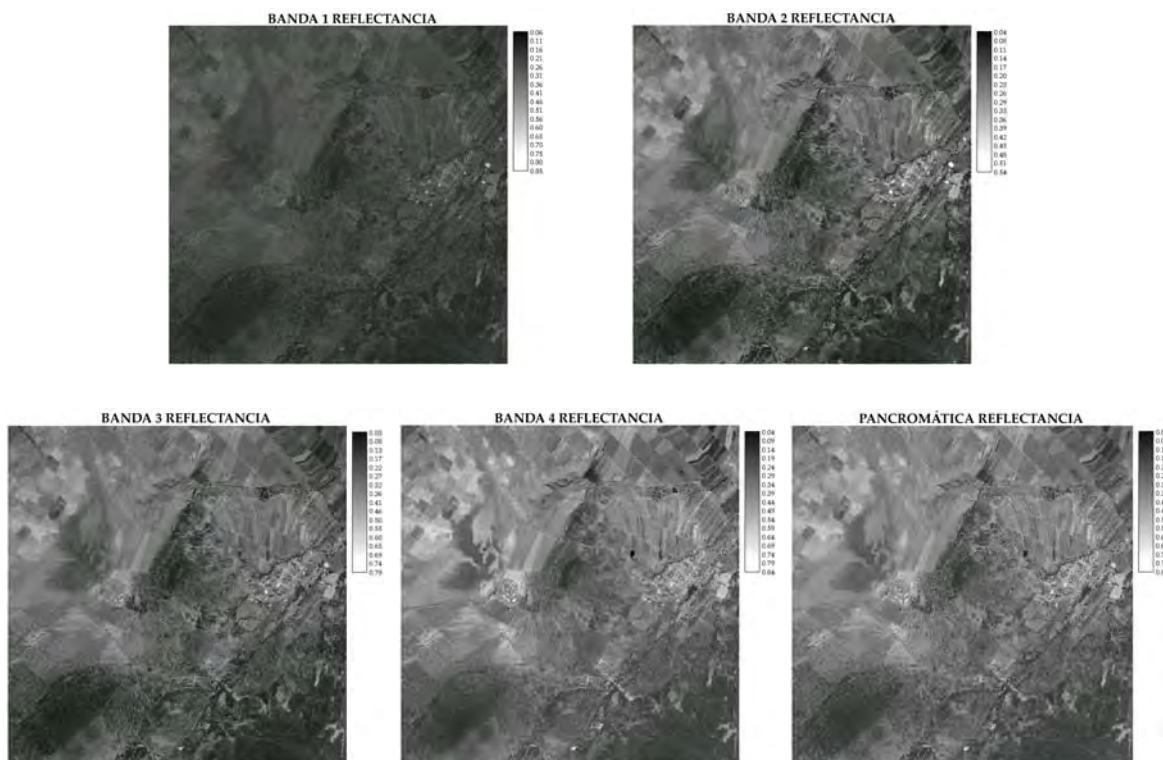


Figura 6.3. Conversión a reflectancia a partir de la radiancia y los DN originales.

6.4 CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA

Con el objetivo de recuperar la reflectancia real de la superficie y minimizar la dispersión y absorción de la atmósfera, se corrigieron las imágenes de reflectancia por dispersión atmosférica. Para *QuickBird* no hay hasta el momento valores para estimar los coeficientes atmosféricos de transmisividad incidente, como los obtenidos para *Landsat ETM+*, la propuesta más viable es utilizar la información contenida en los propios datos. El histograma de la imagen siempre presenta un valor mayor a cero debido principalmente a la dispersión atmosférica, para minimizar este efecto se asumió que la reflectancia real de la cubierta corresponde aproximadamente con el mínimo del histograma de la imagen, de esta forma al restar este valor mínimo para cada banda se ajusta el histograma al origen y la mayor parte de este efecto se elimina. Las imágenes corregidas son las siguientes (fig. 6.4):

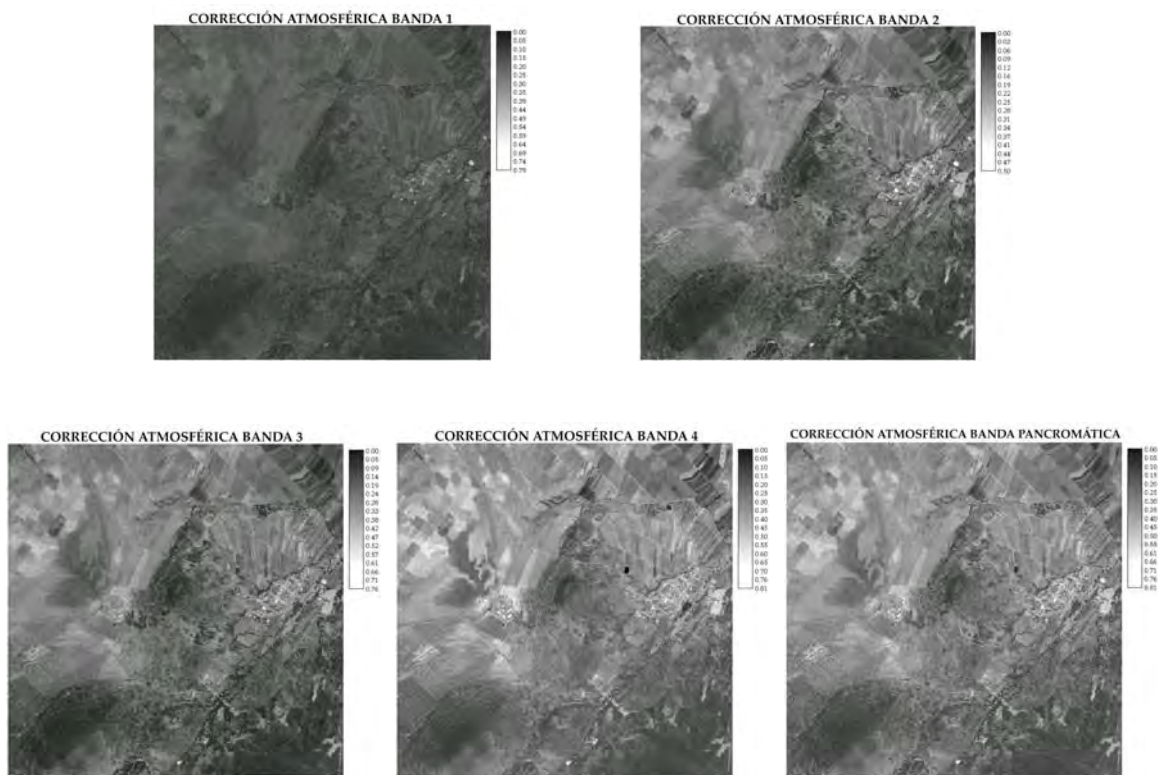


Figura 6.4. Bandas multispectrales QuickBird corregidas atmosféricamente por el método del mínimo del histograma (HMM).

6.5 FUSIÓN DE IMÁGENES *QUICKBIRD*

Las imágenes de *QuickBird* tienen la resolución espacial suficiente para reconocer directa o indirectamente rasgos arqueológicos sobre la superficie, 2.44 m para las bandas multiespectrales y 0.61 m para la pancromática, sin embargo, se pueden procesar las imágenes multiespectrales para que adquieran la resolución de la pancromática, mediante la fusión de imágenes, y de esta forma obtener una resolución 4 veces mayor, adecuada para detectar sobre la superficie detalles de interés arqueológico.

Una vez corregidas atmosféricamente las imágenes se realizó el proceso de fusión por los métodos RGB-HLS (*color space transformation*) y por PCT (*principal component transformation*), las dos técnicas produjeron imágenes similares y de buena calidad, con un buen acoplamiento entre la parte espacial y la luminosidad de la banda pancromática con las bandas multiespectrales, la figura 6.5 muestra los resultados obtenidos con el método RGB-HLS. Estas fueron las imágenes base que se utilizaron para las composiciones de color y para los procesos realizados en este trabajo.

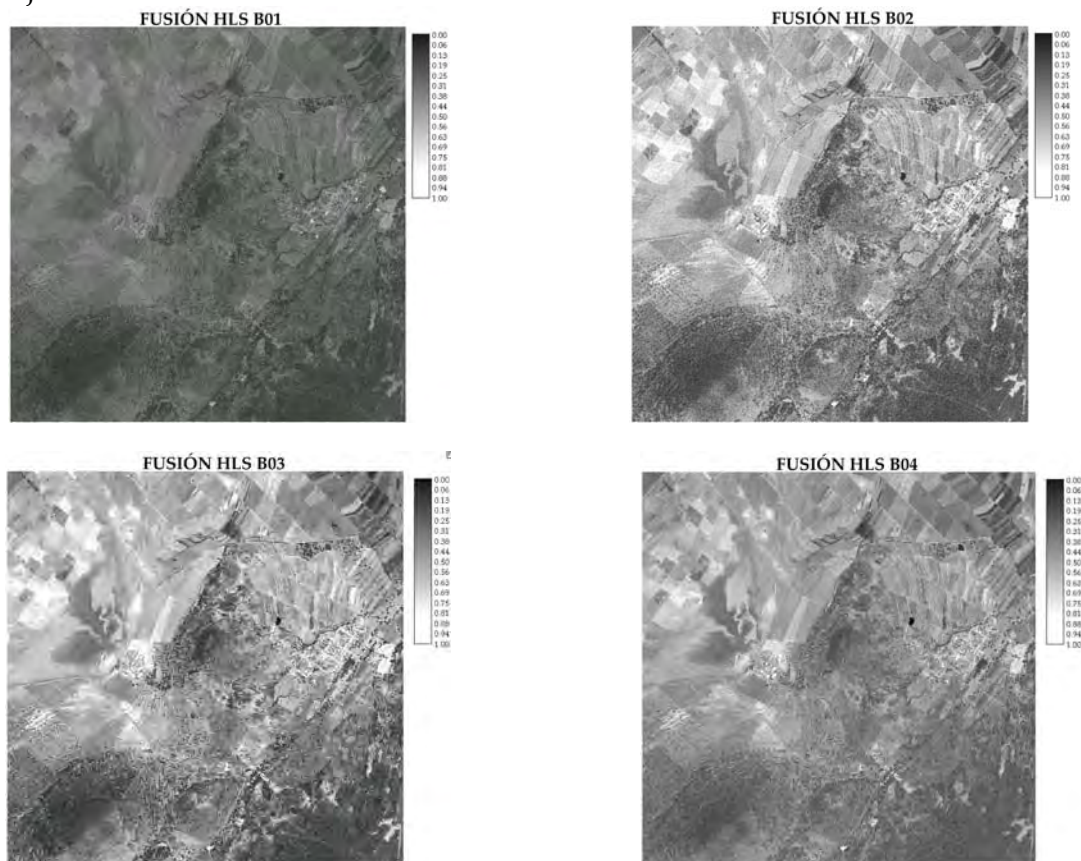


Figura 6.5. Fusión de imágenes multiespectrales con la imagen pancromática de *QuickBird* por el método RGB-HLS.

6.6 COMPOSICIONES DE COLOR

La composición RGB correspondiente a las bandas de *QuickBird* quedarán condicionadas, independiente de las capacidades ofrecidas por el sensor del satélite, por aquellos rasgos de la cubierta que se desea destacar, y la asignación de colores además de ser determinada por dicho factor puede corresponder a un criterio de interés particular, por ejemplo, el estrés de las plantas. Aún con la limitante del número de bandas, menor en comparación con *Landsat*, existen ciertas combinaciones que fueron de particular interés, sobre todo asociadas con la salud de las plantas y con las propiedades del suelo.

La composición de color natural incluye a las tres bandas del visible (321), y se le asigna a cada una de ellas su color verdadero, resultando en la composición que se aproxima a los colores naturales de la escena. La vegetación aparece en diversos tonos de verde, los bosques en la parte Sur se presentan en tonos verde oscuro, mientras que, los cultivos en la parte Noreste están en color verde claro y los suelos se presentan en colores grises, amarillos y marrones en distintas tonalidades. Esta composición es útil para registrar sólo los rasgos que son evidentes en el visible, como el cambio en el color del suelo que se observa en distintas zonas de la imagen, (fig. 6.6).

La composición RGB (321), muestra las distintas coberturas que se pueden obtener desde la fotografía aérea común, sin embargo, se puede observar que el área donde está la zona arqueológica, hay patrones sutiles en la coloración del suelo que podrían sugerir diferencias en los materiales de cobertura, asociados a los suelos y sedimentos que rellenaron la plaza central, el juego de pelota y las estructuras arqueológicas mayores durante dos mil años.

La imagen de *QuickBird* corresponde al mes de Abril del 2009, época donde la vegetación está seca y donde inicia la siembra, la mayor parte de los campos son de agricultura de temporal y es de esperarse que las imágenes muestren poco contraste entre la vegetación y algunos tipos de cubiertas en los suelos.

COMPOSICIÓN 321



Figura 6.6. Composición de color natural 321.

La composición 432 (infrarrojo-rojo-verde) muestra en la parte NE de la imagen franjas de color rojo intenso, correspondientes a campos de riego con vegetación vigorosa, (fig. 6.7). La zona que se inunda durante la época de lluvias, al NW de la imagen, generalmente presenta colores rojos medios y grises oscuros, debidos a la absorción de la banda infrarroja por el agua presente en el terreno saturado, el color rojo medio que rodea esta zona es debido a los pastizales que cuentan con suministro de agua permanente. Los suelos desnudos, en los valles y las zonas rocosas en los cerros, presentan coloraciones cremas y colores grises azulados. Los bosques generalmente poseen colores rojos, de tonalidades medias a fuertes, mientras que los pastizales secos y la vegetación estresada poseen un color rojo muy tenue. La zona central, donde se encuentra la mayoría de las estructuras

arqueológicas, presenta coloraciones combinadas entre verdes grisáceos y rojos muy tenues, asociadas con vegetación estresada y suelos poco desarrollados, derivados de depósitos coluviales que cubrieron la mayor parte del sitio.

COMPOSICIÓN 432

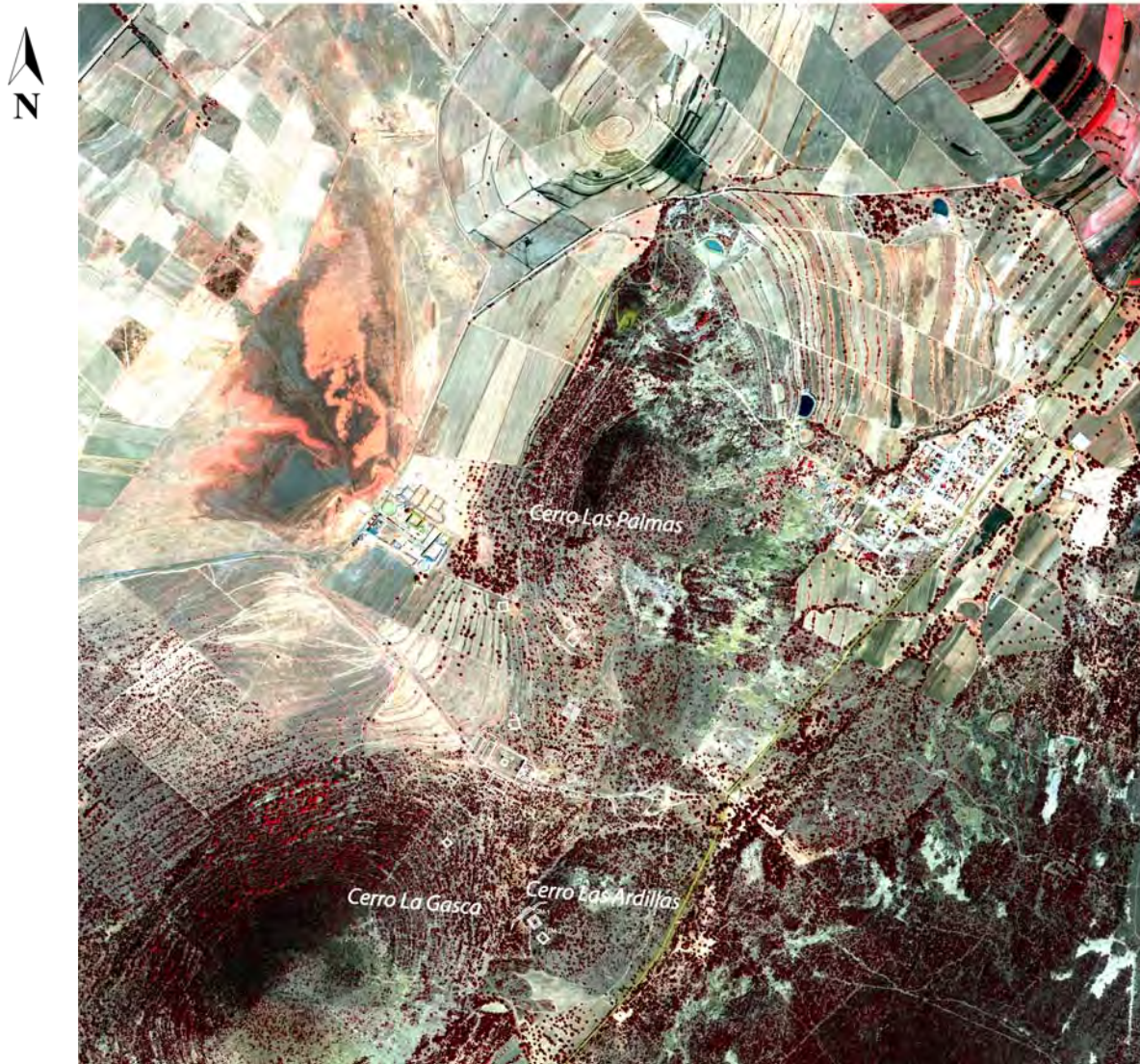


Figura 6.7. Composición de color 432, en donde se destaca la vigorosidad de la vegetación.

En resumen, gran parte de la imagen en esta composición está dominada por los colores claros, grises azulados, rojos y verdes azulados, asociados al terreno desnudo, la vegetación vigorosa y estresada, las parcelas aradas o suelos descubiertos con mayor o menor contenido de humedad, respectivamente. No existe algún patrón evidente que permita relacionarlo con la zona arqueológica de La Laguna, por lo que es necesario hacer procesamientos adicionales para

identificar alguna diferencia espectral, en las características del suelo y la vegetación, para inferir indirectamente la presencia del sitio.

Debido al escaso contraste, en color y en textura, que ofrece la composición RGB (432), se implementó la transformación RGB-HLS para realzar las diferencias de color, mediante un realce de contraste en el espacio de color HLS, modificando el porcentaje de tono, luminosidad y la saturación, y posteriormente realizando la transformación inversa para devolverla al espacio RGB, obteniendo nuevas bandas con realce de contraste, (fig. 6.8).

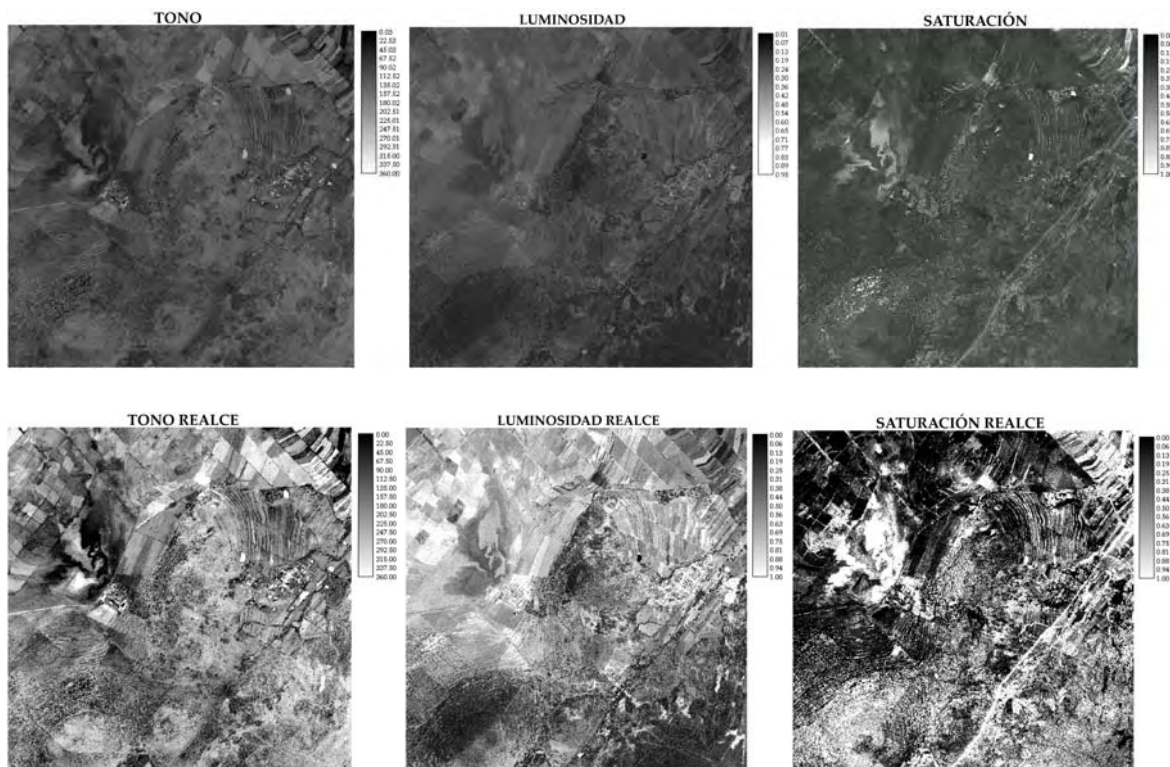


Figura 6.8. Manipulación de los canales tono, saturación y luminosidad para enfatizar las diferencias entre las coberturas.

La imagen resultante (fig. 6.9) permite distinguir claramente las diferencias entre los distintos tipos de coberturas y se pueden clasificar visualmente de la forma siguiente:

- Cultivos con riego permanente, en color rojo intenso.
- Suelo desnudo y calles del poblado, en color crema a blanco.

COMPOSICIÓN RGB-HLS 432

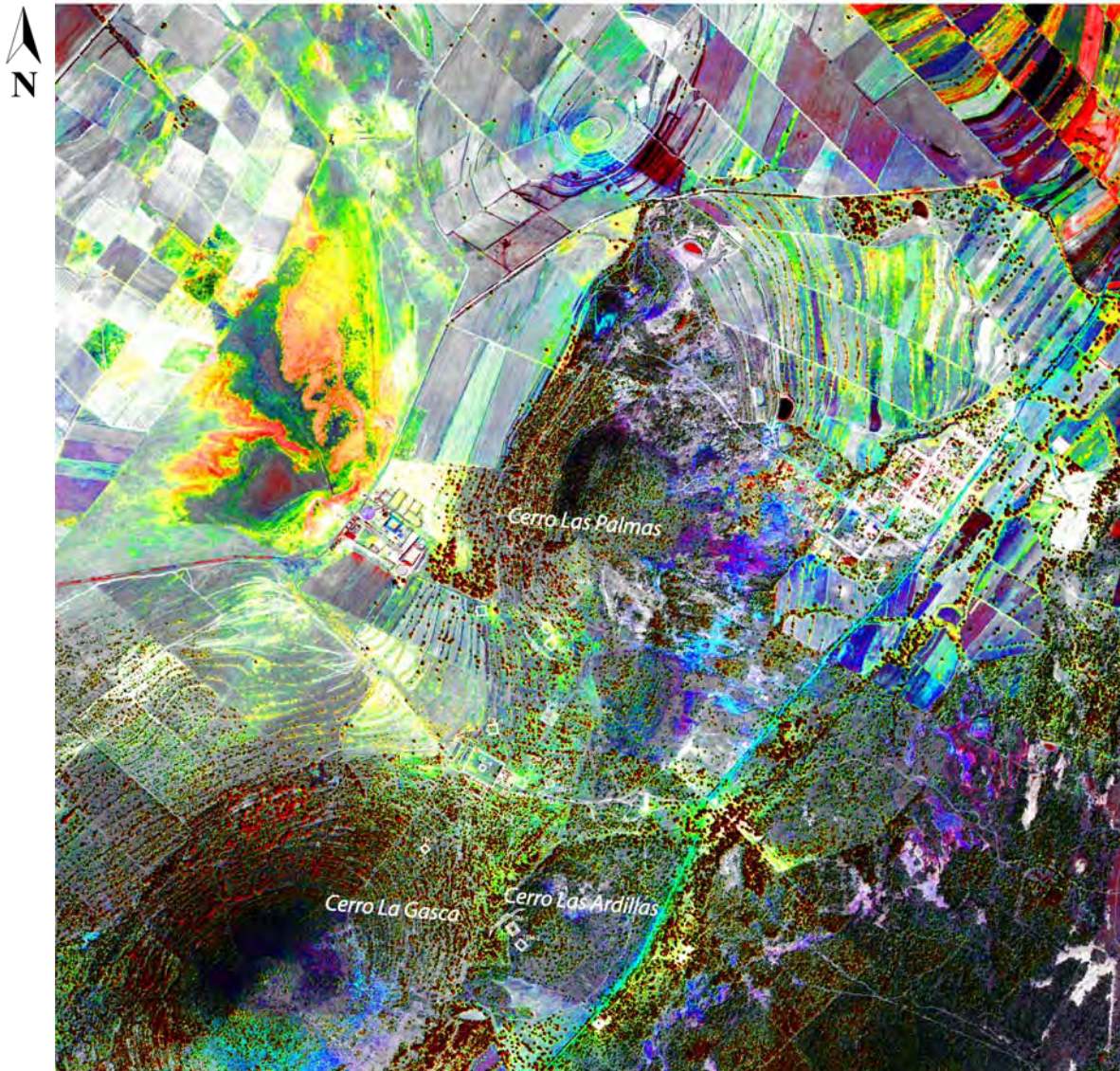


Figura 6.9. Transformación RGB-HLS-RGB de la composición de color 432, para destacar las diferencias de los distintos tipos de cubiertas.

- Pastizales y matorrales secos, en colores grises a gris-verdoso oscuro.
- Suelos y campos arados, en colores con tonalidades que van de grises claros y oscuros, azules claros y oscuros, hasta cafés, según el grado de humedad y el material presente en superficie, por ejemplo si hay un aporte importante de materiales volcánicos, como el tezontle, presentarán colores azulados, esto es debido a que existe un banco de material al norte del cerro de Las Palmas y que en esta composición de

color se muestra en color azul claro intenso, por lo que es útil para calibrar la reflectancia de este tipo de material en la superficie.

- El bosque y la vegetación desarrollada de los cerros, presentan colores rojos y verdes oscuros.
- En la parte central de la imagen, al norte del cerro de La Gasca y en las terrazas al noreste del cerro Las Palmas, hay áreas en colores verde amarillentos que muestran características muy particulares, están en la zona donde se ubica el sitio arqueológico y cubren un área importante de las terrazas. No es posible establecer una relación directa entre esta coloración y la presencia del sitio arqueológico bajo los depósitos coluviales, sin embargo, es probable que el tipo de suelo y la vegetación que en él se desarrolla tengan esa firma espectral, con lo que, aunado al contexto, puede ser un buen indicador para la identificación de zonas del terreno susceptibles a contener modificaciones antrópicas del pasado.

6.7 COMPONENTES PRINCIPALES

El análisis de las componentes principales (PCA) a las bandas de *QuickBird*, generó un nuevo conjunto de datos, con cuatro componentes no correlacionadas, con las que se pudo generar una nueva imagen para interpretar las respuestas de las distintas cubiertas. Desafortunadamente, la interpretación de dichas componentes no tienen un sentido general y universal, ya que se extraen de los propios datos.

Para este caso, el proceso reúne la mayor parte de la información contenida en todas las bandas en sólo tres componentes, PC1, PC2 y PC3, sin perder una parte significativa de la información. Con estas componentes podemos crear una composición de color que nos separe adecuadamente las clases más representativas de todas las bandas disponibles en sólo tres componentes.

La primera componente PC1, contiene la mayor parte de la información y esta asociada principalmente al albedo o brillo de las bandas de *QuickBird*, es similar a como se construye la banda pancromática. La segunda componente PC2 contendrá la respuesta espectral de la vegetación, el suelo, la humedad o cualquier otra propiedad de la cubierta. Las demás componentes, PC3 y PC4, están asociadas generalmente a clases temáticas particulares, disminuyendo su varianza y aumentando el ruido.

La matriz de carga determina que el mayor porcentaje de varianza está en las componentes principales 1 y 2, que juntas suman el 92.68 % de total de la varianza de los datos. Si le sumamos la varianza de la componente 3, el porcentaje de varianza acumulada será del 99.9 %, comprimiendo prácticamente toda la información de las cuatro bandas en sólo 3, con una pérdida menor al 0.1 % de la información, (tabla 6.2).

COMPONENTE	C 1	C 2	C 3	C 4
% var.	81.716454	10.963816	7.22216	0.097558
% var. acumulativa	81.716454	92.68027	99.90243	100
Banda	C 1	C 2	C 3	C 4
B01 0.45-52 (µm)	0.85982	-0.336463	-0.384033	0.004491
B02 0.52-0.60 (µm)	0.970926	-0.102182	0.21162	-0.045596
B03 0.63-0.69 (mm)	0.9606	-0.068042	0.266112	0.042461
B04 0.76-0.90 (µm)	0.814812	0.557023	-0.160644	-0.000465

Tabla 6.2. Matriz de carga obtenida a partir del análisis de componentes principales (PCA).

En la gráfica de los coeficientes de carga con respecto a la longitud de onda central de cada banda de *QuickBird*, (fig. 6.10), se observa que la curva de la primera componente, PC1 (curva gris oscuro), casi no varía su comportamiento en las cuatro bandas, presenta valores ligeramente menores en las bandas azul (B01) y en el infrarrojo (B04). Este comportamiento representa el aporte en brillo de las diferentes cubiertas en las bandas azul (B01), verde (B02), rojo (B03) e infrarrojo (B04).

Para la segunda componente, PC2 (curva verde), la variación de la curva es muy similar a la firma espectral de la vegetación (ver fig.6.11), con valores bajos en el azul (B01) y en el rojo (B03), un ligero incremento en el verde (B02), aumentando significativamente en el infrarrojo (B04). Esta componente la podemos asociar directamente con la vigorosidad de la vegetación en la banda 4, y dependiendo de su variabilidad podría tener relación con las condiciones del suelo en donde está asentado el sitio arqueológico, ya sea promoviendo o limitando el grado de desarrollo de la vegetación.

La tercera componente, PC3 (curva azul), no tiene una interpretación sencilla, al parecer la curva es similar al comportamiento del agua de las bandas B01 al B04, y podría interpretarse como el contenido de humedad en el suelo y en la vegetación.

La componente 4, no representada en la gráfica, (ver tabla 6.2), constituye el aporte de ruido de cada banda y no aporta información útil para el análisis de los datos.

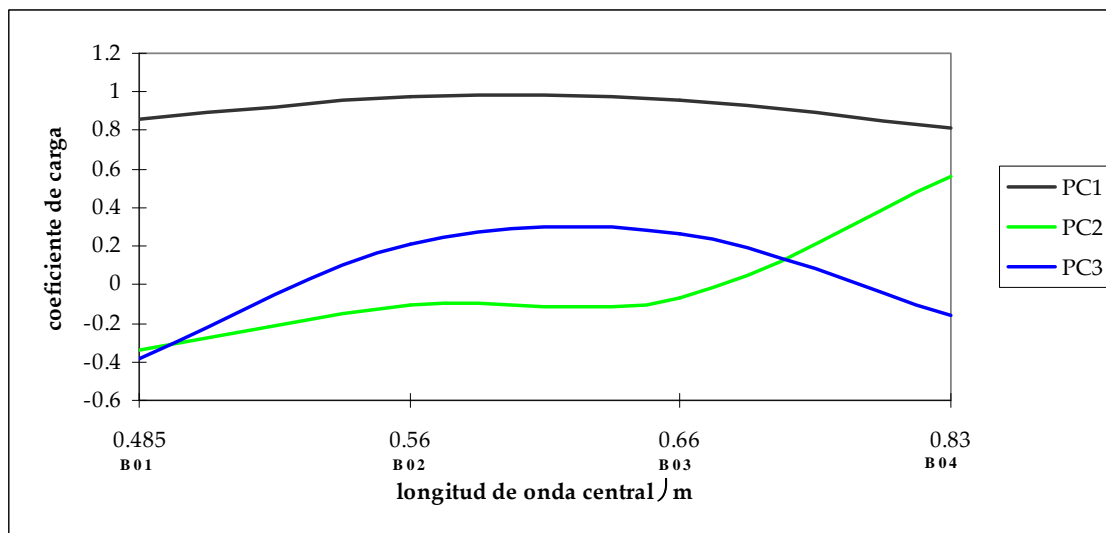


Figura 6.10. Representación de los coeficientes de carga con respecto a las bandas de multiespectrales de *QuickBird*.

Las imágenes de las componentes principales, (fig. 6.11), muestran que el brillo y el detalle espacial de todas las bandas se encuentran contenido en la primera componente (PC1), mientras que, la salud de la vegetación y la humedad del suelo se representan en las componentes PC2 y PC3. La componente PC4 tiene muy poca varianza con datos redundantes que no aportan información adicional para el análisis.

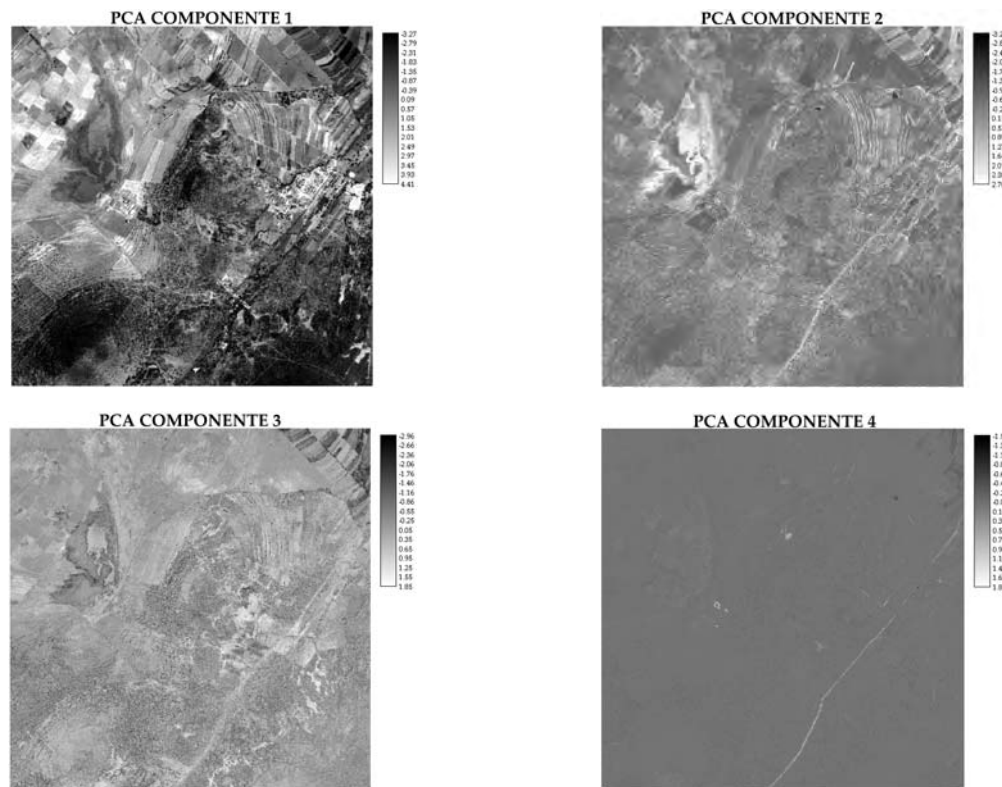


Figura 6.11. Componentes principales de las bandas multiespectrales de QuickBird.

Con las nuevas bandas obtenidas a partir del análisis de las componentes principales se creó la composición de color PC1-PC2-PC3, (fig. 6.12). En el canal rojo se puso la componente PC1 para el brillo y el detalle espacial, en el verde la componente PC2 para asociarla con el vigor de la vegetación, y en el azul la componente PC3 para relacionarla con la humedad del suelo y las plantas.

El canal rojo, correspondiente a la componente PC1, está asociado a las zonas con suelo desnudo, tierra seca y construcciones, que aportan gran parte del brillo de la imagen.

Para el canal verde, asociado a la componente PC2, la vegetación vigorosa se presenta en color verde con alta saturación, relacionado principalmente con zonas de cultivo y con vegetación sana, mientras que, en las faldas de los cerros y en las zonas bajas, la vegetación estresada presenta un color verde pálido. En la zona donde se ubica el sitio arqueológico, la vegetación tiene un color verde con menor saturación.

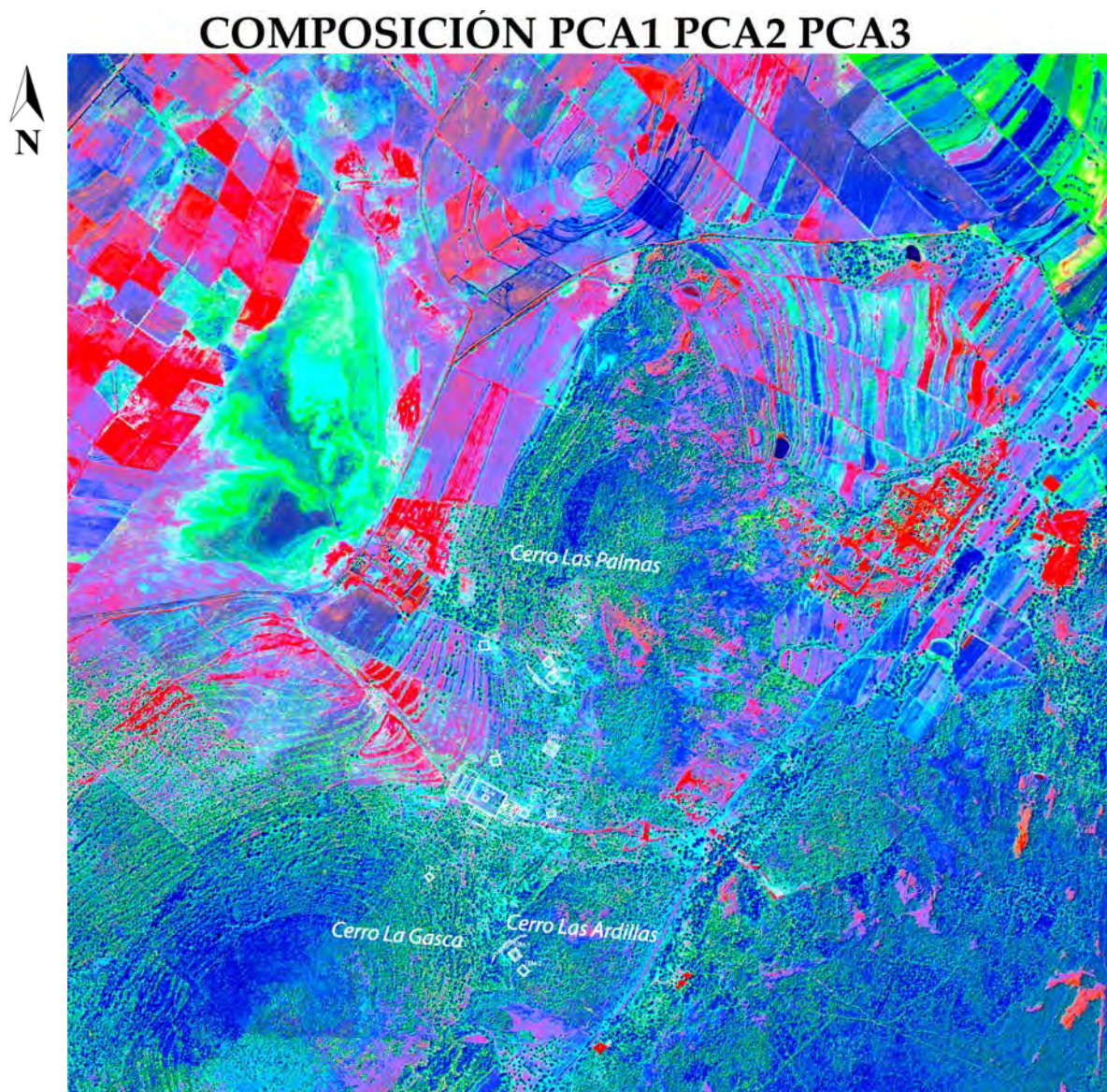


Figura 6.12. Composición de falso color de las componentes principales PC1 PC2 PC3.

Para el canal azul, correspondiente a la componente PC3, se observa que las áreas con vegetación abundante, terrenos arados y suelos, presentan colores azules que

varían de tonalidades claras a oscuras, dependiendo del grado de humedad que posean.

El suelo y la vegetación del área central, donde se encuentra gran parte del sitio arqueológico, las terrazas ubicadas al noreste del cerro de Las Palmas y la zona entre los cerros La Gasca y Las Ardillas, presentan un color cian que resulta de la mezcla aditiva del verde y el azul, este color particular y el contexto en el que se encuentra puede estar relacionado con zonas de actividad cultural que fueron cubiertas por sedimentos de los cerros circundantes y posteriormente originaron un tipo de cubierta que se distingue sutilmente de otras zonas de la imagen.

Es probable que las características espectrales de la vegetación y el suelo para estas áreas sean resultado de los suelos y sedimentos que sepultaron al sitio después de que fue abandonado, y que al mezclarse con los materiales arqueológicos originaron este tipo de cobertura.

La composición en falso color de las componentes principales, revela zonas con características de color específicas que no se habían observado en otras composiciones y con otros procesos. Esto se debe a que, para esta zona en particular, PCA comprime muy bien la información de las bandas originales en sólo tres componentes (bandas sintéticas) y separa la correlación que existe entre ellas, de esta forma se puede obtener la información sustancial de cada banda y deducir mejor la relación de las componentes con ciertas características de la vegetación y el suelo.

6.8 ÍNDICES DE VEGETACIÓN

Los índices de vegetación de los valores de reflectancia para las bandas roja e infrarroja de *QuickBird*, tienen como objetivo principal, al igual que con el sensor de *Landsat*, extraer la información relacionada con la vegetación, minimizando la influencia de las perturbaciones debidas al suelo y de las condiciones atmosféricas.

Al revisar la firma espectral de la vegetación, (fig. 6.1), observamos que en la banda roja (B03) e infrarroja (B04), la vegetación sana y el suelo difieren en su respuesta espectral. La reflectancia de la vegetación es mínima en el rojo y corresponde con la banda de absorción de la clorofila; en la banda infrarroja aumenta significativamente como consecuencia de la dispersión de esta longitud de onda en el interior de la estructura celular. Por otra parte, la reflectancia del suelo presenta

un comportamiento ligeramente ascendente hacia la banda infrarroja pero mucho más suave.

Se sabe que, aproximadamente el 90% de la información relativa a la vegetación está contenida en las bandas roja e infrarroja y el análisis correspondiente a la vegetación se puede restringir a sólo estas dos bandas, que están relacionadas estrechamente con el contenido de clorofila (en B03), y con el índice de superficie foliar y la densidad de vegetación verde (en B04), (M. A. Gilabert, 1997). Se pretende utilizar este criterio para determinar si las bandas roja e infrarroja de *QuickBird*, con mayor resolución espacial, son capaces de identificar pequeñas diferencias en la vegetación debidas a estructuras arqueológicas bajo la superficie.

De los dos índices de vegetación, NDVI y SAVI, calculados para el sensor de *Landsat*, se determinó que la mejor técnica para obtener información de la salud de la vegetación, tomando en cuenta el aporte del suelo, fue el índice SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*).

Sobre el sitio arqueológico se acumularon en aproximadamente dos mil años una gran cantidad de suelos y sedimentos provenientes de los cerros circundantes, debido a este proceso gran parte de los espacios ceremoniales, domésticos y públicos fueron cubiertos, en su mayoría por material arcilloso y cantidades menores de limo y arcilla. En el valle y en las faldas de los cerros donde se ubica el sitio, existe una vegetación variada, principalmente de pastizales, magueyes, arbustos y pinos de distintos tamaños. Sobre los suelos incipientes del sitio, dominan los pastizales y arbustos pequeños, en las grietas y en las zanjas rellenas, donde hay mayor humedad y nutrientes, por lo general la vegetación es más vigorosa. En promedio, la vegetación de esta zona está dominada por los arbustos, pastizales, y en menor proporción por árboles grandes.

La composición de color con el índice SAVI en el canal verde permite distinguir las distintas tonalidades de color verde relacionadas con la salud y la densidad de la vegetación sobre el terreno, (fig. 6.13). En la zona correspondiente al sitio arqueológico, el índice SAVI muestra una respuesta combinada, con áreas pequeñas de vegetación vigorosa en color verde intenso, otras con vegetación estresada en color verde grisáceo, y zonas en color magenta que resulta de la mezcla aditiva del canal rojo y el azul, la intensidad de color depende de la salud de la vegetación, mientras más estrés posea mayor se asemejará a la respuesta del suelo desnudo en color magenta intenso.

COMPOSICIÓN 3 SAVI 1

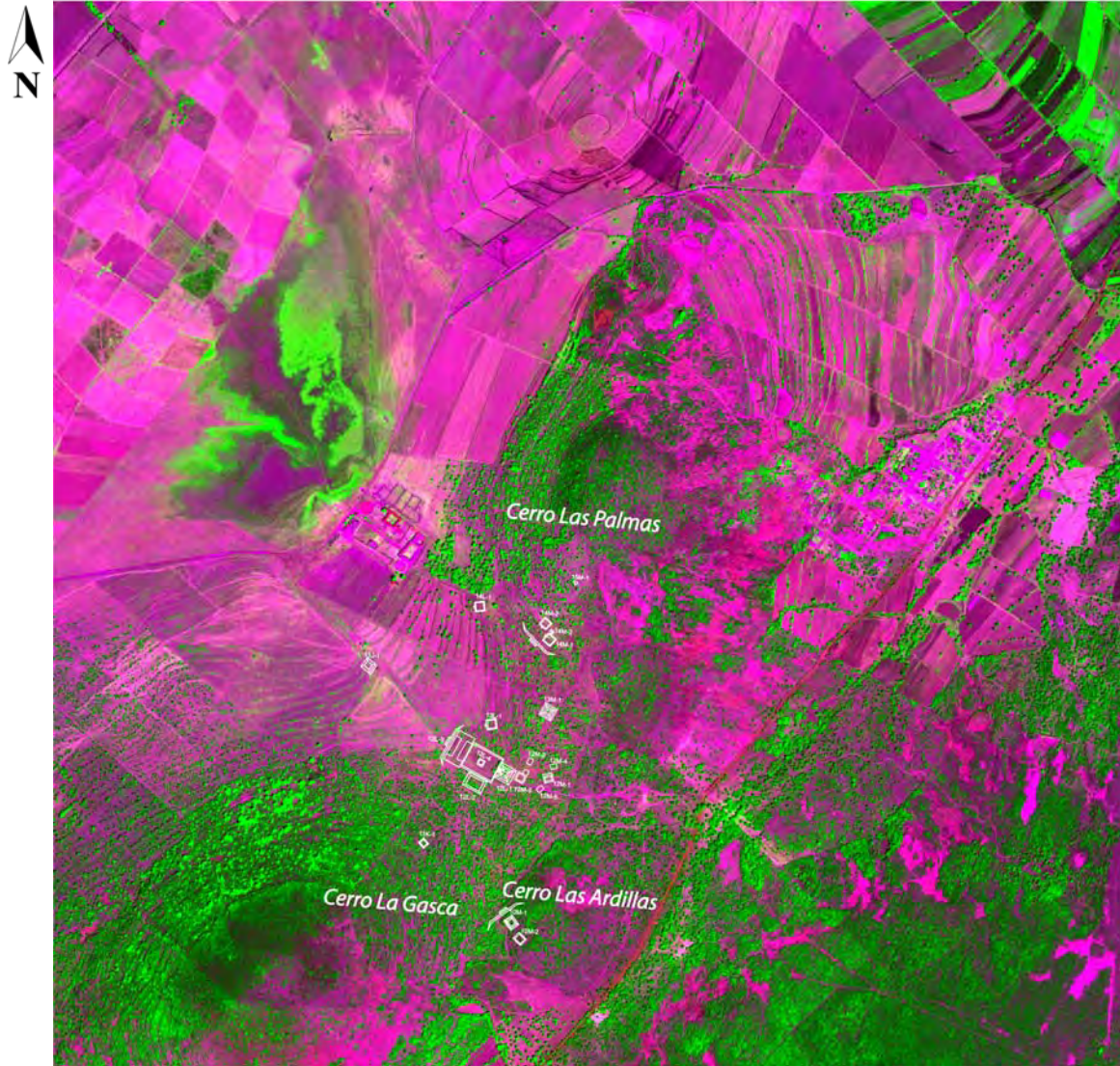


Figura 6.13. Composición de color para el índice de vegetación SAVI.

El sitio arqueológico se ubica dentro de una gran mancha de color verde grisáceo, muy próximo al magenta oscuro, este comportamiento puede ser resultado de zonas en donde la vegetación no se puede desarrollar correctamente, ya sea por las características físicas y químicas del suelo, o por la presencia de estructuras constructivas de piedra por debajo de la superficie que limitan la penetración de las raíces, siendo esto uno de los factores que restringen el desarrollo óptimo de las plantas. También es posible que en algunas zonas existan buenas condiciones para el desarrollo de las plantas, tal es el caso de grietas y zanjas rellenas con mayor espesor de suelo, agua y nutrientes. Otro indicador que nos permite asociar

indirectamente la presencia del sitio, es la densidad anómala de la vegetación que tiene un patrón de distribución diferente al que se encuentra en el resto de la imagen.

6.9 TRANSFORMACIÓN TASSELED CAP (TCT)

Como se estableció en los capítulos anteriores, la *Transformación Tasseled Cap (TCT)*, fue creada para obtener componentes con un significado físico preciso (brillo, verdor y humedad), independientemente de la imagen que se analice.

Los coeficientes de TCT fueron desarrollados desde hace varios años para los sensores de *Landsat* y *Spot*, sin embargo para *QuickBird* es muy reciente, para este trabajo se utilizaron los coeficientes del método de ortogonalización de Gram-Schmidt publicados por Yarbrough L. et al. (2005).

Aunque esta transformación está muy desarrollada para la agricultura, puede ser de utilidad el brillo, verdor y humedad como indicadores indirectos de modificaciones al paisaje y de la presencia de vestigios enterrados. La banda brillo enfatiza las áreas de suelo desnudo, generalmente tierra seca y roca desnuda, la banda verdor está dirigida a destacar la vigorosidad de los cultivos y la vegetación, por otra parte, la banda humedad es sensible a las cubiertas, vegetación y suelo, que contengan agua en distintas proporciones.

Las bandas generadas por esta transformación se ordenan en una composición que asocie a cada elemento de la transformación con un canal que sea fácil de identificar. El brillo, verdor y humedad se ponen en el canal rojo, verde y el azul, respectivamente (fig. 6.14). En la composición de falso color, el rojo y naranja representan el brillo de la superficie del terreno, relacionado con suelo desnudo, tierra seca, construcciones y caminos. El verdor en sus diferentes tonalidades representa las zonas de cultivo, pastizales y bosques; mientras que, la humedad, presente en la vegetación y en el suelo, se presenta en colores azules.

El sitio arqueológico se encuentra en una zona con múltiples respuestas, hay vegetación estresada, tierra seca y vegetación saludable. La transformación *Tasseled Cap* muestra pequeñas áreas que tienen un patrón irregular en el brillo y el verdor, sobretodo las que están próximas al cerro Las Palmas, en donde se encuentran las estructuras 14M-1, 14M2, 14M-3 y 15M-1, y en el área central donde se encuentran las estructuras mayores 13M-1, 12L-1, 12L-2 12L-3 y 12M-1, que pueden influir indirectamente en las características de la vegetación y el suelo. Lo que es más

evidente es la densidad pobre de vegetación entre los tres cerros, sin llegar a desaparecer completamente, esto puede ser influenciado por los materiales de cobertura y por las estructuras arqueológicas por debajo de la superficie, que a su vez pueden generar condiciones específicas para el desarrollo y distribución de la vegetación de esta zona.

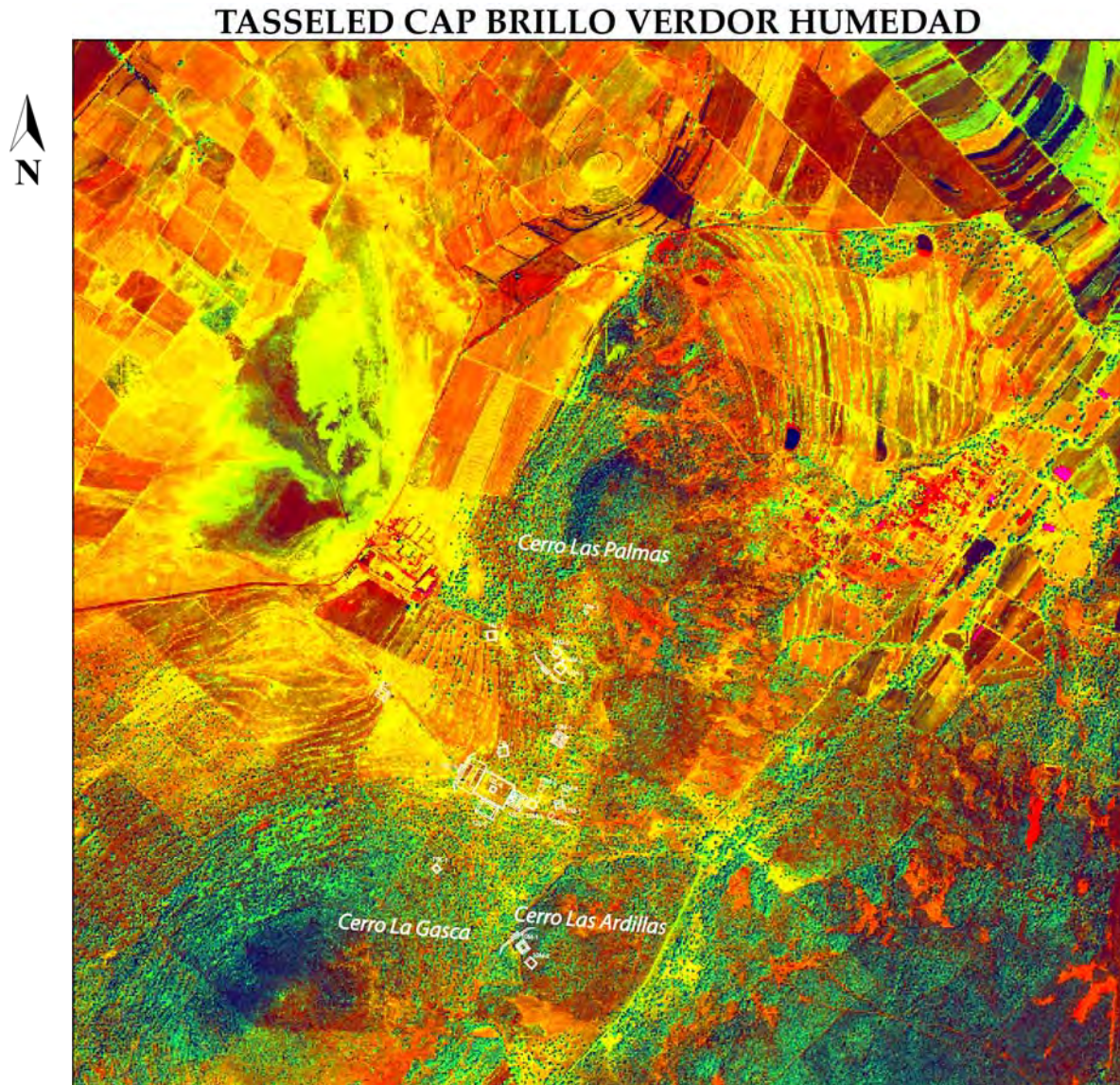


Figura 6.14. *Tasseled Cap*, bandas de brillo, verdor y humedad para *QuickBird*.

Por las características de esta transformación, *Tasseled Cap* no es una herramienta que genere elementos determinantes para la localización de un sitio arqueológico, no obstante, podría ofrecer indicadores indirectos que se tienen que interpretar con el contexto y con la correlación de diferentes técnicas de proceso.

6.10 CLASIFICACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE *QUICKBIRD*

La fase final del tratamiento de las imágenes multispectrales de *QuickBird* es la clasificación. Esto se deriva de la aplicación y el uso que le daremos a estas imágenes, los datos originales en DN no tienen ningún sentido de forma aislada, son solamente números, adquieren relevancia cuando se les agrupa en categorías que muestren patrones interpretables de acuerdo al conocimiento del sitio de estudio. La interpretación se puede hacer en primera instancia aprovechando los algoritmos del programa de clasificación, y otra parte, las más importante, es analizando el contexto y la información adicional que se tenga del sitio, esto difícilmente puede ser tomado en cuenta en un programa. El producto de esta clasificación digital es generar un mapa temático con la compilación de las categorías de interés para el estudio.

Como en el sensor *Landsat*, para *QuickBird* podemos distinguir las variables que son medidas de modo directo, en este caso la reflectancia, y las que son derivadas a partir de las relaciones que hay entre las reflectancias de las cuatro bandas que maneja este sensor, es decir el contenido de clorofila, el brillo y la humedad de las distintas cubiertas, etc. Con el conocimiento de estas variables es posible inferir si guardan una relación fuerte o escasa con las variables de interés en nuestro objeto de estudio, tipos de suelo, marcas sobre el terreno y modificaciones al paisaje, principalmente de la cultura que vivió en la Laguna durante el periodo Formativo.

Para clasificar las diferentes cubiertas se utilizó la imagen de componentes principales porque ofrecía la mejor separación de las cubiertas y aprovechaba mejor la información espectral y espacial de las bandas del sensor en sólo tres componentes. El primer método que se empleó fue la clasificación no supervisada mediante una búsqueda automática de los píxeles homogéneos dentro de la imagen, generando grupos espectrales similares en forma automática (clustering), los únicos parámetros de control que se pudieron establecer fueron: el número de grupos o categorías, el contraste y el modo de generalización, ya sea de *cluster* grueso y fino. Por el método de cluster grueso se tuvieron resultados aceptables para una primera aproximación, (fig. 6.15). Se logró separar adecuadamente las zonas de bosques, la vegetación estresada (pastizales y matorrales secos, los terrenos arados, el suelo desnudo y las construcciones. Sin embargo las categorías para el suelo y la vegetación asociadas con rasgos culturales no fueron representadas adecuadamente. Es una imagen preliminar que se puede refinar para construir un mapa temático mejor clasificado.

CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA

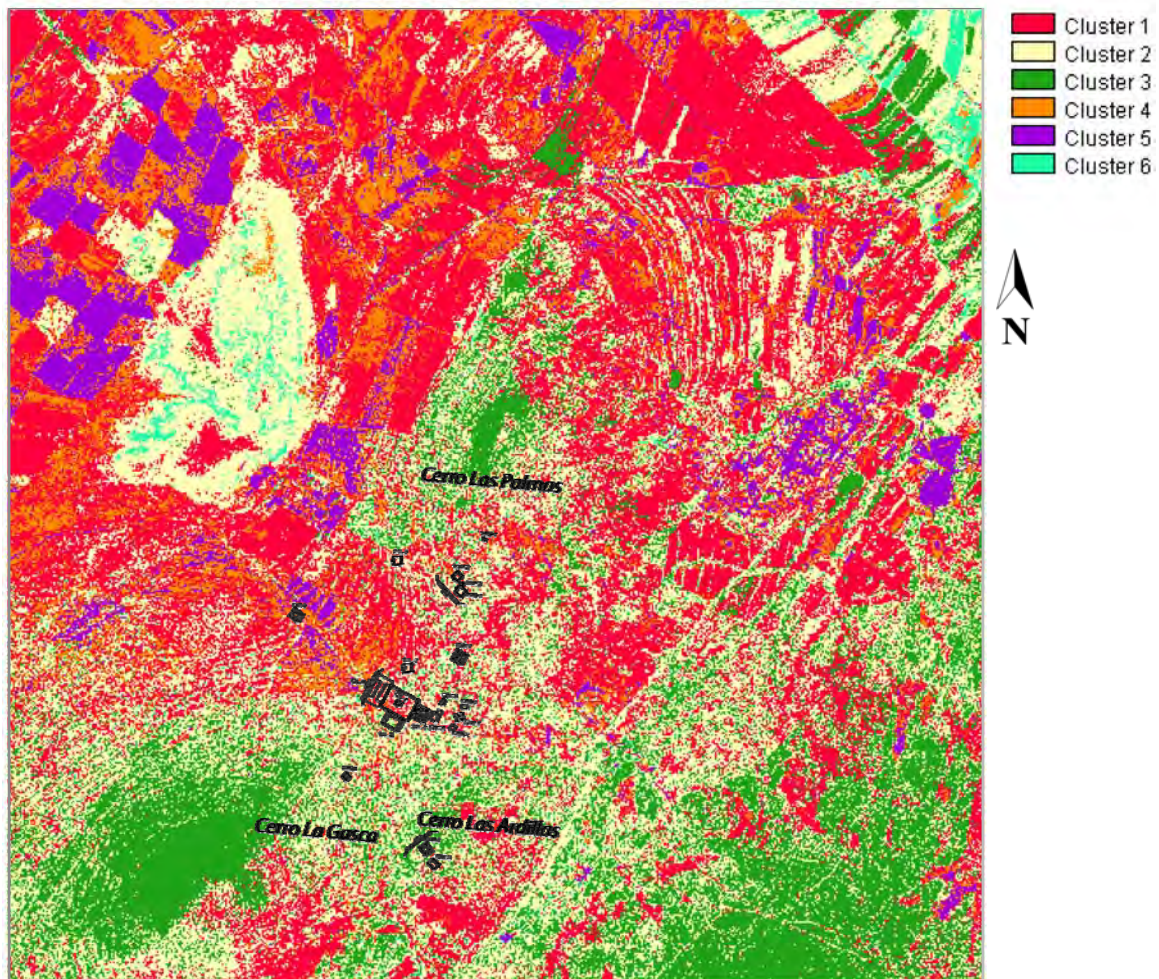


Figura 6.15. Mapa generado a partir de la clasificación no supervisada en modo cluster grueso.

Para obtener un mapa temático con una clasificación más aproximada de acuerdo a lo que existe sobre la superficie del terreno se utilizó la clasificación supervisada, para realizar este proceso se establecieron los polígonos de entrenamiento sobre la imagen de componentes principales. Los criterios que se tomaron en cuenta fueron el color, tono, textura y el contexto de las cubiertas más representativas de la imagen, (fig. 6.16). Una vez establecidas las clases, se corrieron los programas de clasificación: mínima distancia (*Mindist*), paralelepípedos (*Piped*), y máxima probabilidad (*Maxlike*), para evaluar cual era el mejor método para los objetivos del estudio.



Figura 6.16. Polígonos de entrenamiento de las cubiertas más importantes de la imagen.

Con el método de máxima probabilidad (*Maxlike*) se logró clasificar mejor la imagen de las distintas cubiertas en comparación *Mindist* y *Piped*, esto se debe en parte a que, para esta imagen, *Maxlike* resultó ser más eficiente en categorías mixtas o que no estaban claramente diferenciadas. Por ejemplo, el bosque y la zona donde se ubica el sitio arqueológico, existe una textura muy parecida pero con distintos tonos en la vegetación y el suelo, se deben trazar polígonos que incluyan varios tonos para que se clasifiquen adecuadamente.

El mapa temático generado a partir de la clasificación supervisada, incluye las principales cubiertas que se han observado en la superficie del terreno, seguramente existen categorías particulares que no se han tomado en cuenta pero están más allá de los objetivos de este trabajo, (fig. 6.17).

La zona de interés, al centro de la imagen, se encuentra dentro de las categorías bosque, vegetación estresada, y tierra seca. Con la mezcla de estas categorías y con la textura de la imagen se tiene una imagen que se debe de interpretar de acuerdo al contexto y con la guía del arqueólogo responsable. Esta imagen muestra, en color violeta, las áreas del terreno que se ajustan a los criterios de clasificación, sin embargo, hay lugares que no parecen tener relación con las modificaciones al paisaje y con la cultura del formativo, sobretodo en la parte noroeste del mapa.

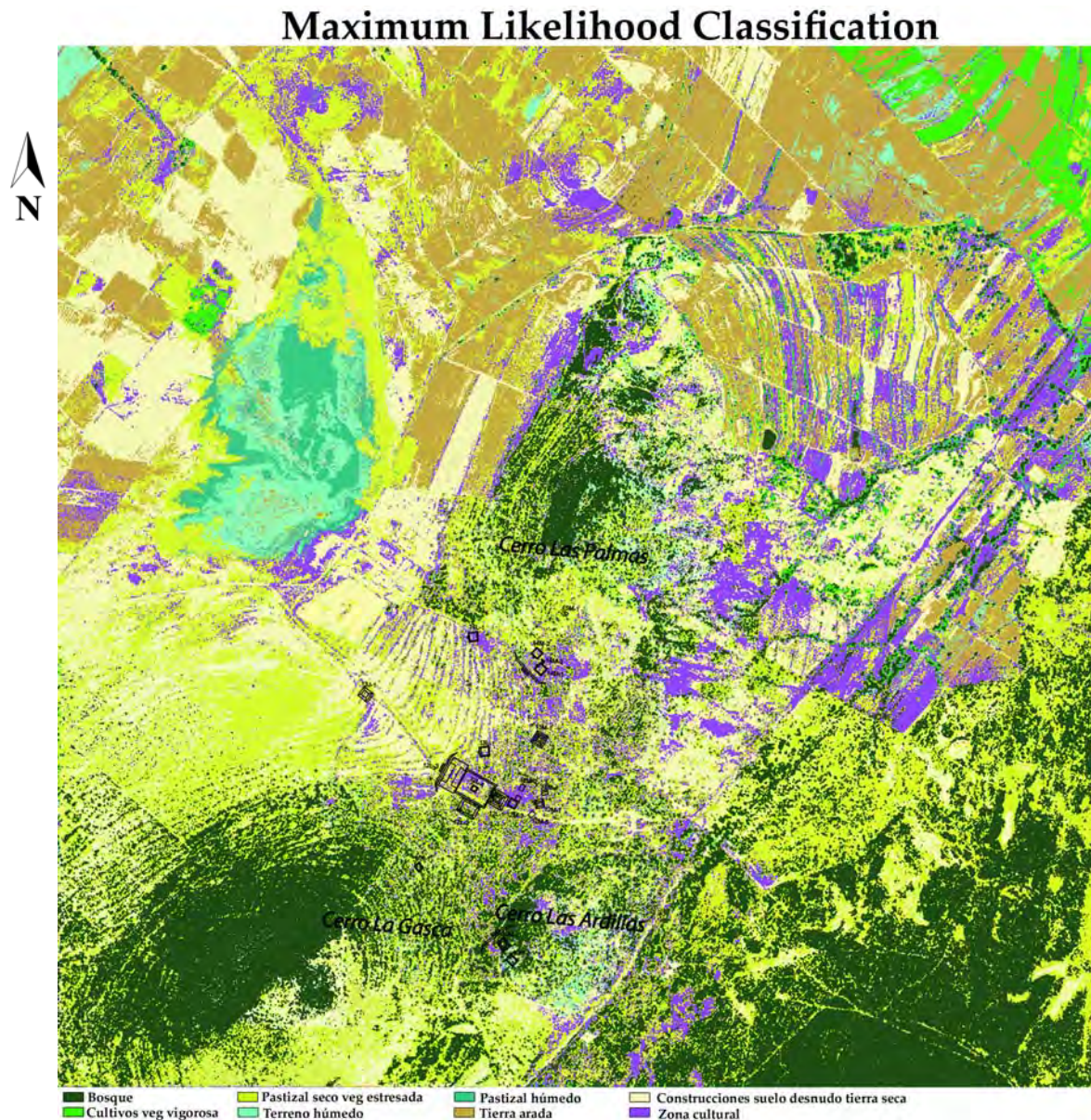


Figura 6.17. Mapa temático obtenido por clasificación supervisada con el algoritmo de máxima probabilidad.

Para esto, es conveniente tomar en cuenta las áreas que tengan más probabilidad de contener vestigios arqueológicos, apoyándose de los registros arqueológicos y las modificaciones al paisaje observadas sobre el terreno.

Con la ayuda del arqueólogo se sabe que las zonas con mayores posibilidades se encuentran en el pequeño valle al centro del mapa, en las partes bajas y en las faldas entre los tres cerros, y es lo que se clasifica como zona cultural. Otra zona interesante, y que puede ser verificada con recorridos de superficie, se localiza en las terrazas al noreste del cerro Las Palmas que pueden ser de origen arqueológico debido al contexto en el que se ubican.

Hasta el momento se sabe que las zonas que contienen vestigios del Formativo, hallados mediante excavación arqueológica y los recorridos de superficie, se encuentran en el área marcada en color violeta al centro del mapa (zona cultural), esta clasificación es muy parecida a la que se obtuvo con el sensor de *Landsat ETM* y *Spot 5*, sólo que ofrece mayor resolución al marcar áreas de color más específicas. Otras zonas de interés arqueológico que aparecen en el mapa, deben ser comprobadas para que se calcule el porcentaje de error y de esta manera saber que posibilidades reales de éxito ofrece esta herramienta de investigación en aplicaciones arqueológicas.

7. RESULTADOS DE LA PROSPECCIÓN GEOFÍSICA Y COMPROBACIÓN MEDIANTE LA EXCAVACIÓN ARQUEOLÓGICA.

Siguiendo la metodología de trabajo del Laboratorio de Prospección Arqueológica del IIA, UNAM, establecido por Luis Barba, se avanzó por etapas en el análisis e interpretación de la información, (fig. 7.1). En primer lugar se interpretaron las imágenes satelitales y la fotografía aérea con la información arqueológica, las rocas, suelos y vegetación desde una perspectiva general, después se integraron estos resultados con la topografía del sitio y los materiales arqueológicos en la superficie. Posteriormente guiados por las metodologías anteriores, se interpretaron los datos de la prospección geofísica apoyándose en algunos perfiles de excavación para determinar la profundidad de las capas. Luego se reunió toda la información de las distintas técnicas para tener una interpretación integral para ser verificada en lugares específicos con la excavación arqueológica. Finalmente el equipo arqueológico comprobó las interpretaciones geofísicas y determinó las áreas de actividad dentro de la zona excavada.

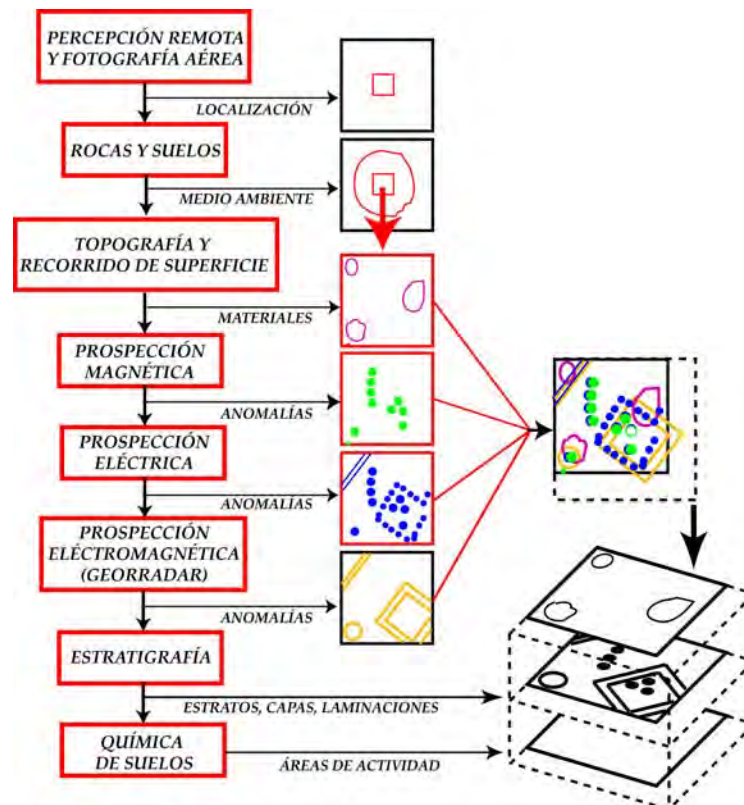


Figura 7.1. Metodología de trabajo del Laboratorio de Prospección Arqueológica del IIA, UNAM.

7.1 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO E IMÁGENES SATELITALES

La primera fase del programa de prospección consistió en integrar la información topográfica con los resultados de los sensores remotos y la fotografía aérea.

El primer levantamiento topográfico del sitio, sobre los montículos centrales, fue realizado en el año 2002 por Roberto Bravo Castillo, del Centro INAH-Tlaxcala. Posteriormente David Carballo y su equipo realizaron otro levantamiento topográfico detallado hasta los límites la ocupación formativa (fig. 1.2). El mapa generado mostró la extensión del sitio de 1 Km² aproximadamente, ubicado entre tres cerros, que con el paso del tiempo ha sido cubierto por depósitos coluviales, ocultando la mayor parte de las estructuras constructivas, sobresalen sólo las más altas en forma de montículos y pequeñas plataformas visibles desde la superficie. Según Carballo (2006), el sitio incluye un espacio cívico-religioso en la parte central y construcciones residenciales en áreas periféricas situadas en las laderas de los cerros adyacentes. Por el tamaño y el número de los montículos se tiene documentado que La Laguna fue un centro importante dentro de su sub-región del valle de Puebla-Tlaxcala (García Cook, 1981).

El mapa topográfico original fue georeferenciado para ser empleado como base para la interpretación de los datos geofísicos y las imágenes de satélite. Con los datos topográficos fue posible crear un modelo digital del terreno (MDT) para determinar la forma del relieve y las zonas del terreno que son susceptibles a un mayor grado de erosión (fig. 7.2).

En la parte noroeste del sitio se muestra la zona más baja del terreno y donde confluye la mayor parte del drenaje del terreno, según las investigaciones de Carballo (2011) en algún lugar del sitio se formaba una laguna de temporal, como la que actualmente surge durante la época de lluvias en la parte más baja hacia el noroeste. Es necesario realizar un estudio multidisciplinario más detallado para comprobar esta hipótesis, aunque por los materiales recuperados en las excavaciones de Carballo se ha logrado identificar especies de animales acuáticos en el registro faunístico, lo cual proporciona evidencia del microclima y microambiente existentes en el pasado de la región. El mapa de pendientes superpuesto al MDT proporciona una prueba adicional y más evidente para reforzar esta hipótesis, por la dirección de máxima variación de las cotas de nivel y como convergen hacia la parte noroeste. Otra zona baja, con características similares y más pequeña, se ubica en la parte sureste del sitio, sin embargo no hay evidencias de la existencia de la laguna en este lugar.

En los cerros que circundan al sitio se puede determinar, por el mapa vectorial en flechas de color rojo, cuales son las zonas de máxima pendiente (gradiente) que están relacionadas con las de mayor erosión en el sitio, es importante destacar que en las

faldas de los cerros donde hay estructuras arqueológicas, hay un menor grado de erosión debido a la retención de suelo ocasionado por las obras constructivas del periodo formativo. Hacia la parte central del sitio, donde están las estructuras constructivas mayores, se aprecia en el mapa vectorial las pendientes por donde descendieron por gravedad la mayor parte de los materiales coluviales que sepultaron el sitio, dejando libre sólo las partes más elevadas.

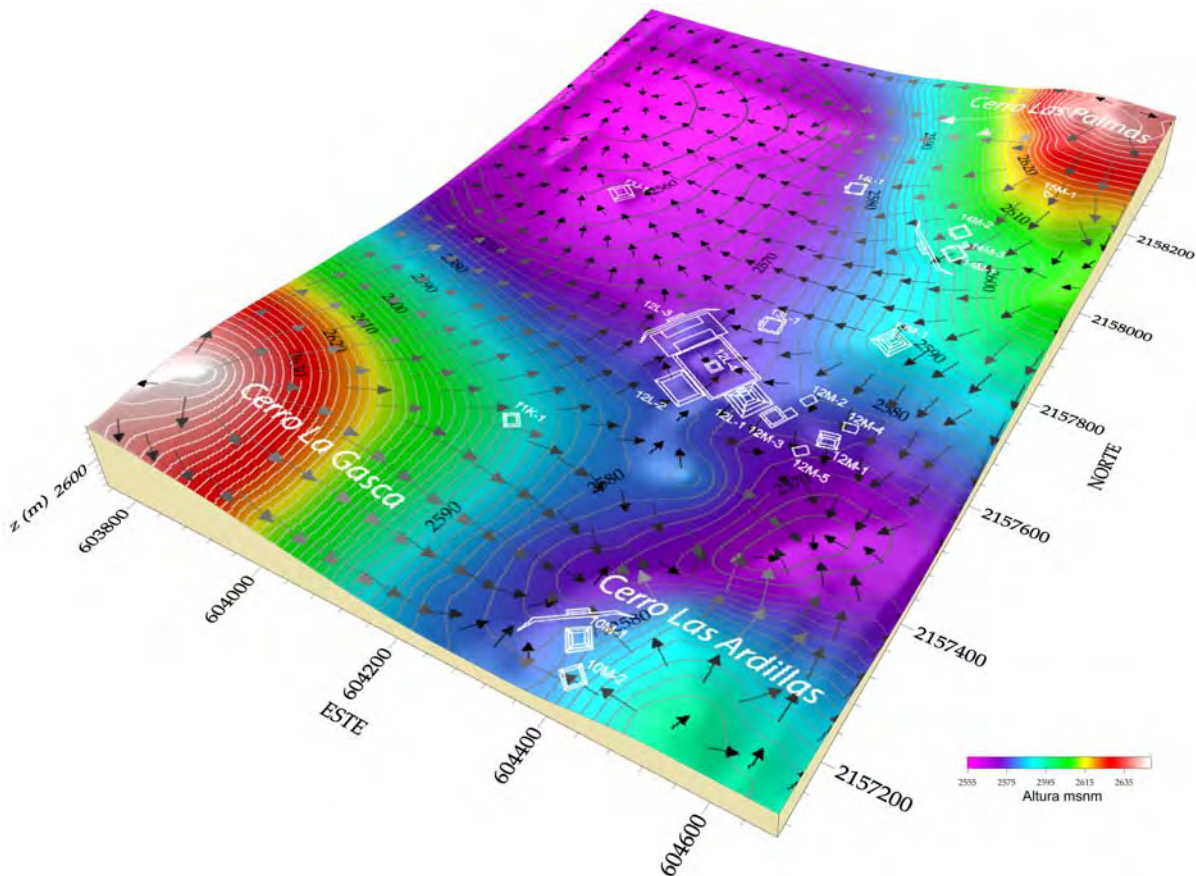


Figura 7.2. Mapa vectorial superpuesto al MDT para mostrar las zonas de máxima pendiente.

- Integración de las imágenes satelitales con la topografía del sitio.

Con la combinación del MDT y las imágenes derivadas de los sensores remotos, es posible determinar las relaciones que existen entre la forma del relieve y las variables indicadoras de actividad cultural en el suelo y la vegetación del sitio. Uno de los procesos que mejor ilustra esta correspondencia es el de las componentes principales del sensor de *QuickBird* (fig. 7.3). El suelo y la vegetación del área central, donde se encuentra gran parte del sitio arqueológico, y las terrazas ubicadas en el cerro de Las Palmas y Las Ardillas, tienen un color cian, derivado principalmente de la combinación de las componentes PC2 y PC3 (canal verde y azul), que a su vez están asociadas con la vegetación estresada y con la humedad del suelo, este indicador en falso color coincide con las zonas donde se han registrado la mayor parte de las

estructuras arqueológicas y son anomalías en el tipo de suelo y en la cubierta vegetal en estas áreas del terreno. El mapa vectorial y el color particular de la cubierta, muestran una zona donde posiblemente había un canal, que iba de las estructuras al norte hacia la zona de la laguna, esto es una hipótesis que se tiene que comprobar con más estudios, sin embargo hay una pequeña evidencia que nos puede guiar en estudios posteriores.

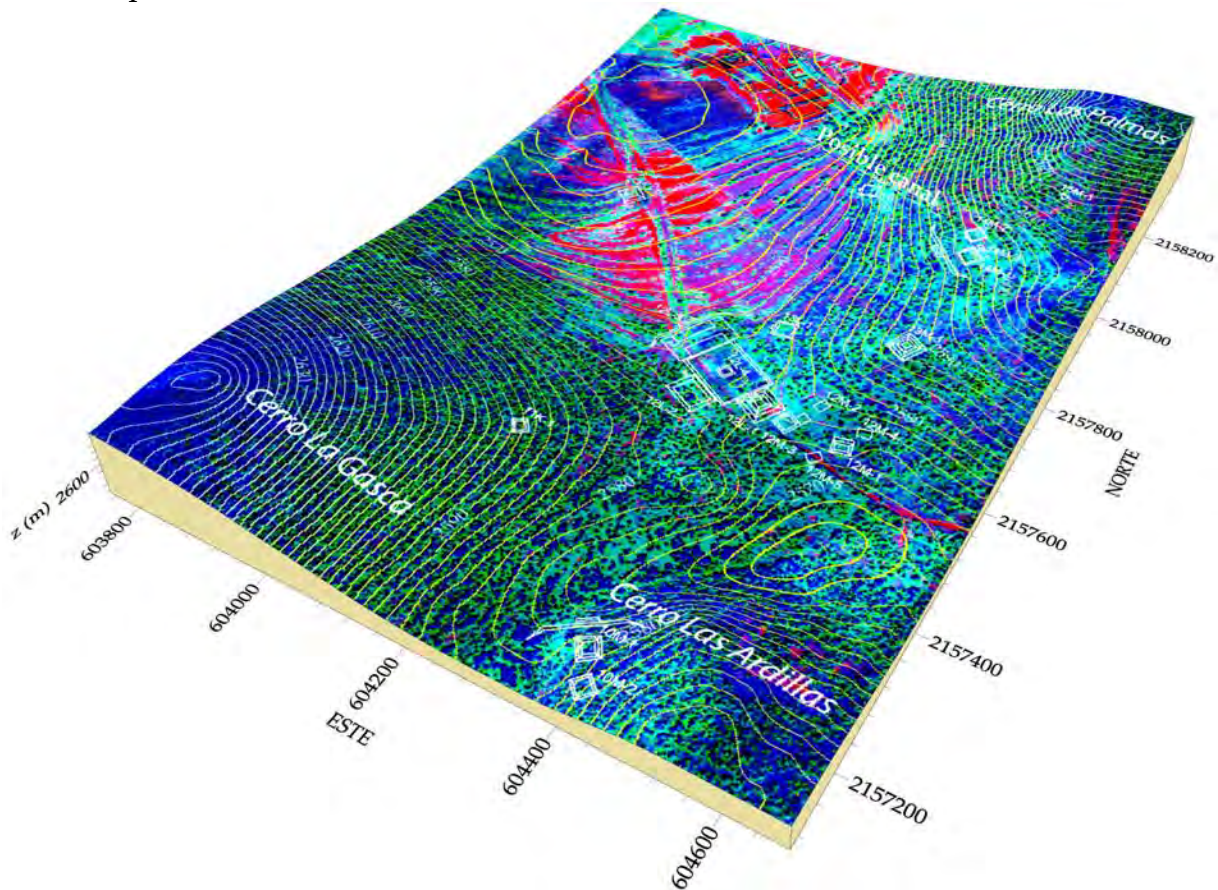


Figura 7.3. Combinación de la imagen de componentes principales (PCA) y el MDT para mostrar la relación que existe con el asentamiento.

Otra de las imágenes que es importante analizar es la clasificación supervisada de *QuickBird* (fig. 7.4), las zonas en color violeta son el resultado de la clasificación por el método de máxima probabilidad, observamos que la mayor parte del centro cívicoceremonial y las estructuras residenciales en las faldas de los cerros caen dentro de estas zonas, sin embargo, la imagen también destaca áreas que aparentemente no tienen correspondencia con las estructuras establecidas por el equipo arqueológico, es probable que en alguna de ellas se encuentren estructuras adicionales no descubiertas hasta el momento; con excepción de las zonas ubicadas en la parte noroeste, seguramente son por ocupaciones modernas debido a la cercanía con la hacienda.

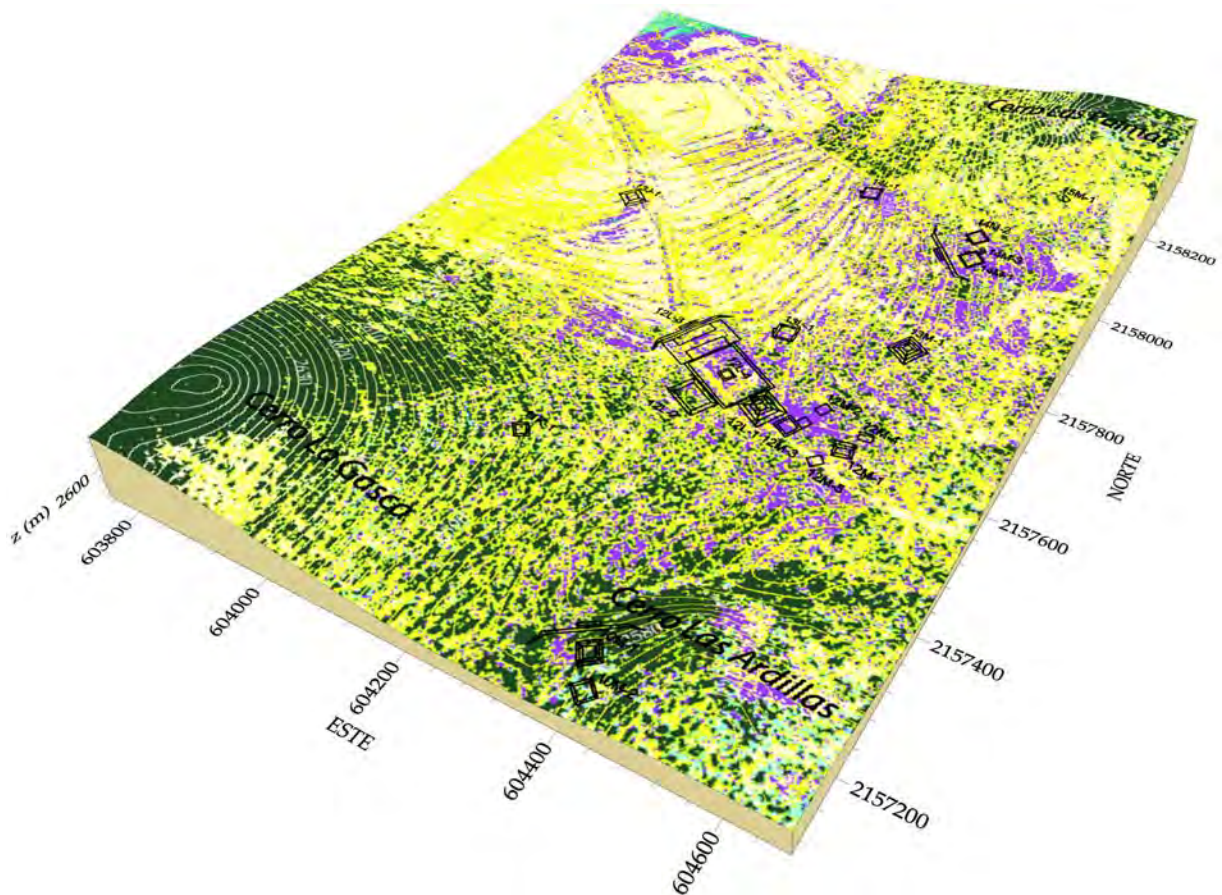


Figura 7.4. Superposición de la clasificación supervisada sobre el MDT revelando las zonas de interés arqueológico.

7.2. FOTOGRAFÍA AÉREA CON GLOBO

Llevando el análisis de la información a otra escala se adquirieron fotografías aéreas utilizando un globo cautivo relleno con helio, una cámara digital de 7.2 megapíxeles marca Sony, y un mando a control remoto marca Futuba de 72.11 MHz, (fig. 7.5). Las fotografías se obtuvieron de 50 a 150 m de altura, con la unión de las fotos individuales se obtuvo un fotomosaico que cubrió un área de aproximadamente 4.5 Ha. El fotomosaico destacó los montículos y cambios sutiles en la coloración del terreno que evidenciaban la presencia de estructuras constructivas sepultadas. Los cambios fueron más evidentes al combinar la fotografía aérea con la topografía, revelando elevaciones y depresiones debidas a estructuras arqueológicas de la parte más importante del sitio que corresponden con el juego de pelota (12L-3), el patio hundido (12L-4), y los montículos (12L-1).



Figura 7.5. Globo inflado con helio utilizado para la fotografía aérea con globo cautivo.

Una de las ventajas de tener una fotografía aérea con globo con respecto a las de satélite y de avión es la resolución espacial que permite determinar con mucho detalle pequeños cambios de color en el suelo que al combinarse con la topografía pueden revelar cambios de color en la superficie asociados con estructuras arqueológicas por debajo de la superficie, (fig. 7.6). La fotografía aérea mostró cambios de color ocre en el suelo entre las estructuras 12L-3 y 12L-4, y sobre el conjunto 12M-2.



Figura 7.6. Centro ceremonial del sitio, combinando la fotografía aérea y la topografía.

7.3. PROSPECCIÓN MAGNÉTICA

Con el objetivo de contar con un mapa completo que registrara las anomalías -materiales con propiedades físicas que difieren apreciablemente con las de su entorno- más importantes del sitio se eligió la técnica de gradiente magnético, siendo la idónea para cubrir la mayor parte del terreno en forma rápida y extensiva, a partir de la información obtenida con esta técnica se harían verificaciones particulares con el georradar y la eléctrica en las zonas de interés arqueológico.

En total se adquirieron 83200 lecturas en modo de gradiente magnético vertical con el gradiómetro *Geoscan FM36* en modo puntual, correspondiendo a 52 retículas de 20x20 m, cubriendo un área total de 20,800 m², (fig. 7.7). Los datos fueron tratados con diferentes técnicas de proceso con el *software Geoplot* para corregir errores en la adquisición de datos, atenuar parte del ruido magnético moderno e interpolar los datos para una buena representación, (Hesse, 1997). Algunos de los procesos empleados fueron la interpolación, *despike* (elimina lecturas aleatorias espurias fuera de rango causado por basura metálica en la superficie), *destagger* (corrige el desplazamiento de las anomalías causadas por al adquisición en zig-zag), *low pass filter* (suaviza los datos al remover el ruido de alta frecuencia producido pequeños elementos) y *zero-mean grid* (establece un umbral promedio para las retículas levantadas en distintos horarios para crear un mapa promedio representativo del sitio). Una vez procesados, los datos fueron representados con el programa *Transform* (1996) y *Surfer* (2010) en mapas de pseudocolor y de relieve para destacar las anomalías de dipolos magnéticos, asociadas con límites de estructuras, rellenos, superficies sometidas a calentamiento, material superficial, muros y otras estructuras constructivas principalmente de roca volcánica.



Figura 7.7. Adquisición de datos magnéticos sobre el conjunto central del sitio.

El mapa magnético del sitio, (fig. 7.8), muestra notoriamente la gran cantidad de rocas del templo basamento, estructura (12L-1), así como una serie de alineamientos y dipolos en las retículas localizadas al Este del mismo. Es importante mencionar que en esta zona se aprecia una pequeña elevación topográfica, apenas perceptible, sobre la superficie del terreno, la cual según la información arqueológica pueden tratarse de áreas de almacenamiento y preparación de alimentos. El mapa de gradiente magnético registra para esta zona, anomalías asociadas con estructuras constructivas de piedra volcánica, así como una serie de dipolos magnéticos debidos a magnetismo termorremanente relacionados con hornos y superficies sometidas a calentamiento.

El mapa de gradiente magnético corresponde con la ubicación de la cancha del juego de pelota, estructura (12L-3), donde se detectan alineamientos con los cuerpos laterales de la cancha de juego de pelota y la terminación en forma de I latina en el cabezal norte. Hacia el centro se aprecia el altar central (E12L-4) y los límites rectangulares de la plaza central.

El mapa magnético también registra varias anomalías y dipolos en las retículas realizadas en la zona noreste del sitio, en esta parte del terreno los arqueólogos realizaron dos pozos de sondeo en temporadas anteriores, encontrando algunos muros y un troncocónico (depósitos excavados en el terreno natural que podían contener semillas o desechos), y es muy probable que correspondan con las anomalías registradas por la prospección magnética.

Con 52 retículas el estudio con gradiente magnético concluyó y arrojó resultados muy importantes, ya que se confirmó algunas de las hipótesis planteadas por el proyecto arqueológico y en otros casos aportó elementos adicionales para nuevas interpretaciones y estudios posteriores. Con el mapa obtenido se logró registrar principalmente la arquitectura de lo que queda del área cívico ceremonial del sitio y la posible localización de entierros, áreas de almacenamiento y preparación de alimentos (espacios domésticos), además de superficies sometidas a calentamiento.

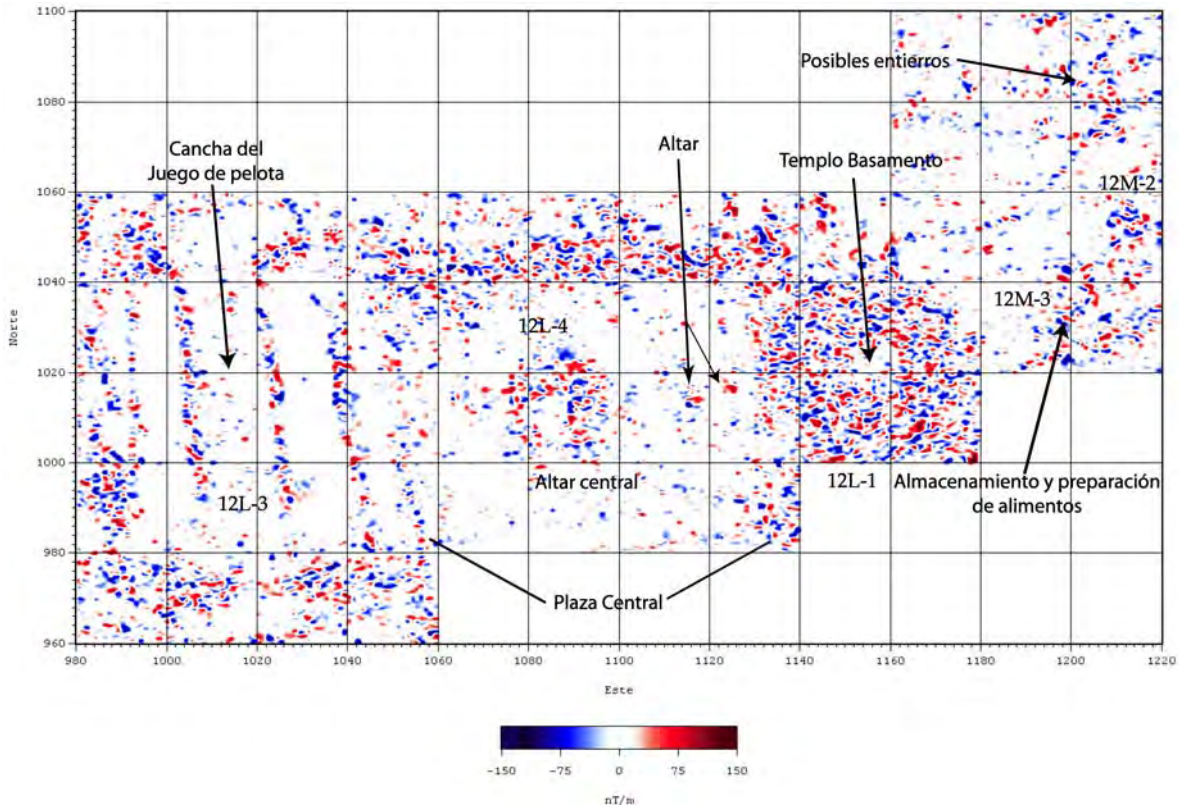


Figura 7.8. Mapa de gradiente magnético correspondiente a la parte central del sitio.

Reprocesamiento de los datos magnéticos.

Otra parte del trabajo de gabinete consistió en reprocesar los datos de gradiente magnético para superponerlos a la topografía, la fotografía aérea y las imágenes satelitales con el objetivo de determinar si existen elementos que se puedan relacionar.

Los datos magnéticos fueron reprocesados empleando distintas técnicas de filtrado; con el propósito de atenuar las señales muy intensas y destacar las que están por encima de cierto umbral, de esta forma se logra una buena correspondencia con la arquitectura del sitio. La figura 7.9 muestra el mapa de gradiente reprocesado destacando los elementos arquitectónicos y atenuando el ruido de alta frecuencia.

La representación final es un mapa de relieve del gradiente vertical del campo magnético y los procesos realizados fueron:

- Filtrado paso-bajas, para remover el ruido de alta frecuencia relacionado con elementos superficiales y pequeños.

- Aplicación del valor absoluto a los datos; para intensificar las respuestas de las rocas relacionadas con elementos constructivos.
- Creación de mapas de relieve usando imágenes raster basadas en la retícula interpolada de los datos de gradiente magnético.
- Aplicación de efectos de luz y sombra para magnificar y destacar el relieve de la imagen.

Posteriormente se georeferenció y superpuso el mapa de gradiente magnético al mapa topográfico y arquitectónico, con el rumbo y la escala apropiada, (fig. 7.10). Los alineamientos ubicados en la parte oeste del mapa magnético, cancha del juego de pelota (12L-3), se ajustan bien a los trazos arquitectónicos y a la topografía del sitio; excepto en la parte sur donde la apertura del camino destruyó parte del cabezal sur de la cancha. Por otra parte, en la plaza central hay una buena correspondencia con el límite norte y con el altar central, estructura 12L-4, constituido principalmente de rocas volcánicas.

Hacia el sureste la respuesta más destacada es producida por el montículo de la estructura 12L-1 y tiene buena correspondencia con la topografía y la arquitectura.

En la parte este de la imagen, se muestran anomalías y pequeñas elevaciones asociadas con la zona de almacenamiento y preparación de alimentos y de los posibles entierros hallados en temporadas anteriores. La estructura 12L-2, estuvo fuera de la zona de prospección geofísica y no fue posible comparar los datos magnéticos con su ubicación, no obstante la aproximación de la arquitectura con la topografía es buena.

El mapa vectorial muestra la trayectoria del drenaje y de los materiales coluviales que han sido depositados a través del tiempo. Actualmente, la mayoría de los depósitos provienen del cerro Las Palmas (al NE) y otra parte del cerro La Gasca (al SW), esto explica porque la plaza central y las estructuras al oeste han sido cubiertas por 0.5 m de material arcillo arenoso y en la cancha del juego de pelota, que sumados a los materiales de adobe de la parte alta, por casi dos metros.

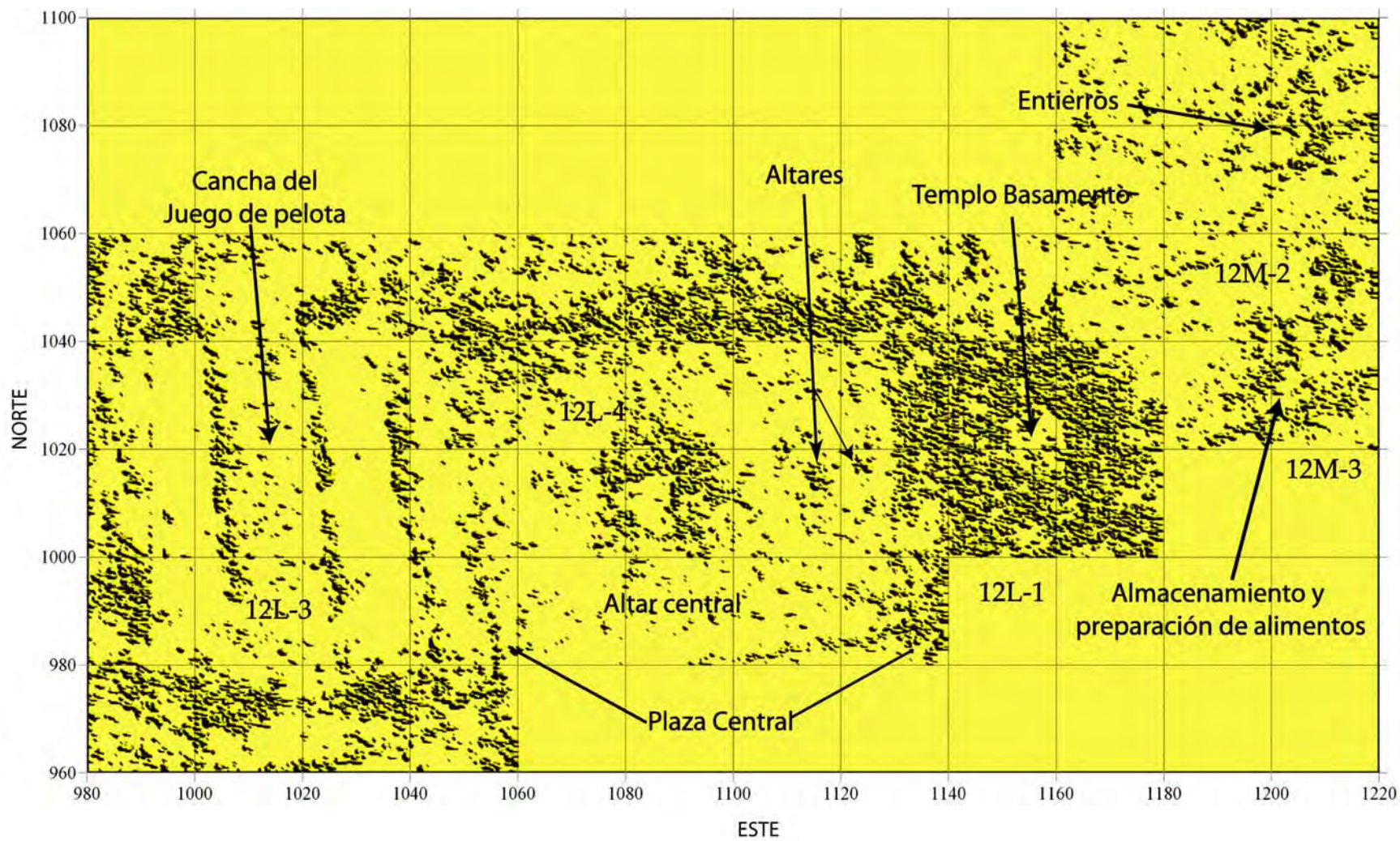


Figura 7.9. Mapa de relieve empleado para destacar la arquitectura del sitio.

existencia fue confirmada y en otros casos descubierta por las técnicas geofísicas de prospección, específicamente por el gradiente magnético que resultó ser la técnica más útil debido al contraste de las propiedades magnéticas de gran parte del material constructivo del sitio. La geofísica también mostró que otros desniveles, como el que se encuentra al norte de la estructura 12L-1, no tenían correspondencia arqueológica concluyente y son debidos posiblemente a causas naturales.

Resulta también interesante el análisis de la imagen de PCA, las componentes PC2 y PC3 están relacionadas con las condiciones de salud de la vegetación y con las propiedades del suelo, el peso proporcional de estas componentes en el canal verde y azul genera patrones de falso color muy característicos que podrían ser indicadores de actividad cultural, sin embargo estos patrones no se extienden sobre toda el área donde se sabe que existen vestigios arqueológicos, sólo se encuentran en algunas porciones del terreno, correlacionándose bien con los datos magnéticos y con el MDT (flechas en la fig. 7.11). Es posible que en algunas partes del terreno este tipo de respuesta espectral del suelo y la vegetación fue modificada por las actividades modernas, como el camino que cruza el sitio, la ganadería y la agricultura.

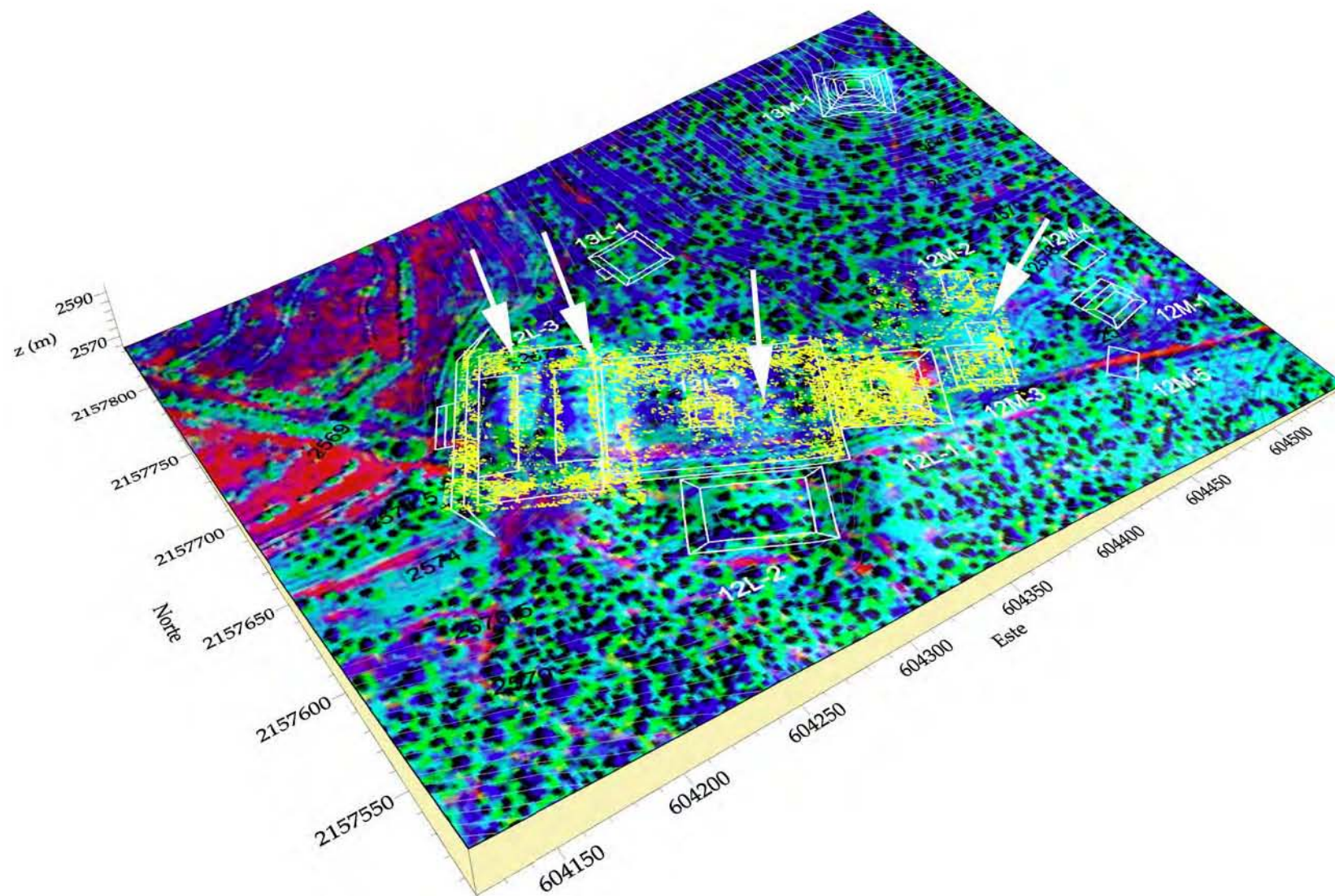


Figura 7.11. Superposición de los datos magnéticos (color amarillo) y la imagen de satélite PCA sobre el MDT, destacando las áreas donde hay buena correspondencia.

7.4. TOPOGRAFÍA CON GPS DIFERENCIAL

La topografía realizada para el proyecto de la Laguna se había levantado por el equipo de Carballo con estación total y fue constantemente corregida con la finalidad de tener un soporte topográfico confiable acorde a las necesidades del trabajo arqueológico. Sin embargo, fue necesario obtener la topografía de un sector del terreno con una precisión mayor debido a que los datos eléctricos y de georradar necesitaban corregirse para mostrar las profundidades con respecto a las cotas del terreno. Para este propósito se utilizó un GPS diferencial *Ashtech Promark2*, de precisión centimétrica, (fig. 7.12). Se utilizaron dos receptores, uno en la base y el otro como *rover* cinemático. La modalidad de adquisición fue *stop and go*, con tiempos de observación de 15 segundos por estación y de 30 a 45 minutos al inicializar la base en modo estático. La zona levantada fue el juego de pelota, para la adquisición de los datos fue necesario el diseño de una red de trabajo para definir en forma general en que lugares se tomarían los datos y cual sería la densidad de muestreo para destacar detalles y pequeñas elevaciones, adicionalmente se establecieron los puntos que servirían como estaciones de control. El GPS se puede utilizar efectivamente en áreas parcialmente obstruidas, con poca vegetación, la clave es ser capaz de captar la cantidad suficiente de satélites, por lo menos de 5, distribuidos apropiadamente en el cielo. Para alcanzar la precisión centimétrica los datos fueron procesados con el programa *Asthech Solutions* que maneja y procesa los datos crudos, generando posicionamientos precisos de los puntos levantados sobre el terreno.



Figura 7.12. Ubicación de la estación base GPS en el *Datum* del sitio.

Para el levantamiento con GPS, fue necesario establecer puntos de arranque precisos para elaborar la topografía del sitio. Se eligieron lugares que fueran reconocibles desde las fotografías aéreas y que sirvieran posteriormente para crear el MDT, al combinar la topografía y la fotografía del sitio. Para este proyecto se eligió como la base principal el *Datum* del sitio (B001) y otras distribuidas en el terreno en forma rectangular, (fig.7.13).

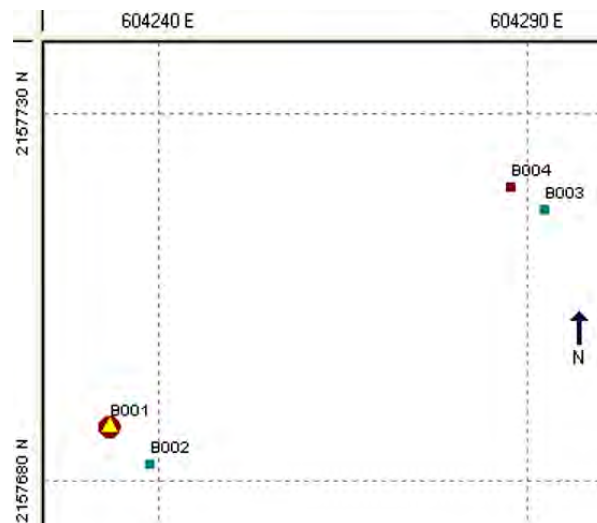


Figura 7.13. Levantamiento de Bases GPS en coordenadas UTM, en modo estático previo al levantamiento cinemático.

El trabajo de topografía en el juego de pelota se realizó en la modalidad *stop and go*, recorriendo el sitio con el *rover* cinemático en líneas este-oeste, dejando la base topográfica midiendo en modo estático en el *Datum*, (fig.7.14). Al inicio del levantamiento cinemático se obtuvieron lecturas en los vértices de la retícula magnética, posteriormente se adquirieron lecturas en puntos intermedios de la retícula y en los límites exteriores del terreno. El recorrido fue siguiendo trazos aproximadamente rectos y en *zigzag*. En la cancha del juego de pelota, las estructuras principales se detallaron con mayor cantidad de puntos para que los desniveles quedaran marcados fielmente en los mapas.

Los datos procesados de GPS produjeron el mapa topográfico con intervalos entre cotas de 10 centímetros, (fig. 7.15). Se destacan los desniveles este y oeste del juego de pelota, caracterizados por dos elevaciones alargadas en dirección norte-sur, con la zona central ligeramente más baja y plana; así como los grandes desniveles con las cotas más bajas en la zona noroeste del sitio.



Figura 7.14. Levantamiento con GPS en modo cinemático.

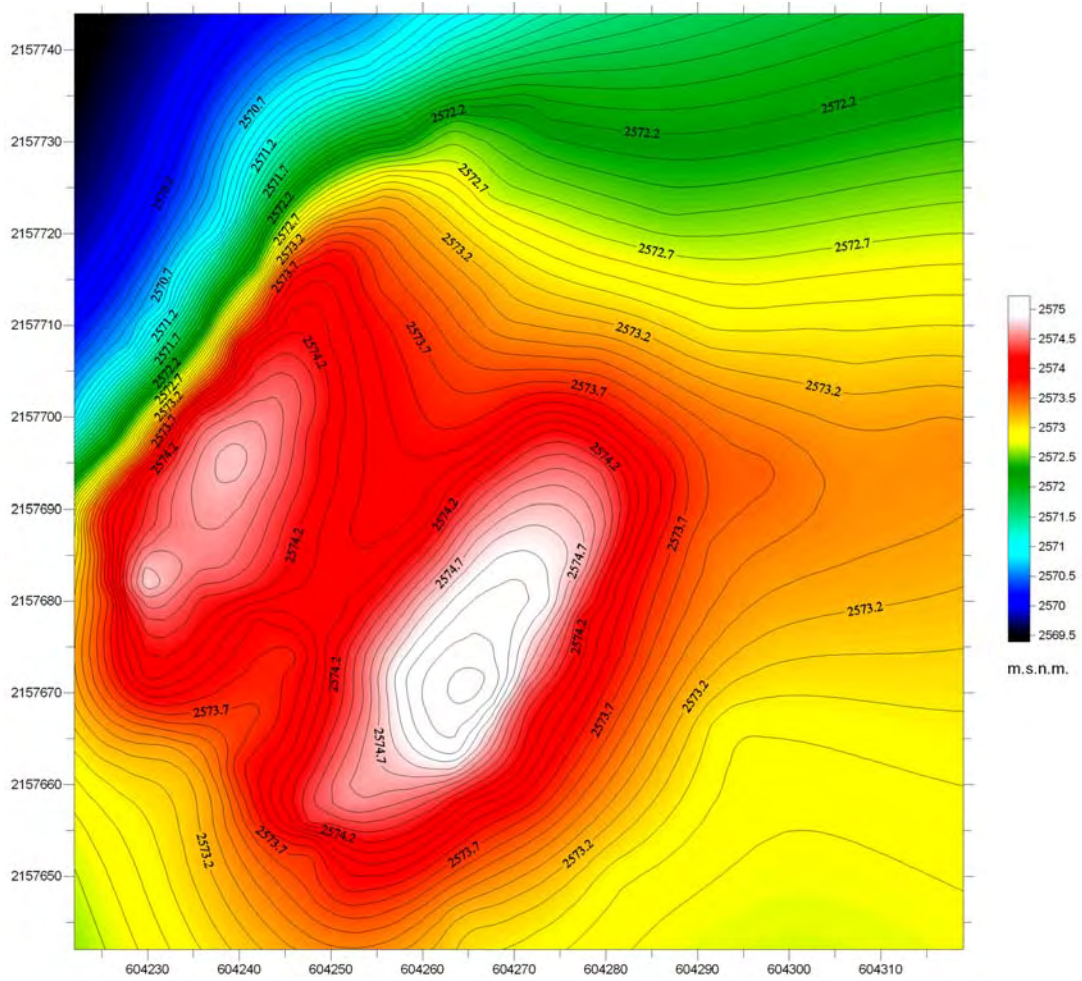


Figura 7.15. Mapa topográfico con GPS del juego de pelota con intervalo entre cotas de 10 cm.

Con el procesamiento de los datos topográficos se crearon modelos digitales del terreno de la cancha del juego de pelota, mostrando con mayor detalle los montículos que conforman las gradas, y la zona central que corresponde a la cancha con una pequeña depresión, figuras 7.16 y 7.17. Los modelos también exhiben los desniveles más grandes ubicados al noroeste y suroeste del sitio

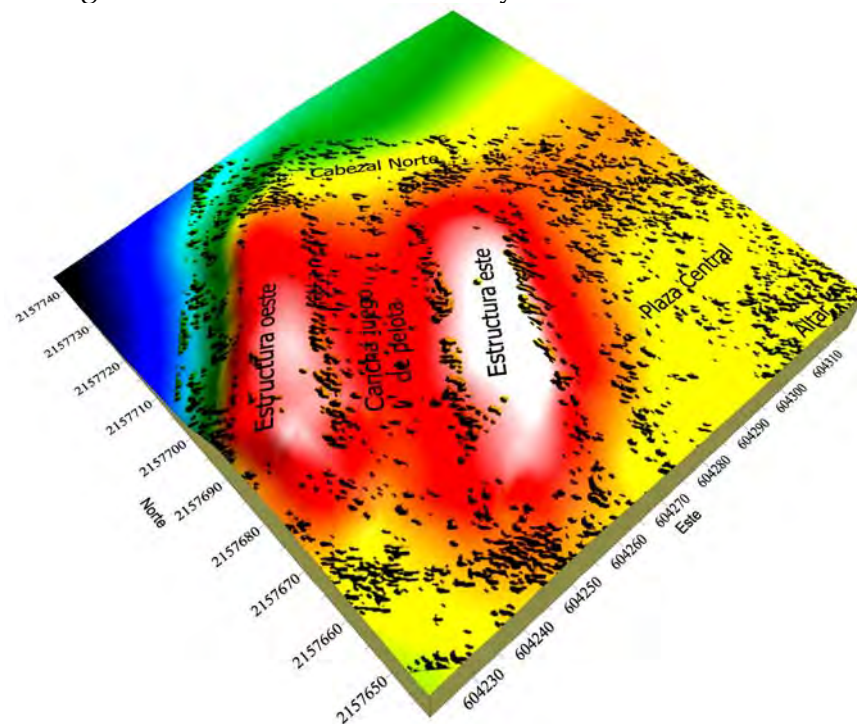


Figura 7.16. MDT de la cancha del juego de pelota visto desde el suroeste.

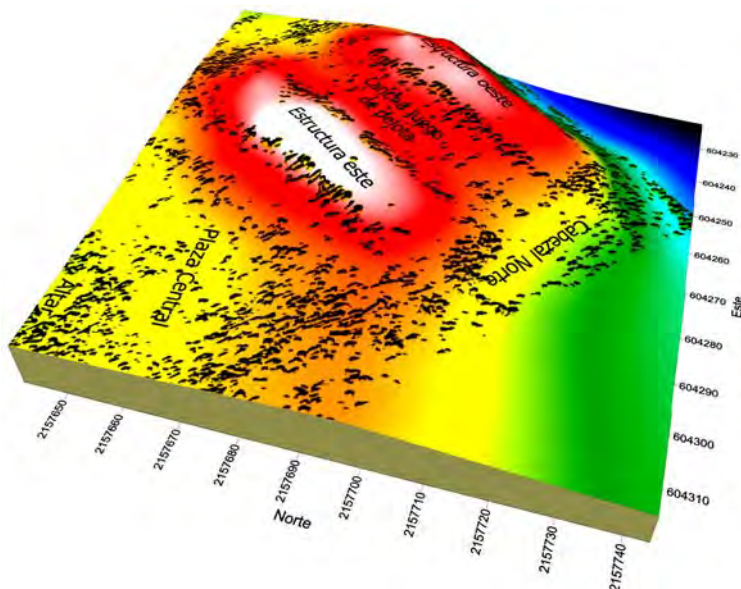


Figura 7.17. MDT de la cancha del juego de pelota visto desde el noreste.

La combinación de la topografía y los datos de gradiente magnético, (fig.7.18), muestra la correspondencia entre los alineamientos de roca con los desniveles topográficos, principalmente los límites de la cancha y el alineamiento SW-NE correspondiente a la estructura Este. En la cima de la estructura Este y Oeste, y en la parte central de la cancha, el desnivel es menor y corresponde con un relleno potente de arcillas con menor cantidad de rocas, la cotas muestran que el relleno de la cancha es más alto en el centro, lo que sugiere que se rellena con desechos de estructuras superiores.. Hacia el Este del mapa, el límite oeste y norte de la plaza se marcan claramente con las cotas topográficas, y los datos magnéticos muestran un patrón más disperso asociado con material removido y derrumbe. Al oeste y al sur del juego de pelota, el desnivel es muy marcado y coincide con un patrón magnético disperso producido por materiales de derrumbe. Al norte, el cabezal del juego de pelota en forma de I latina, muestra desniveles suaves que no tienen relación directa con el patrón magnético.

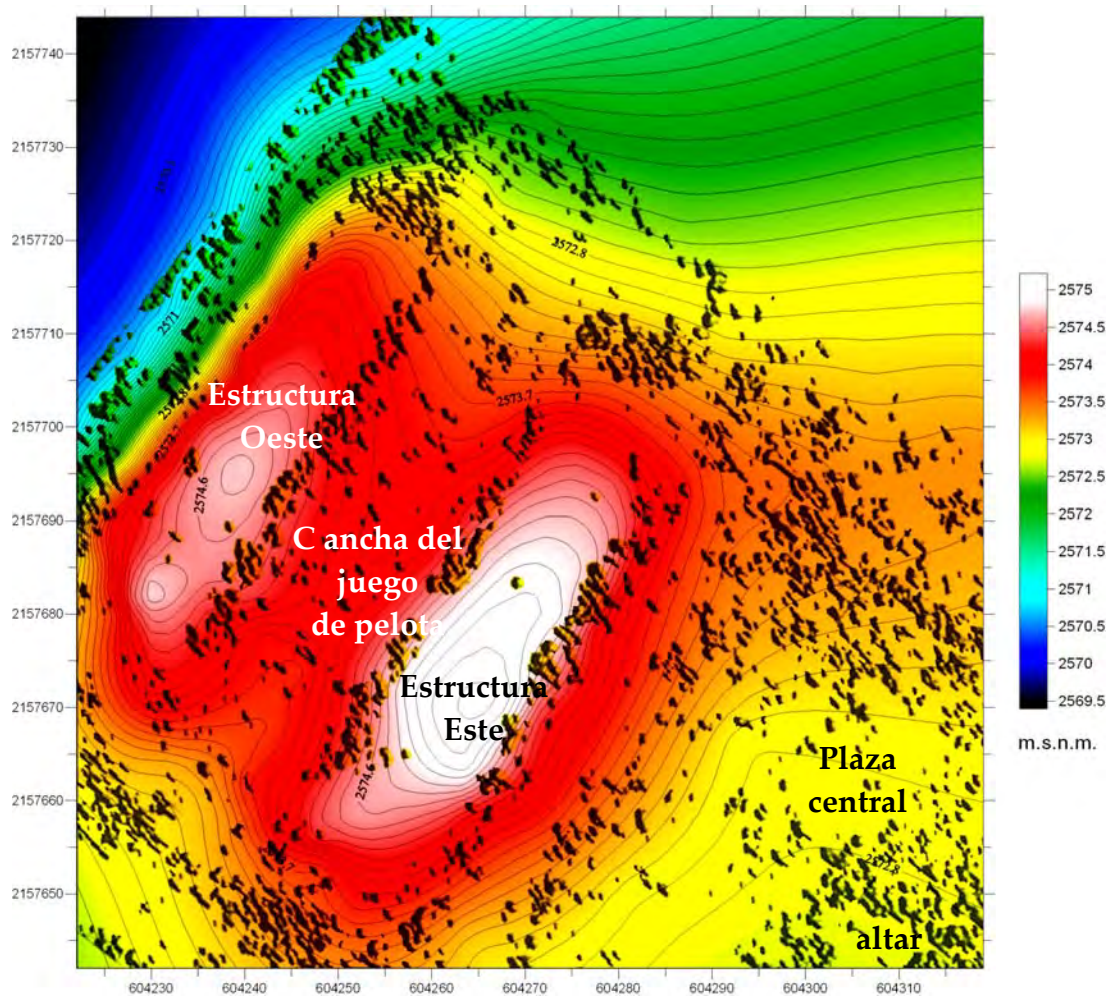


Figura 7.18. Superposición de datos magnéticos sobre el mapa topográfico con GPS.

7.5 PROSPECCIÓN CON GEORRADAR Y ELÉCTRICA.

La prospección electromagnética con georradar y eléctrica se enfocó en la cancha del juego pelota, la plaza central y la zona de almacenamiento y preparación de alimentos; para comprobar parte de los resultados obtenidos con el gradiente magnético y su posterior verificación con la excavación arqueológica.

La adquisición de los datos fue realizada con un equipo *SIR System 2* de *GSSI* y una antena monoestática de 400 MHz en modo continuo, para explorar el subsuelo hasta una profundidad aproximada de 2 m. Los perfiles de georradar se recolectaron con una ventana de tiempo de 60 ns, 32 trazas por segundo y 512 muestras por traza. Los datos se procesaron con el programa *Radan 6.6* de *GSSI* para remover ruido, mejorar la resolución horizontal y vertical, normalizar la distancia horizontal y estimar la profundidad de penetración. Algunos de los procesos empleados fueron: filtrado paso-banda con frecuencia de corte de (75-800 MHz), filtro *background removal* de 999 trazas, filtro *running average* de 7 trazas, normalización de distancias y ajuste de ganancias.

Las verificaciones eléctricas se realizaron con el equipo *Geoscan RM15*, dos con el arreglo polo-polo y una con pseudosección polo-dipolo. Los datos fueron graficados con el programa *Plot y Surfer* para comprobar en que lugares se presentaban altos o bajos resistivos que pudieran estar asociados con las estructuras arqueológicas detectadas por la prospección magnética.

7.6. ESTUDIOS EN EL JUEGO DE PELOTA (12L-3)

Inicialmente se realizaron dos verificaciones exploratorias con las técnicas eléctricas en modalidad polo-polo y con georradar para detectar elementos constructivos de la cancha del juego de pelota. La verificación 1, de 60 m de longitud, en dirección este-oeste, se hizo para confirmar la localización del cabezal norte de la cancha de juego de pelota. La verificación 2, de 100 m de largo y en dirección este-oeste, se realizó para verificar los cuerpos laterales de roca del juego de pelota y el altar central.

Las dos verificaciones preliminares presentan buena correspondencia con las anomalías magnéticas de las rocas utilizadas en la construcción de esta obra, (fig.7.19). En la verificación 1, el cabezal norte presenta claramente sus límites E-W con altos resistivos y reflexiones fuertes, en el perfil eléctrico y el radargrama respectivamente. Para la verificación 2, la parte central y las gradas de la cancha del juego de pelota son detectadas por ambas técnicas; casi al final de los perfiles se

detectaron los límites de otro elemento constructivo de forma rectangular cercano al altar central.

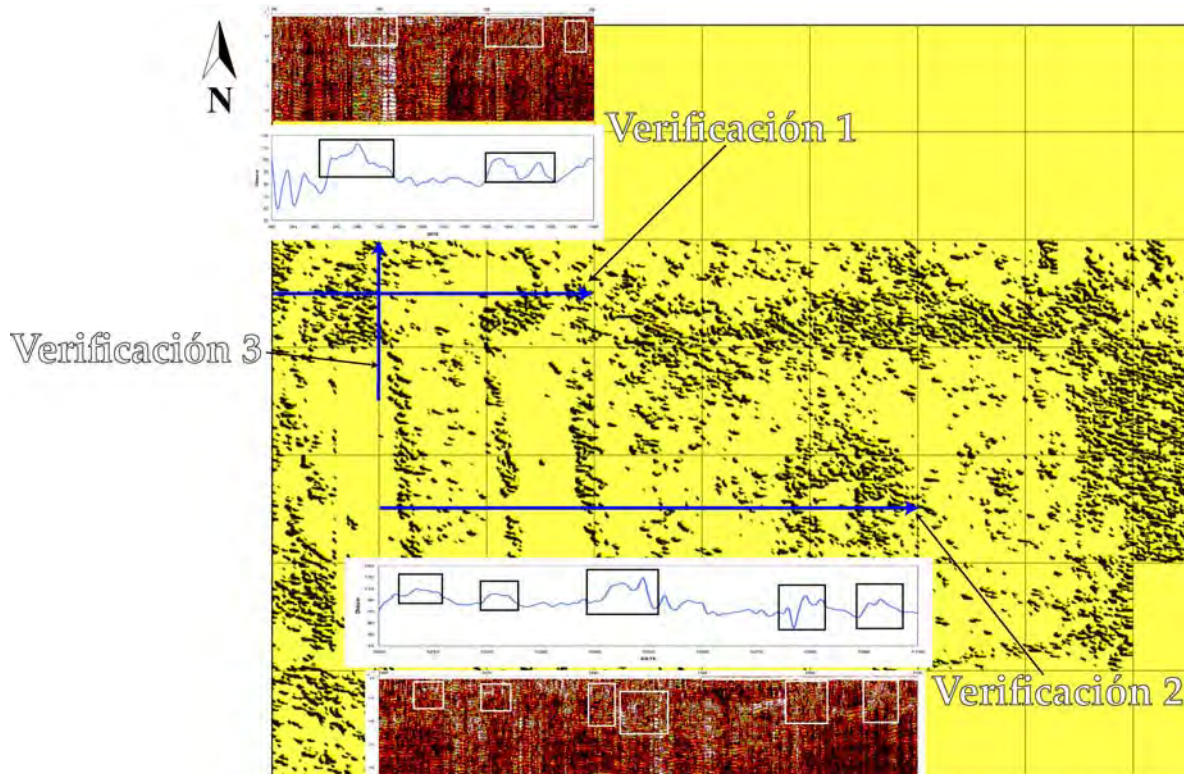


Figura 7.19. Comparación de los datos de gradiente magnético, eléctrica y georradar en el cabezal norte y en la zona central de la cancha del juego de pelota.

La verificación 3 incluyó un sondeo polo-dipolo como complemento a las verificaciones con georradar distribuidas de la mitad hacia el norte del juego de pelota, (fig.7.20). El intervalo de muestreo fue de 1 m y el número de niveles por cada punto de medición fue de 10 lecturas. Debido a que este tipo de arreglos consumen mucho tiempo, se decidió hacer solamente un sondeo para comprobar la sensibilidad y la penetración de esta técnica en estos contextos, y comparar el resultado con el perfil de georradar.

La pseudosección eléctrica registra materiales esparcidos y superficiales de N1052-1058; en este lugar el mapa de gradiente magnético presenta un patrón disperso de las rocas superficiales del límite norte del juego de pelota con derrumbe, (fig. 7.21). Por su parte el radargrama de la línea F9 muestra un grupo de reflexiones de N1054-1058 y un ligero cambio de elevación, confirmando la presencia de rocas asociadas con el límite de la estructura hasta una profundidad de 1.2 m desde la superficie, (fig. 7.22).

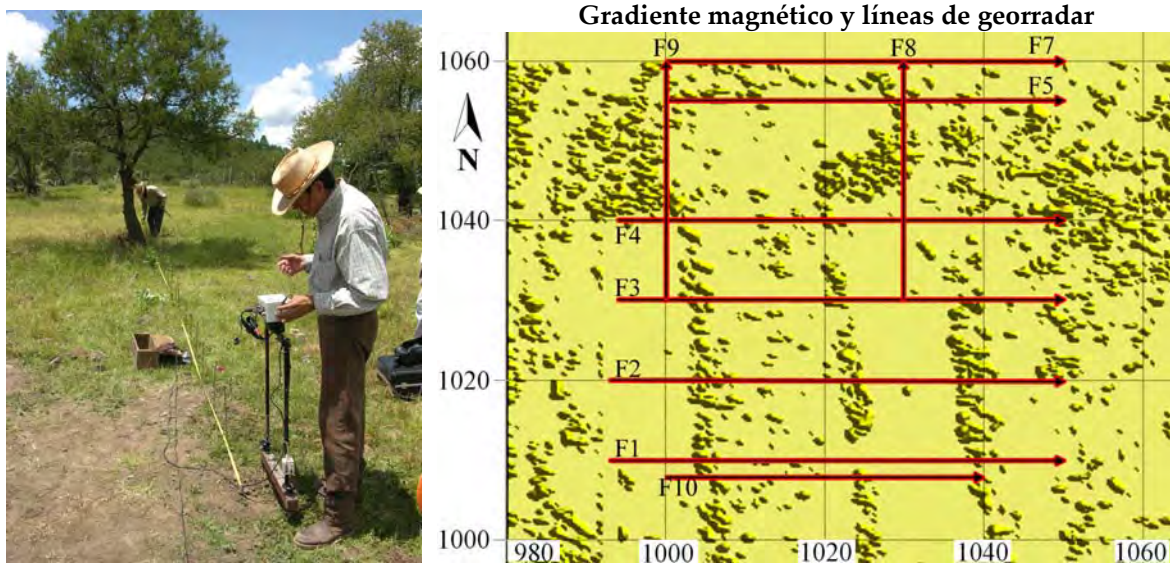


Figura 7.20. Adquisición de datos eléctricos utilizando el arreglo polo-dipolo y líneas de georradar levantadas en la cancha del juego de pelota.

Entre N1041-1046 la pseudosección eléctrica marca un alto resistivo producido por una gran cantidad de rocas agrupadas en donde hace esquina la estructura en forma de "I" del juego de pelota; el mapa magnético destaca en esta zona gran cantidad de rocas, mientras que el radargrama exhibe reflexiones de gran amplitud enfocadas en N1041-N1044 y hasta 1 m de profundidad desde la superficie, asociadas con esta anomalía.

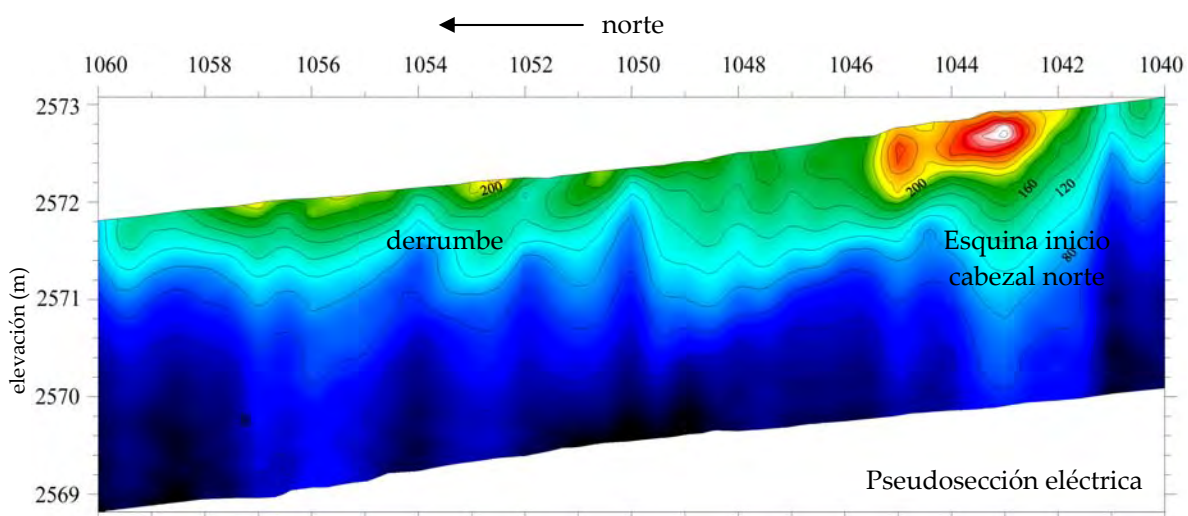


Figura 7.21. Verificación 3, pseudosección eléctrica polo-dipolo realizada al este del cabezal norte del juego de pelota.

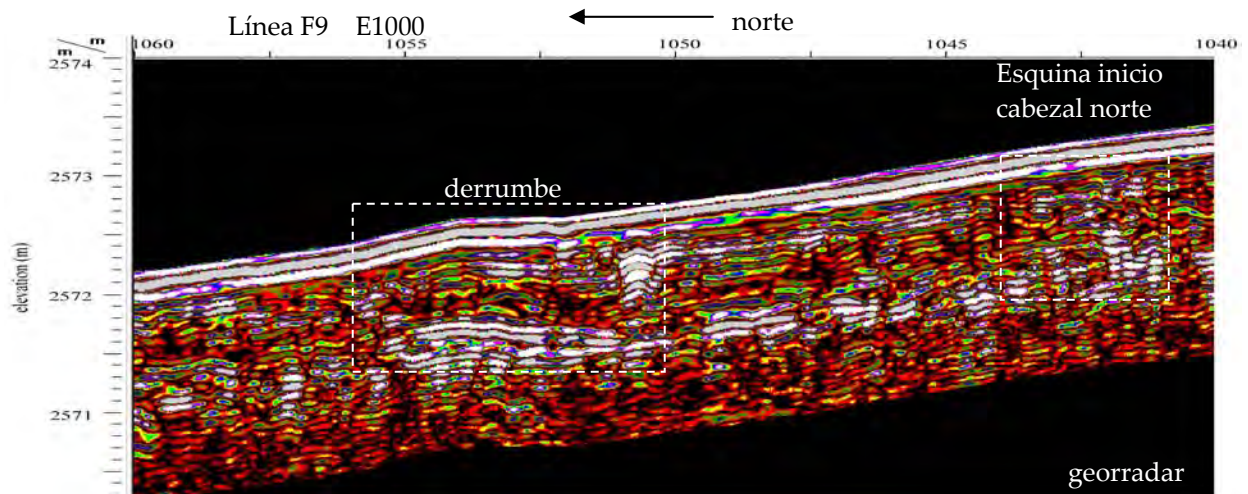


Figura 7.22. Radargrama de la línea F9 en el mismo lugar de la pseudosección eléctrica.

Las excavaciones hechas en la cancha del juego de pelota entre N1007-1009 y E1006-1023, revelaron edificaciones de roca de los elementos que conforman la estructura constructiva, (fig.7.23). La línea de georadar F1 adquirida en N1010 y E993-1050, 1 m al norte de la excavación, detectó los taludes de la cancha del juego de pelota de E1004-1005 y de E1023-1025, (fig.7.24). De E1030-1033, el radargrama muestra una reflexión intensa producida por un elemento constructivo que no se observa en el mapa magnético, quizás sea un piso a un apisonado. En E1040, hay otra reflexión fuerte aunque más pequeña que esta relacionada con uno de los alineamientos de roca registrados en el mapa magnético. Más al este, el radargrama marca un grupo de reflexiones que van de E1046-1049, producidas un derrumbe de rocas marcando el inicio de la plaza central.

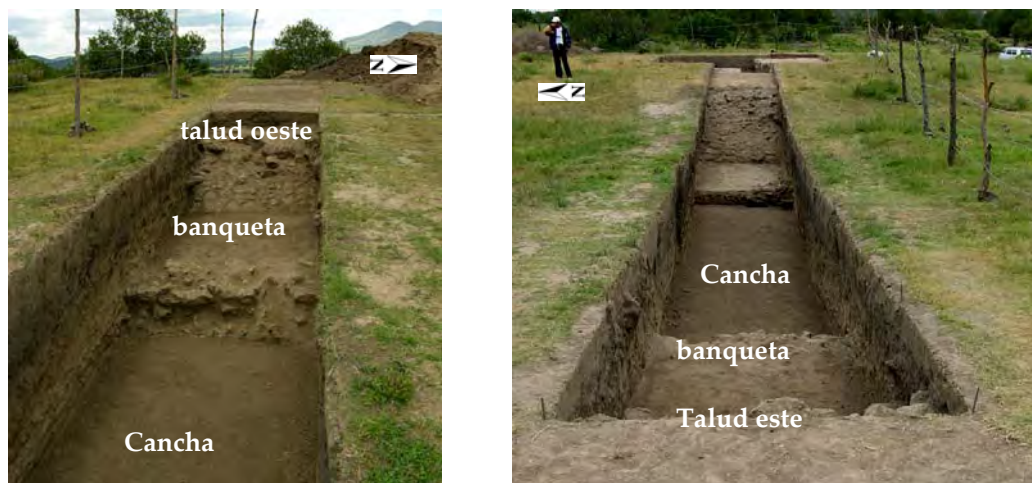


Figura 7.23. Excavaciones en el juego de pelota exhibiendo los límites oeste y este.

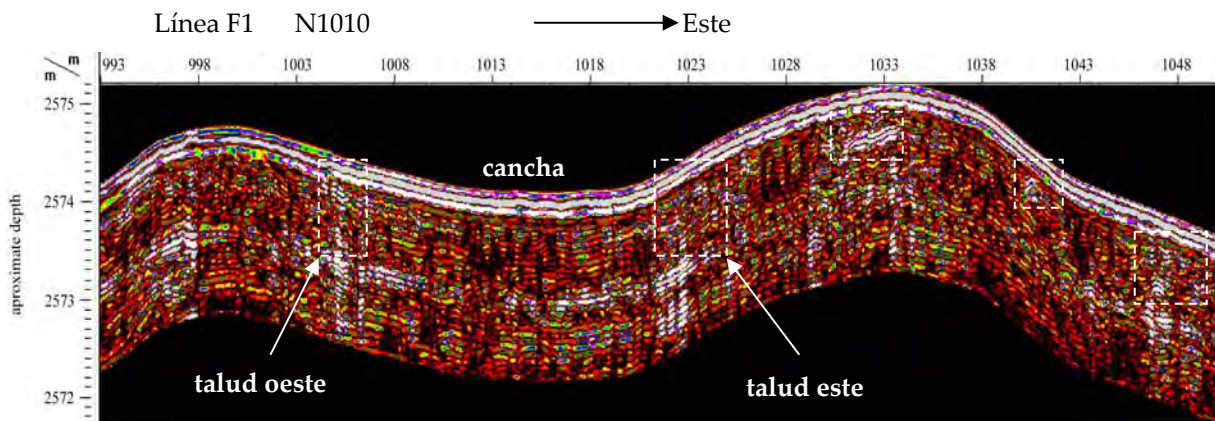


Figura 7.24. Perfil de georadar de la línea F1, cercano a la excavación arqueológica.

El radargrama de la línea F2, (fig.7.25), registra el talud oeste del juego de pelota de E1003-1007, con una reflexión en forma de talud. El talud este de la cancha presenta una reflexión más amplia de E1022-1029, asociada con el talud de roca y otros elementos constructivos que continúan hacia el este. Más al este, otro de los alineamientos N-S que se observan en el mapa magnético se relacionan con una reflexión en el radargrama de E1036-1038.

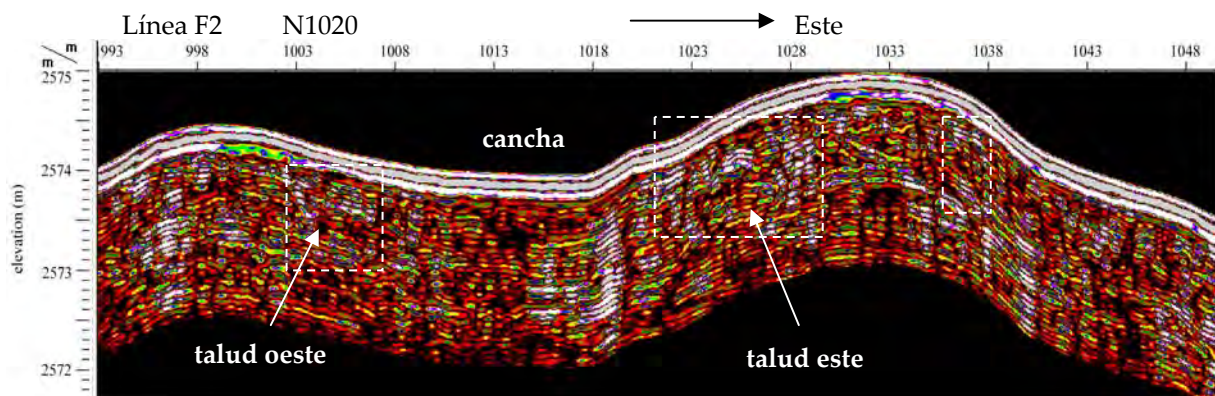


Figura 7.25. Radargrama de la línea F2, mostrando las anomalías relacionadas con elementos del juego de pelota.

Más al norte de la zona de excavación se realizó la línea F3 para comprobar la continuidad de las gradas de roca del juego de pelota y el límite este de la plaza central, el radargrama correspondiente muestra gran cantidad de reflexiones producidas por estos elementos numerados para ser comparados más fácilmente con la figura 7.26.

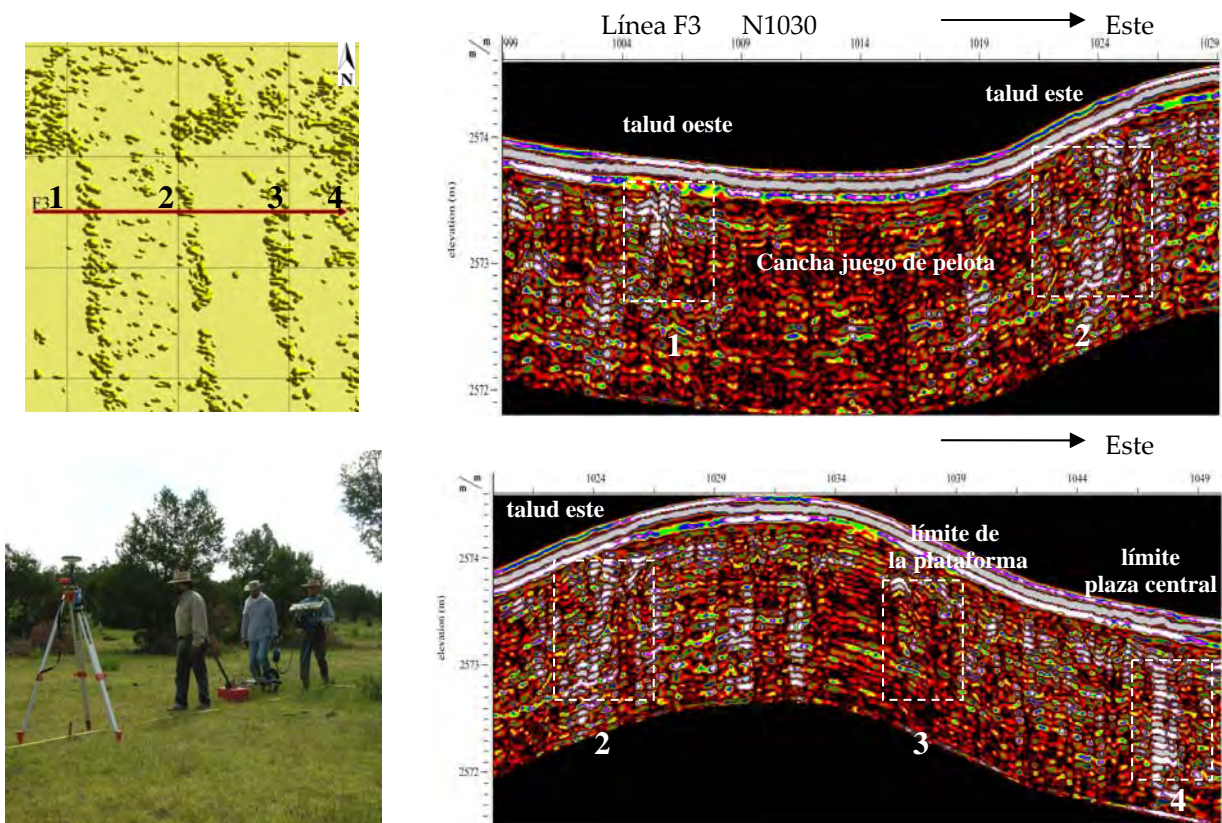


Figura 7.26. Elementos constructivos de roca detectados en el juego de pelota y en la plaza.

Los alineamientos de roca de la cancha del juego de pelota, se registran como dos grupos de reflexiones de gran amplitud de E1004-1006.5 y E1023-1026.5, figura 7.27. La intensidad de las reflexiones indican construcciones masivas de roca; el límite Este muestra una estructura en forma de talud bien marcada, mientras que en la parte Este se alcanza apenas a definir.

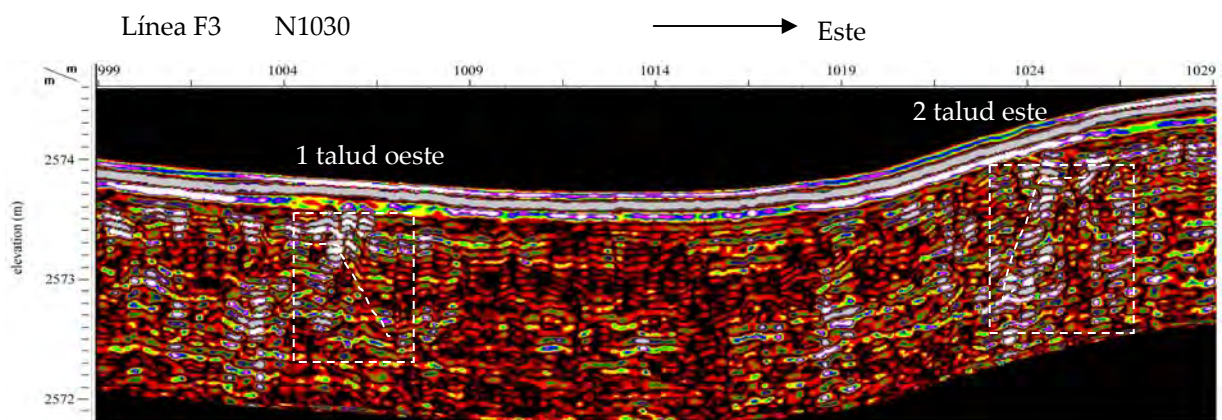


Figura 7.27. Estructuras de rocas asociadas con los límites de la cancha del juego de pelota.

El radargrama de la línea F4, adquirida sobre N1040, detecta tres reflexiones intensas que se correlacionan con tres alineamientos de rocas del juego de pelota, (fig. 7.28). El alineamiento del oeste se registra de E1000-1004, y en el Este de EE1019-1023; por otra parte hay otro alineamiento de rocas de E1035-1038, que coincide con material disperso en superficie y una acumulación de rocas a 0.5 m de profundidad desde la superficie.

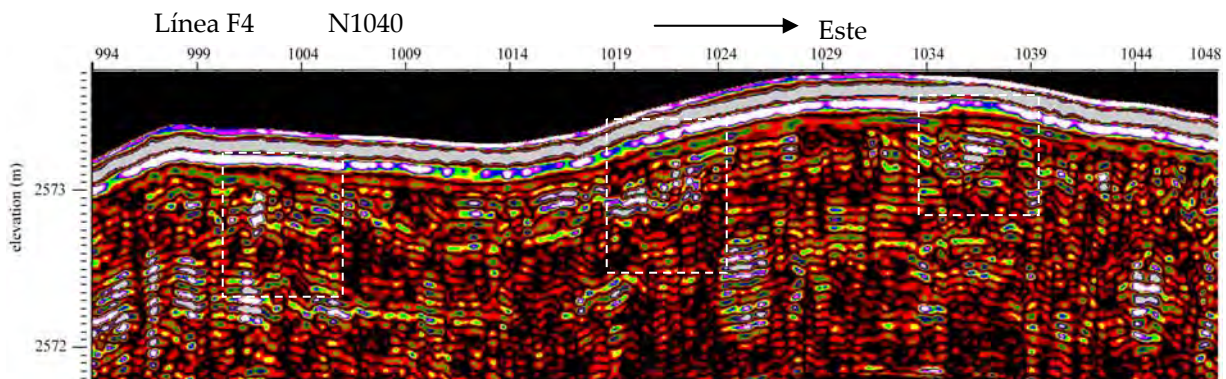


Figura 7.28. Detección de elementos constructivos en la zona norte del juego de pelota.

La excavación al norte del juego de pelota en N054.5-1058.5 y E1010-1014, reveló un muro E-W entre N1056-1057 y otro más pequeño con dirección N-S en E1011.5. El radargrama de la línea F5, registra un grupo de reflexiones desde E1001-1014, asociadas con los muros encontrados en la excavación. El límite NE del juego de pelota en forma de "I", se detecta en el radargrama de E1028-1031 y coincide con la posición del alineamiento de rocas en el mapa magnético. Hay otras reflexiones importantes registradas ubicadas en E1034-1036 y en E1039-1043, producidas por alineamientos de roca poco definidos en el mapa de gradiente magnético, (fig. 7.29).

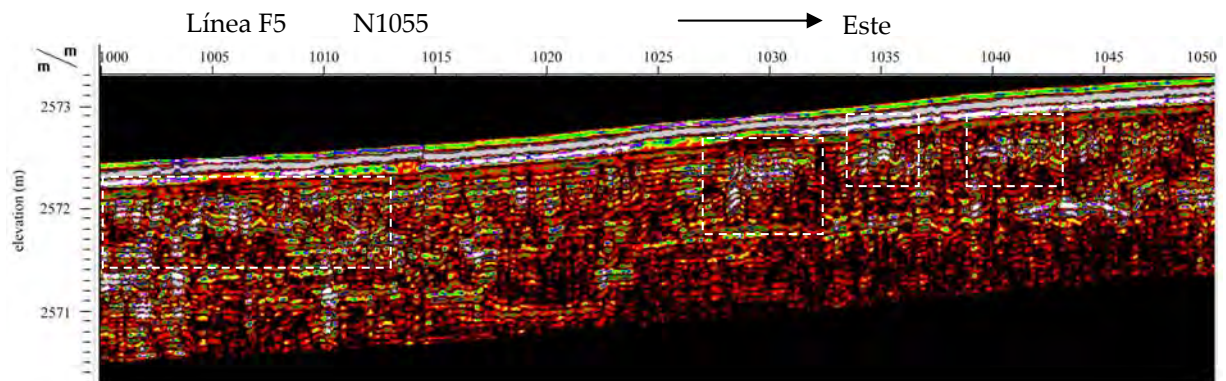


Figura 7.29. Reflexiones asociadas con alineamientos de roca al norte del juego de pelota.

La línea de georradar más al norte, ubicada sobre N1060, muestra una zona amplia de reflexiones que se extiende desde E1000-1025, enfatizándose de E1002-1015, que estarían directamente relacionadas con material más consolidado del cabezal norte del juego de pelota, y más al Este con materiales de derrumbe de esta estructura, (fig. 7.30).

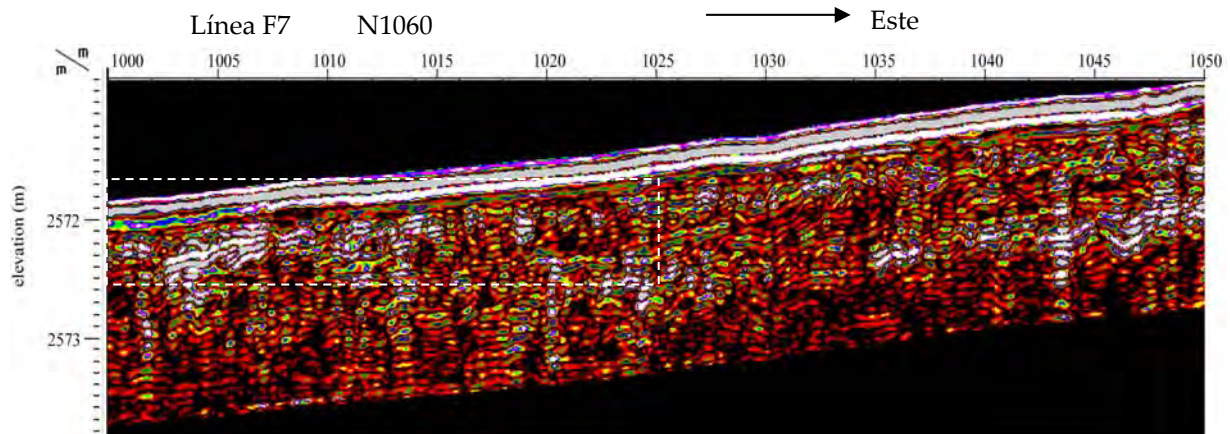


Figura 7.30. Radargrama de la línea F7 ubicada en el extremo norte del juego de pelota.

En E1030 se levantó la línea de georradar F8 para detectar la esquina SE del juego de pelota, los datos de radar muestran notoriamente de E1046-1051 las reflexiones producidas por el alineamiento de rocas en la parte E-SE del cabezal en forma de "I", y se correlacionan exactamente con el alineamiento de rocas registradas en el mapa de gradiente magnético, (fig. 7.31).

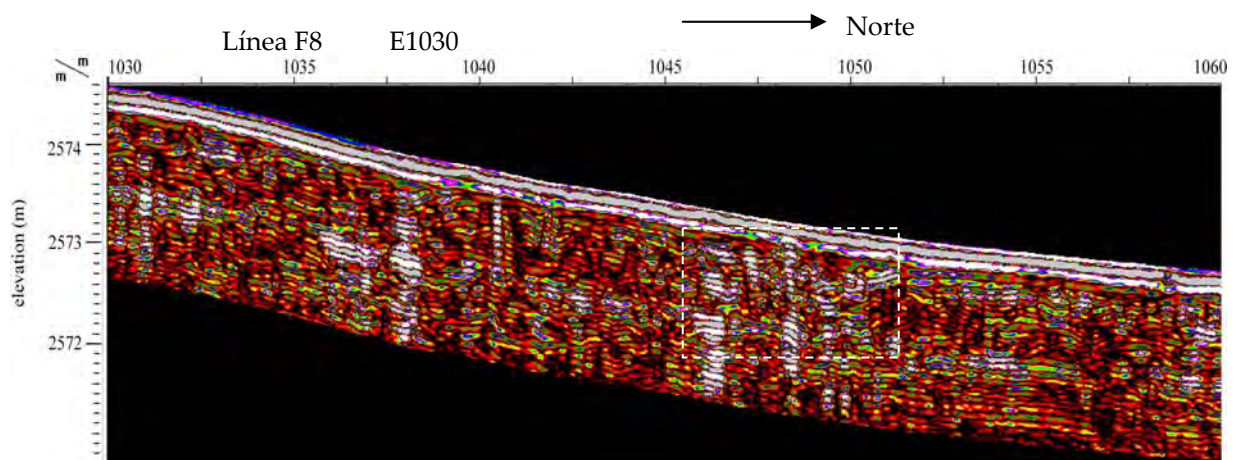


Figura 7.31. Detección el límite del E-SE en el cabezal norte del juego de pelota.

7.7. ESTUDIOS EN LA PLAZA CENTRAL

En la parte Este de la plaza central, las excavaciones arqueológicas descubrieron los vestigios que habían sido detectados con las técnicas de gradiente magnético y georradar, (fig.7.32). La verificación de las anomalías mostró una relación muy estrecha entre los datos magnéticos y los elementos arqueológicos excavados; la anomalía ubicada de N1013-1015, sobre E116, es producida por 2 muros de roca E-W y N-S, y resultaron ser los cimientos de una estructura que según Carballo parece haber servido como un altar-adoratorio (E12L-5).

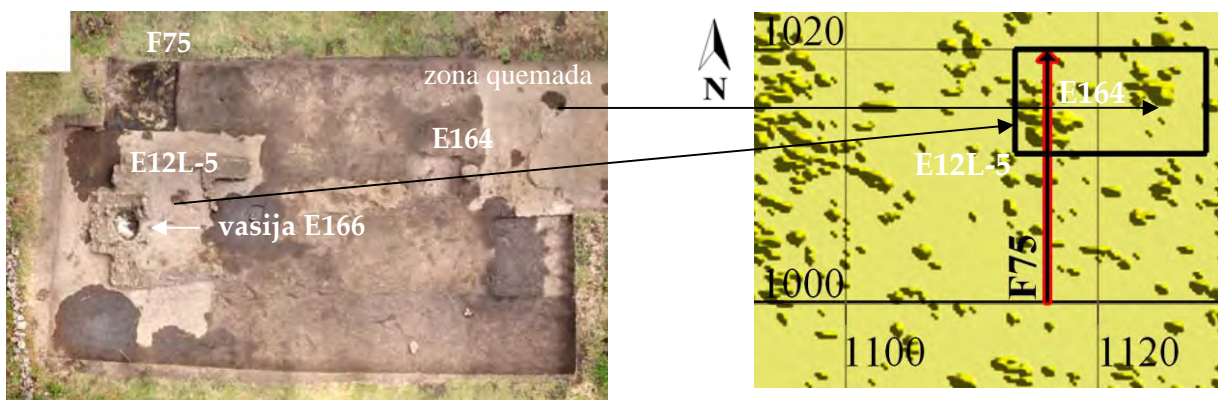


Figura 7.32. Excavación arqueológica en la zona al oriente del altar central.

La línea de georadar más cercana a la zona de excavación y que verifica uno de los elementos constructivos (E12L-5) encontrados fue la línea F75, (fig.7.33). A lo largo del radargrama de N1000-1020, se registra entre 0.5-0.6 m de profundidad el contacto de tepetate observado en el perfil de la excavación. De N1008-1011.5, los datos revelan fuertes reflexiones producidas por cimientos de piedra y que son visibles también en el mapa de gradiente magnético aunque con menos intensidad.

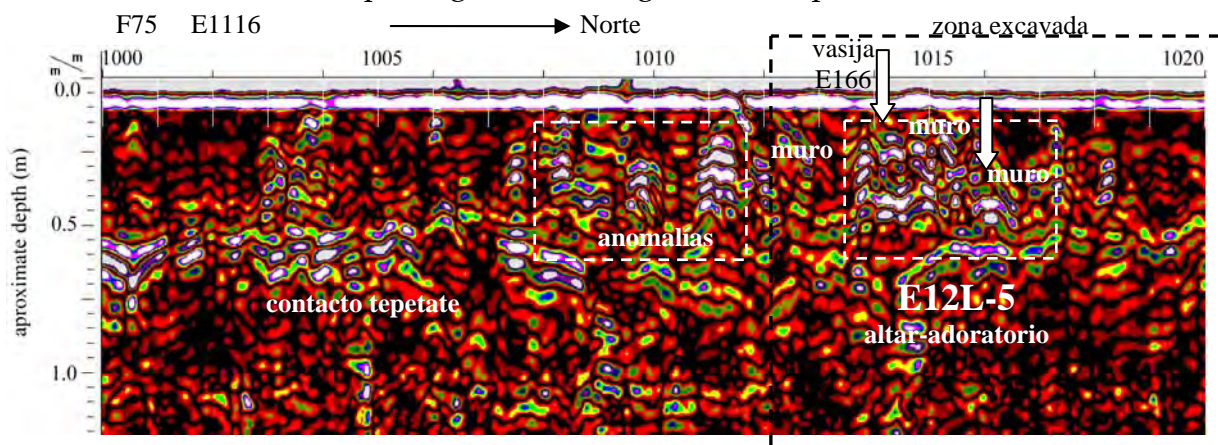


Figura 7.33. Radargrama de la línea F75, ubicada sobre la zona excavada al oriente del altar central (E12L-4).

La zona que tuvo oportunidad de ser verificada con la excavación (E12L-5) descubrió muros de piedra y un depósito circular que contenía una vasija (elemento 166) posicionada boca-abajo dentro de un pequeño altar cuadrado. Según Carballo, la vasija es de tipo Rojo Laguna y de forma de cuenco mayor con perfil de silueta compuesta (BC1b en su tipología).

Otra zona que también se verificó con excavación y que los datos magnéticos mostraron como una anomalía interesante, resultó ser un fragmento de piso quemado y próximo a un pequeño altar (E164) que según Carballo nos demuestran algo de la vida ritual en la comunidad durante el Formativo Terminal. Carballo propone que este tipo de elementos hablan de la importancia del eje central que va desde el templo principal (Est. 12L-1) hacia la plaza central pasando por tres posibles altares, el Elemento 164, la Estructura 12L-5 y el altar central (Est. 12L-4), y que simbolizan un volcán como la Malinche, la fertilidad y el agua.

7.8. ESTUDIOS SOBRE LA ESTRUCTURA 12L-1 (TEMPLO BASAMENTO)

Al oriente de la plaza central se encuentra la estructura 12L-1, en ella se adquirió la línea F27, con el propósito de detectar posibles subestructuras en los taludes y en la cima del montículo. Las excavaciones arqueológicas realizadas en la cima revelaron tres etapas de construcción y una gran cantidad de elementos arqueológicos, estructuras como un muro de roca, un escalón y una alfarda en la parte poniente, pisos y depósitos parecidos a piletas, según Carballo servían para rituales relacionados con el agua; además de rocas parcialmente cementadas sin un arreglo geométrico aparente, producto de los derrumbes al ser abandonado el sitio. Aunado a todas las estructuras constructivas, se encontraron muchos elementos ligados a ofrendas, como son: los huesos y las garras de un felino, copas, cuchillos de obsidiana, rocas con pirita, conchas de ostión, cuentas y discos de piedra verde. Estos elementos según Carballo eran para los rituales que se realizaban encima del templo durante el Formativo Terminal e involucraron el uso de depresiones en el piso de forma de cuencos o cisternas, los cuales podrían haber sido parte de rituales de agua y fertilidad, como está documentado para otros sitios contemporáneos.

El radargrama de la línea F27 exhibe reflexiones fuertes en la parte poniente, relacionadas con gran cantidad de rocas derivadas aparentemente de derrumbes, (fig. 7.34). De E1148.5-1151.5, se registran reflexiones fuertes originadas por un muro ancho y de un escalón parcialmente destruido. Por otro lado, de E1152.5-1156.5, la amplitud de las reflexiones disminuye, y es originada por un ligero cambio en la distribución de los materiales que son debidas a rocas esparcidas,

restos de pisos y algunas piletas. El radargrama también muestra, aunque sutilmente un piso o apisonado a 15 cm y otro a 40 cm de profundidad aproximadamente.

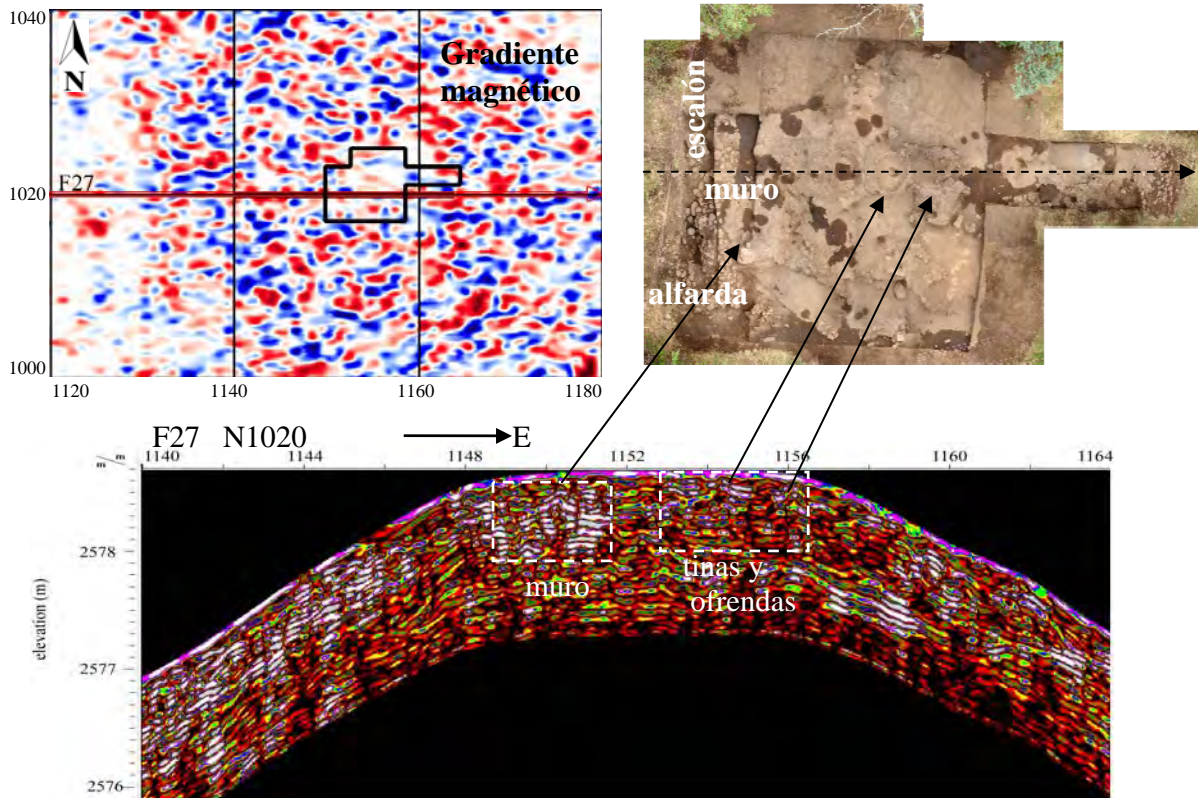


Figura 7.34. Verificación con georadar sobre la estructura 12L-1.

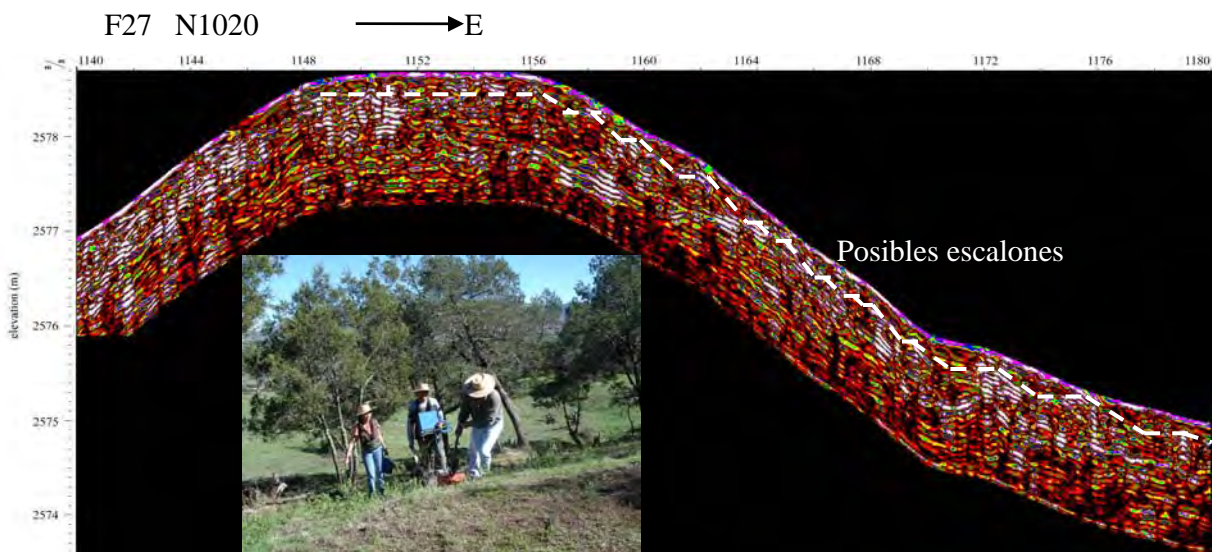


Figura 7.35. Representación de la estructura escalonada al oriente de la estructura 12L-1.

En la parte oriente del montículo, los datos de georadar mostraron reflexiones en la orilla de la estructura que pudieran corresponder con los escalones. En E1172, al bajar del montículo se aprecia una reflexión fuerte asociada con un escalón ancho o una pequeña plataforma, (fig.7.35).

En dirección sur-norte se levantó la línea F28 y se compararon los datos geofísicos con los elementos encontrados en la excavación arqueológica, (fig.7.36). El mapa de gradiente presenta gran cantidad de dipolos producidos por gran cantidad de rocas a una profundidad desde la superficie hasta 0.5 m aproximadamente, sólo en la cima se pueden distinguir dipolos de elementos individuales. El radargrama detecta una reflexión importante de N1014-1016 de una posible subestructura. En N1020.5 y en N1021.5 se distinguen dos reflexiones fuertes de muros superficiales que pueden ser el remate de la estructura constructiva en la parte superior. También registra de N1016.5-1020 una reflexión casi horizontal asociada con un piso. De N1022-1026, se detecta otro tramo de un piso entre 0.4 y 0.5 m de profundidad y que fue verificado con la excavación arqueológica.

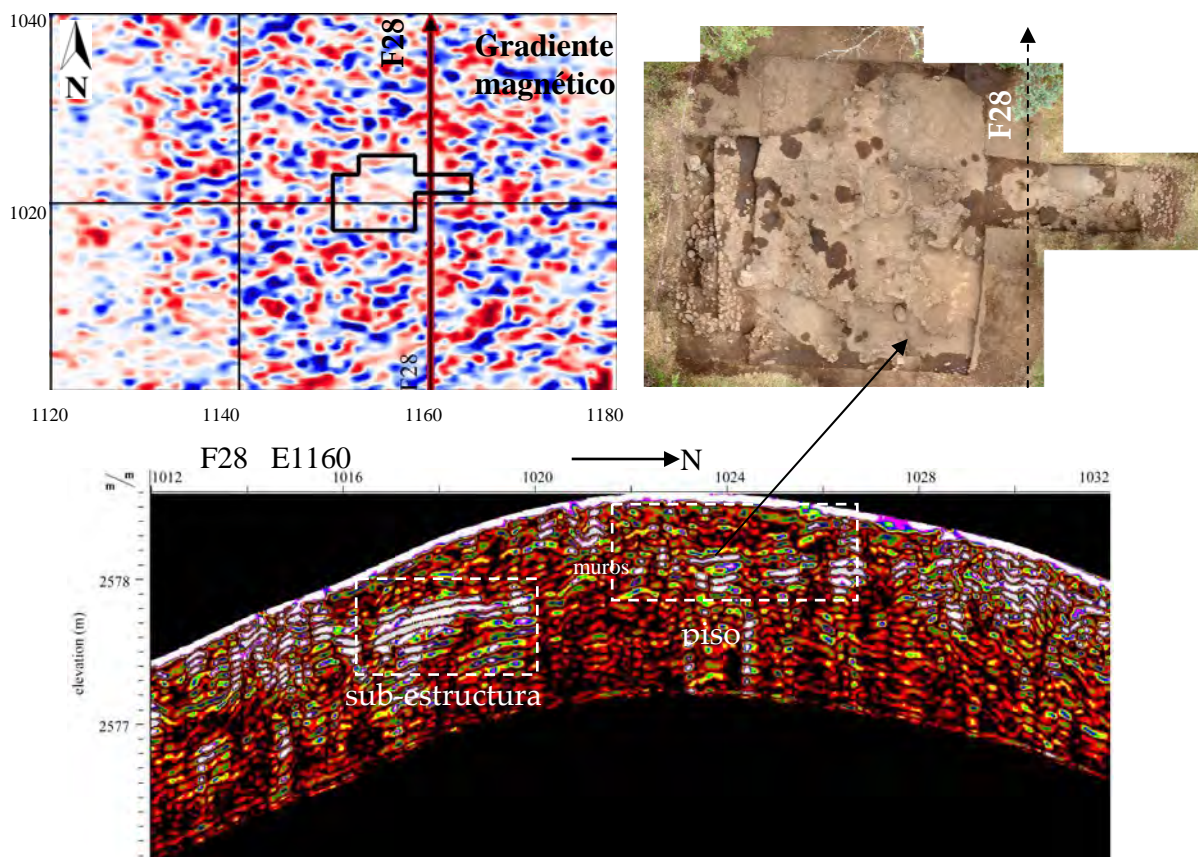


Figura 7.36. Línea de georadar adquirida sobre la estructura 12L-1 en dirección S-N y que registró uno de los pisos hallados en la excavación.

7.9. ESTUDIOS EN LA ZONA 2 ESTRUCTURA 12M-3

El mapa general de gradiente magnético y las hipótesis planteadas por el Dr. Carballo señalaron a esta zona como de interés arqueológico, por el contexto en el que se ubica y porque presentaba dipolos magnéticos importantes, así como una pequeña elevación apenas perceptible desde la superficie. Un indicador que refuerza las anomalías geofísicas fue observado en las imágenes satelitales, como una zona con reflectancia muy particular, reconociéndose muy bien en las imágenes de *QuickBird*, principalmente en la imagen de las componentes principales (PCA), (fig. 7.11).

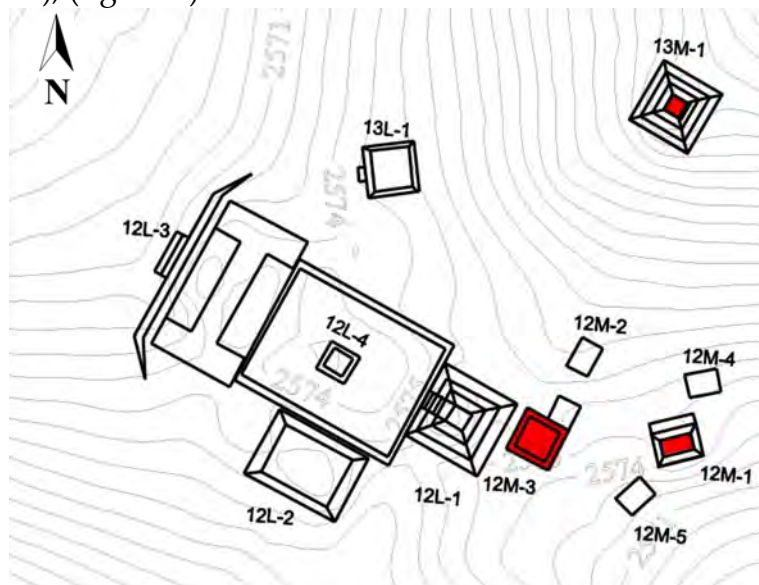


Figura 7.37. Áreas prospectadas en la zona oriental del sitio arqueológico.

- **Prospección con gradiente magnético**

La figura 7.37 muestra el área donde se realizó la prospección geofísica sobre la estructura 12M-3, al oriente del sitio. Con el objetivo de obtener un mapa con mayor resolución, se levantaron nuevos datos de gradiente magnético con una separación entre líneas de 1 m y con 4 lecturas por metro, (fig. 7.38).

Este conjunto de anomalías sugiere varias zonas contiguas sometidas a calentamiento que abarcan aproximadamente una superficie de 5 x 5 metros, (N1051-1056 y E1211-1216). Se encuentra al noreste de lo que parece ser una estructura habitacional (cuarto 1) de 14 x 7 metros, de (N1043-1057 Y E1210-1217). Entonces es probable que se trate de una zona adjunta para la producción de algún producto a base de fuego.

En estas retículas se observa lo que parecen ser los cimientos de una estructura constructiva rectangular de (cuarto 2) 15 x 7 metros (N1030-1045 Y E1197-1204), hecha con piedras acomodadas en dirección norte-sur, este-oeste. Al centro del lado oeste del cuarto se aprecia una ausencia de rocas que indica un posible acceso al cuarto, por la parte externa se aprecia un adosamiento también de piedra. La presencia de este conjunto de anomalías se relaciona con una elevación topográfica del terreno y también está relacionada con el conjunto de anomalías magnéticas que se encuentran al noreste y que se han interpretado como una zona de calentamiento asociado a esta habitación. La anomalía esta dividida en dos conjuntos, el primero parece ser un cuarto grande de N1035-1045, E1198-1203 (10 x 5 m) y otro al sur de N1030-1035, E1197-1202 (5 x 5 m) utilizado probablemente como un área de preparación de alimentos.

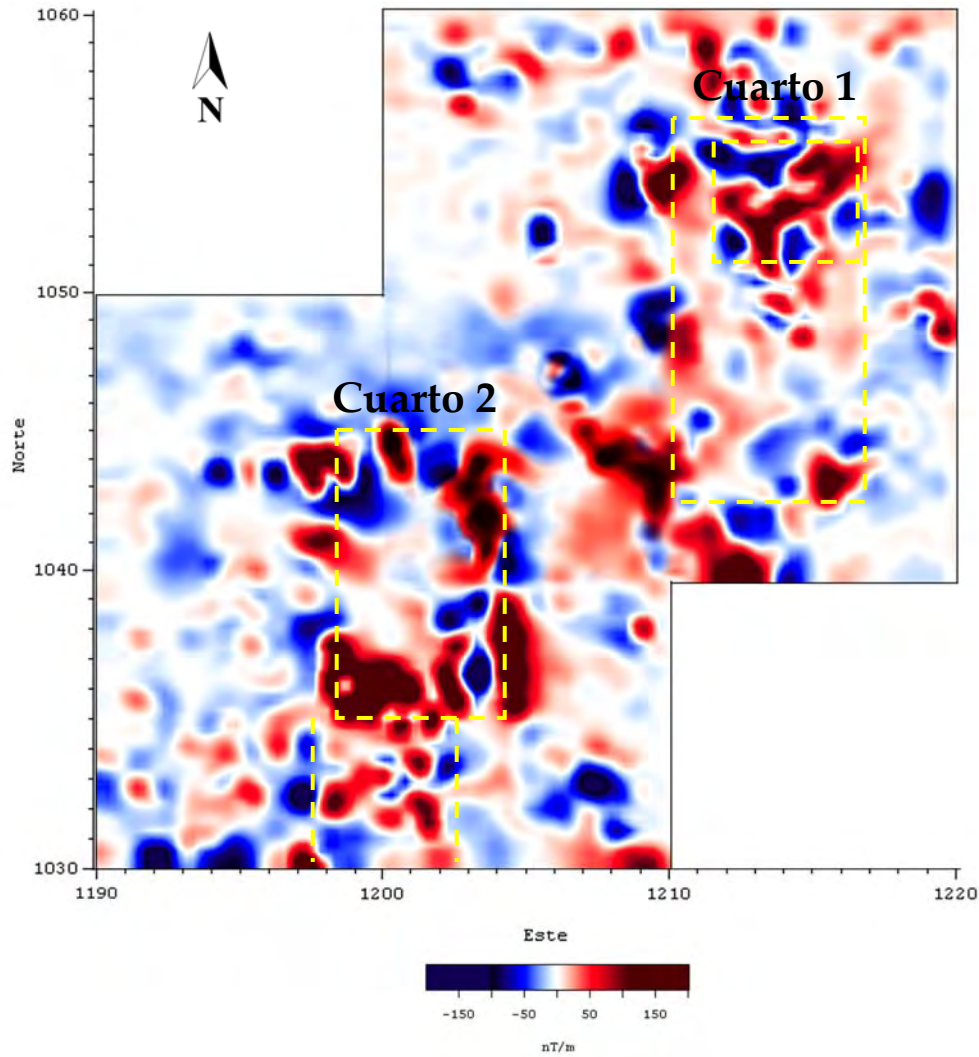


Figura 7.38. Mapa de gradiente magnético adquirido sobre la estructura 12M-3.

- **Prospección con georradar**

Con el georradar se realizaron verificaciones en las mismas áreas del gradiente magnético donde se registraron anomalías importantes sugiriendo un conjunto con al menos dos cuartos. Se levantaron 80 líneas de georradar con una longitud de 20 m y una separación entre líneas de 0.5 m (fig. 7.39), se utilizó esta densidad de líneas para registrar correctamente los límites entre muros y los elementos constructivos dentro de los cuartos.



Figura 7.39. Recolección de datos con georradar en las retículas G53 y G54.

La combinación de los dos cortes de profundidad a 0.5 m de ambas retículas, revelan dos grupos de anomalías con diferencias importantes, (fig. 7.40). El primer conjunto ubicado al noreste (G53), parece ser un cuarto con muros grandes en dirección norte-sur y con uno o dos accesos ubicados al sur y al suroeste. Al interior de este cuarto es posible que haya un relleno con piedras o un piso bien conservado debido a la intensidad de las reflexiones. También se detecta una estructura semicircular, asociada posiblemente con un fogón. En la retícula G54 se registraron un gran número de alineamientos relacionados con muros, todo parece indicar que se trata de un gran cuarto con varias divisiones y con un acceso no muy claro en la parte oeste. También se observa que en el interior de las divisiones ubicadas al sur hay dos pequeñas reflexiones semicirculares que podrían ser producidas por fogones. En la parte sureste y noroeste de esta retícula se observan patrones lineales y semicirculares, posiblemente son otros elementos constructivos anexos a este gran cuarto.

La relación de las anomalías magnéticas con las reflexiones registradas en los cortes de profundidad es buena, en general se observa que los alineamientos

registrados con el georradar tienen una contraparte magnética, (fig. 7.41). El gradiente magnético tiende a sobredimensionar los elementos que detecta, mientras que el georradar con el intervalo entre líneas muy cerrado registra correctamente los límites, las dimensiones de los muros y los elementos al interior de los cuartos. La figura muestra la superposición del corte de profundidad con georradadar sobre el mapa magnético.

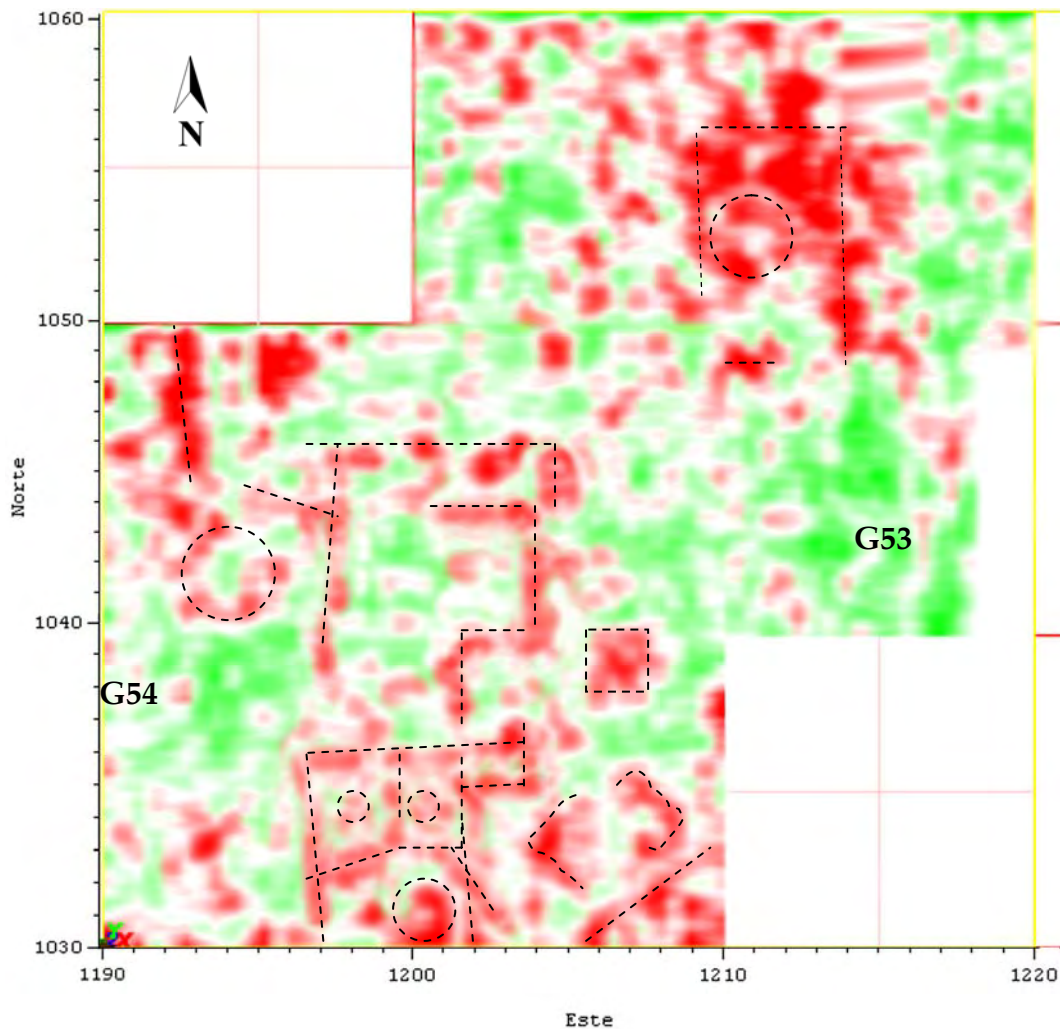


Figura 7.40. Cortes de profundidad con georradadar obtenidos en las retículas G53 y G54.

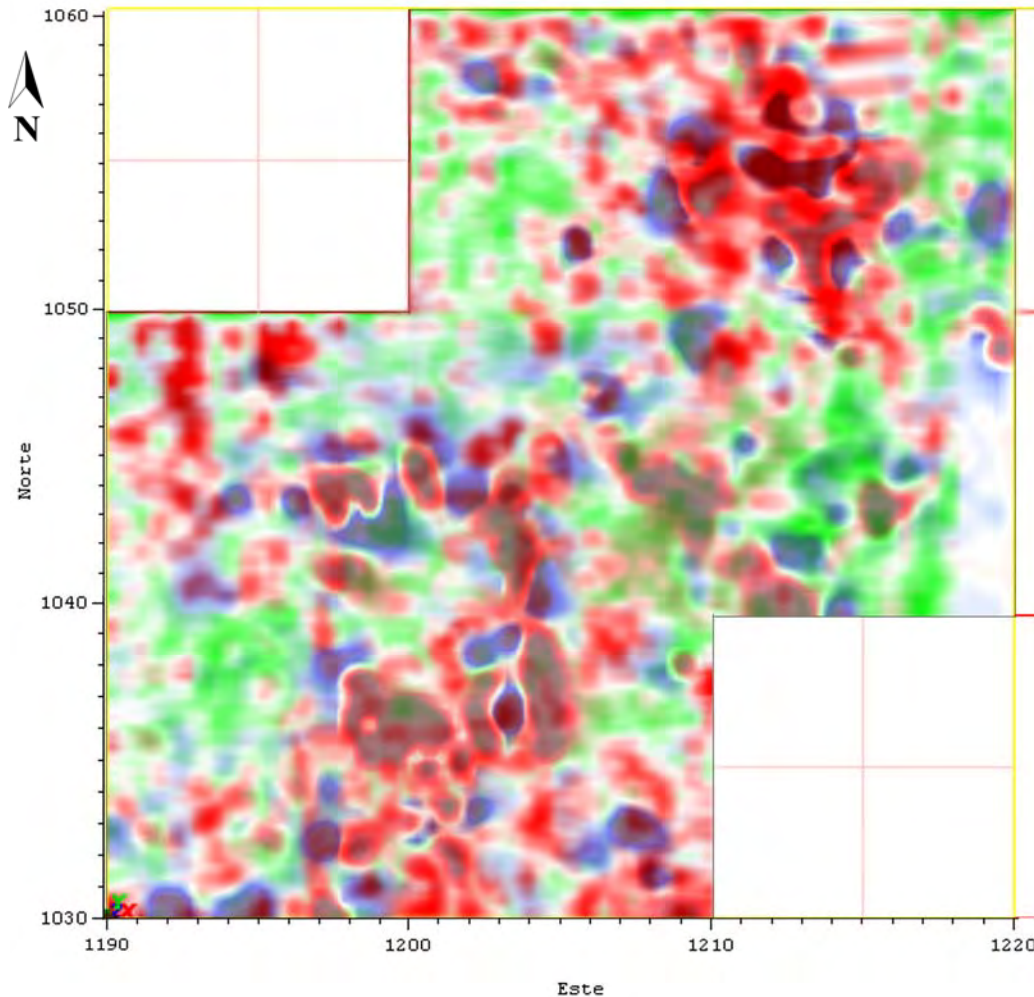


Figura 7.41. Superposición de los datos de georradar sobre el mapa magnético.

La superposición de los mapas geofísicos sobre las fotografías aéreas, que se adquirieron con globo cautivo cuando finalizó la excavación arqueológica, revelaron la relación que hay entre las anomalías registradas con ambas técnicas y los elementos arqueológicos encontrados, (fig.7.42). La excavación arqueológica abarcó la parte suroeste de la retícula G53 y extendió más al sur de la G54. Se observa la relación que guardan las anomalías del corte de georradar con los muros y los elementos al interior de los cuartos, parte de las reflexiones registradas coinciden con la mayoría de los elementos encontrados y otras que se habían interpretado como continuación de los muros son producidas por tlecuiles o fogones, ubicados en la parte noreste y sureste de la fotografía aérea. Otras reflexiones no tienen correspondencia con la arquitectura, y están asociadas con elementos aislados en el relleno de la excavación y también generadas por la dispersión de las reflexiones.

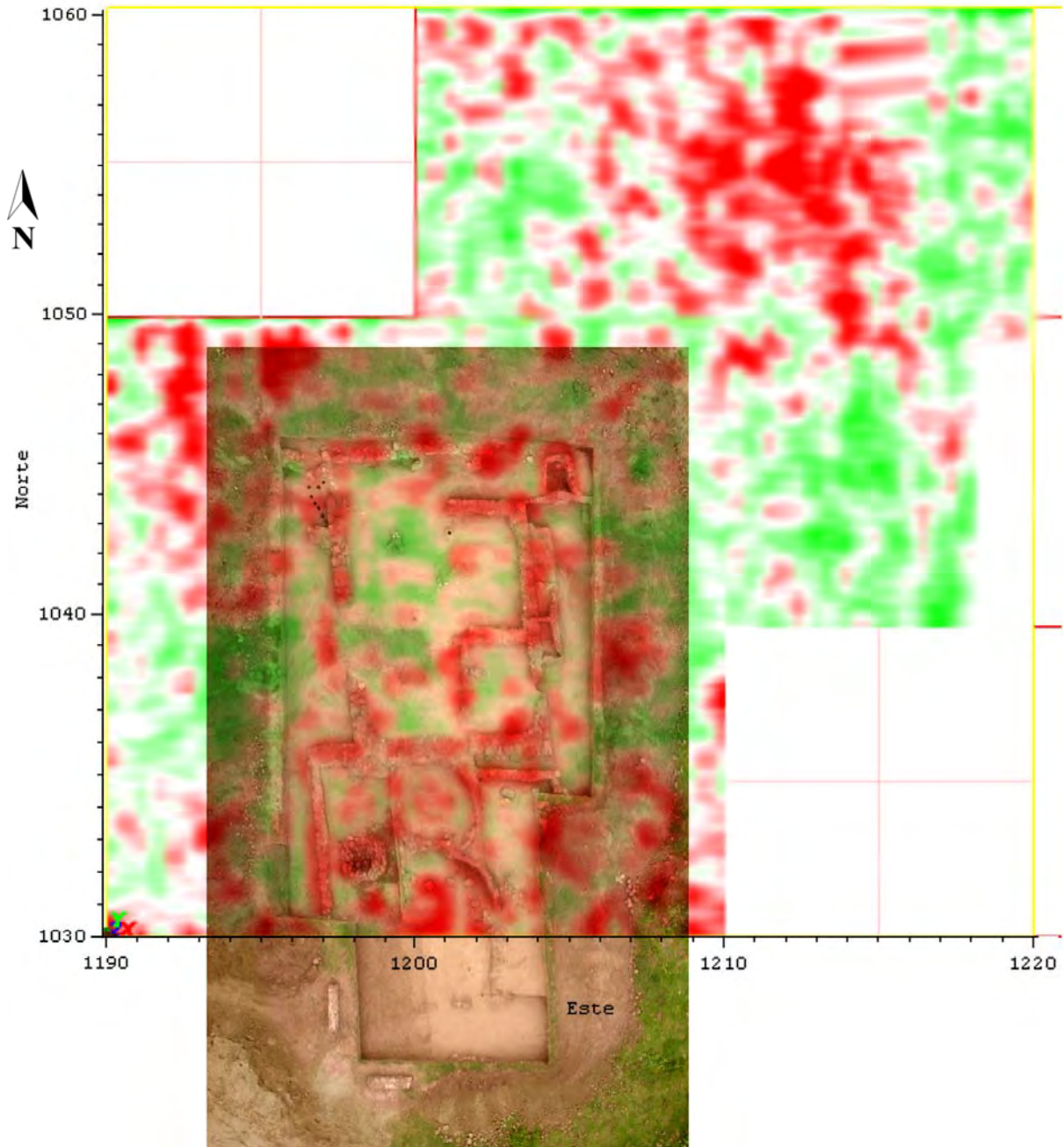


Figura 7.42. Superposición de los cortes de profundidad sobre la fotografía de la excavación arqueológica.

La superposición de los datos de gradiente magnético sobre la fotografía de la excavación permite comparar la capacidad de resolución de esta técnica y su relación que tiene con anomalías registradas (fig.7.43). Observamos que en general tienen buena correspondencia pero no permite discriminar entre los muros con una separación menor a 0.5 m. El perímetro exterior del cuarto se registra muy

bien, sin embargo las respuestas de los muros interiores se superponen entre sí con las respuestas de los flecuiles y fogones.

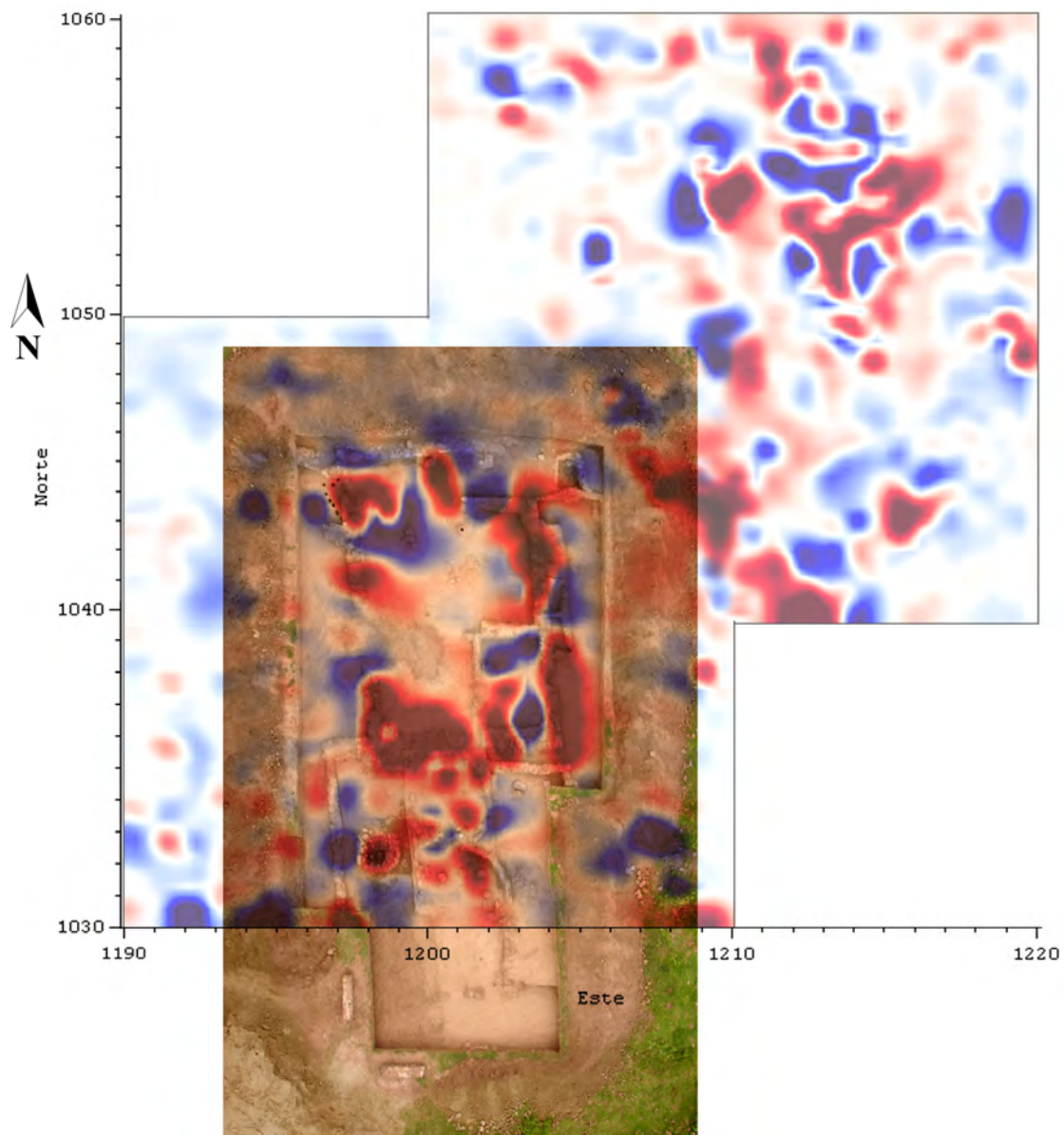


Figura 7.43. Superposición del mapa de gradiente magnético sobre la fotografía de la excavación arqueológica.

La figura 7.44 muestra la ubicación aproximada de los distintos elementos encontrados durante la excavación arqueológica. La estructura 12M-3 excavada por el del Dr. Carballo y su equipo, se conforma de un espacio rectangular con cimientos bajos hechos de piedras grandes (detectados por el gradiente magnético y el georradar, designado Est. 12M-3a) contiguo a un espacio rectangular con cimientos más angostos y tres elementos semi-circulares, los cuales interpretó

Carballo como un fogón, granero y cocina (designado Est. 12M-3b). Según Carballo la estructura 12M-3 sirvió como una residencia—incluso la presencia de un entierro en el piso y amplia evidencia de la preparación y consumo de alimento—otra de sus interpretaciones sugiere que el uso principal de la zona fuese más comunitario.

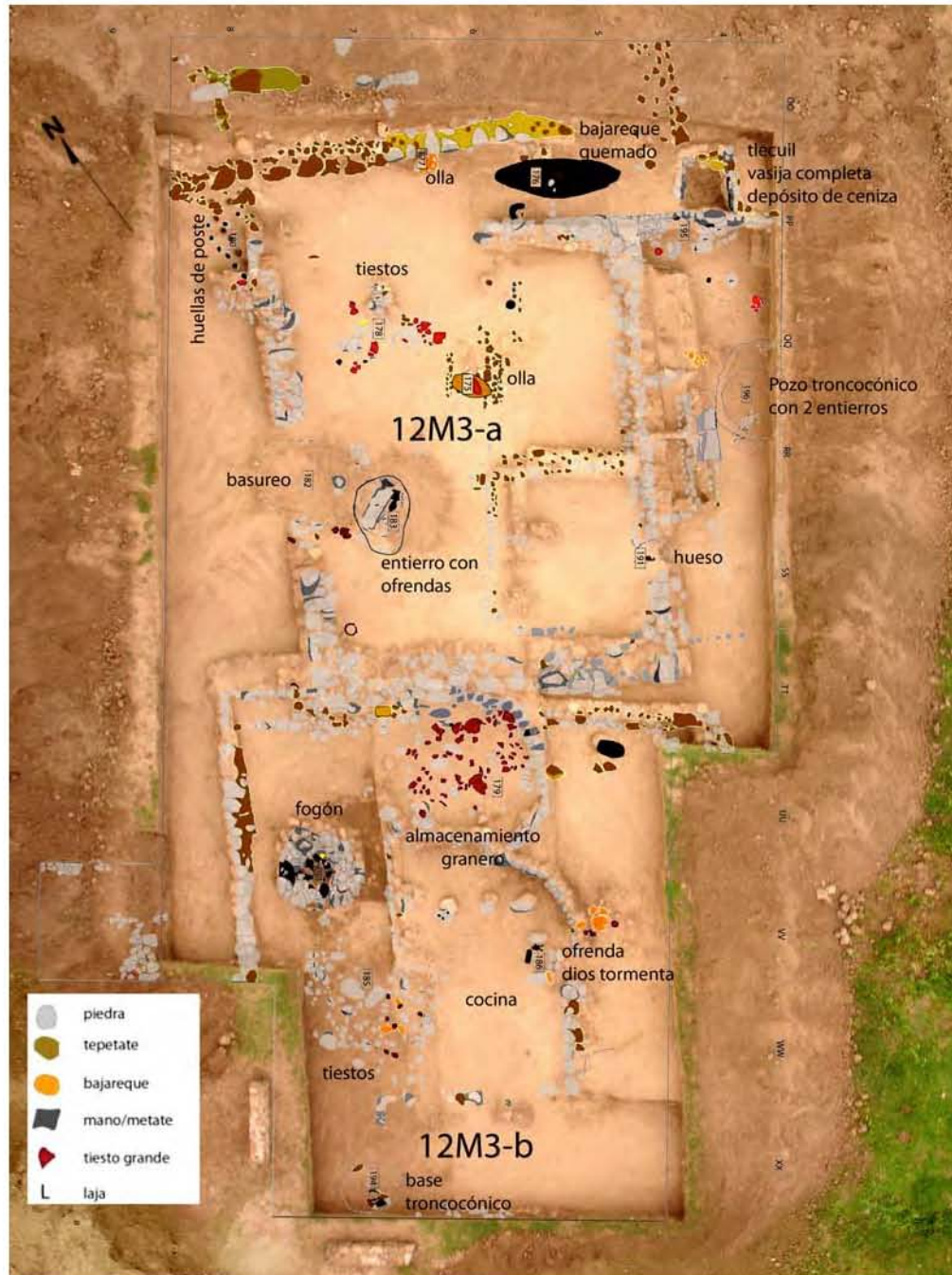


Figura 7.43. Superposición aproximada de elementos culturales y depósitos de tiestos y otros materiales de mayor tamaño in situ sobre la fotografía de la excavación arqueológica. Adaptado de Carballo, 2011.

Las interpretaciones realizadas por Carballo en cuanto a los usos comunitarios de este espacio, indican que las personas que vivieron en esta estructura fueron de una clase social de rango no élite y fueron responsables de eventos de consumo comunitarios. Sin embargo, los estudios químicos de los pisos arrojaran resultados más precisos.

Dentro de la estructura 12M-3b, interpretada por Carballo como almacén/cocina, se encontró un depósito ritual en forma de una vasija del estilo Dios Tormenta dentro de un cajón hecho de piedra y una mano de metate. Según Carballo la interpretación de vasija Dios Tormenta se debe al hecho de la forma globular y superficie negra-café de la pieza, comparable a otras del Formativo Terminal. También la pieza llevaba motivos en forma "S" a los lados de su cabeza (típicamente representando nubes en el arte mesoamericano) y sostenía dos elementos en sus manos (uno que estaba ausente) los cuales podrían representar los rayos típicos del Tlaloc del Posclásico. El hallazgo dentro de la estructura 12M-3b según Carballo podría haber sido relacionado a un rito de fertilidad y alimentos.

7.10. ESTUDIOS EN LA ESTRUCTURA 12M-1

- **Prospección con gradiente magnético**

Se trata de un basamento, principalmente construido con tierra pero que en la parte sur tiene un semicírculo de piedra que marca su inicio (fig.7.37). Esto tiene relación con la estructura C1 de La Venta que también tiene un desplante a base de piedras que la rodean en todo el perímetro de su base. La zanja que corta este basamento se aprecia como una mancha azul alargada que va de la esquina suroeste a la esquina noreste. La parte más alta del basamento es la que se encuentra con mayor cantidad de dipolos, en parte producidos por la presencia de piedras, pero también se observan dipolos alargados, sobre todo en los límites sur y norte que parecen haber sido sometidos a calentamiento (fig. 7.44).

- **Prospección con georradar**

En la estructura 12M-1 se adquirieron 8 líneas con el georradar cubriendo el montículo de sur a norte. Se seleccionaron dos líneas representativas a las cuales se ajustó topográficamente, (fig. 7.45). En la imagen de radar, de las dos líneas que cruzan el montículo, se aprecia con bastante claridad la presencia de tres elementos constructivos en N1066.5, N1069.5 y en N1072.5. Es posible que correspondan con muros en talud, sin embargo el más seguro es el que se localiza en N1069.5 debido a la intensidad y a la definición de la reflexión. El desplante de este muro parece rebasar un metro de profundidad, lo que implica que esta estructura pudo tener un

metro más de altura o se trata de una etapa constructiva anterior. Esto a su vez en el terreno corresponde con el inicio del peralte del basamento. En la parte superior del radargrama que corresponde con la cima del basamento se aprecia un piso alrededor de 60 cm de profundidad. De N1077.5 a N1087.5 se observa perfectamente delimitado el cuerpo de la estructura superior, al centro y debajo del piso parece haber un relleno con rocas de tezontle. En N1082 y N1086 se registran dos anomalías verticales que pueden corresponder con ofrendas debajo del piso.

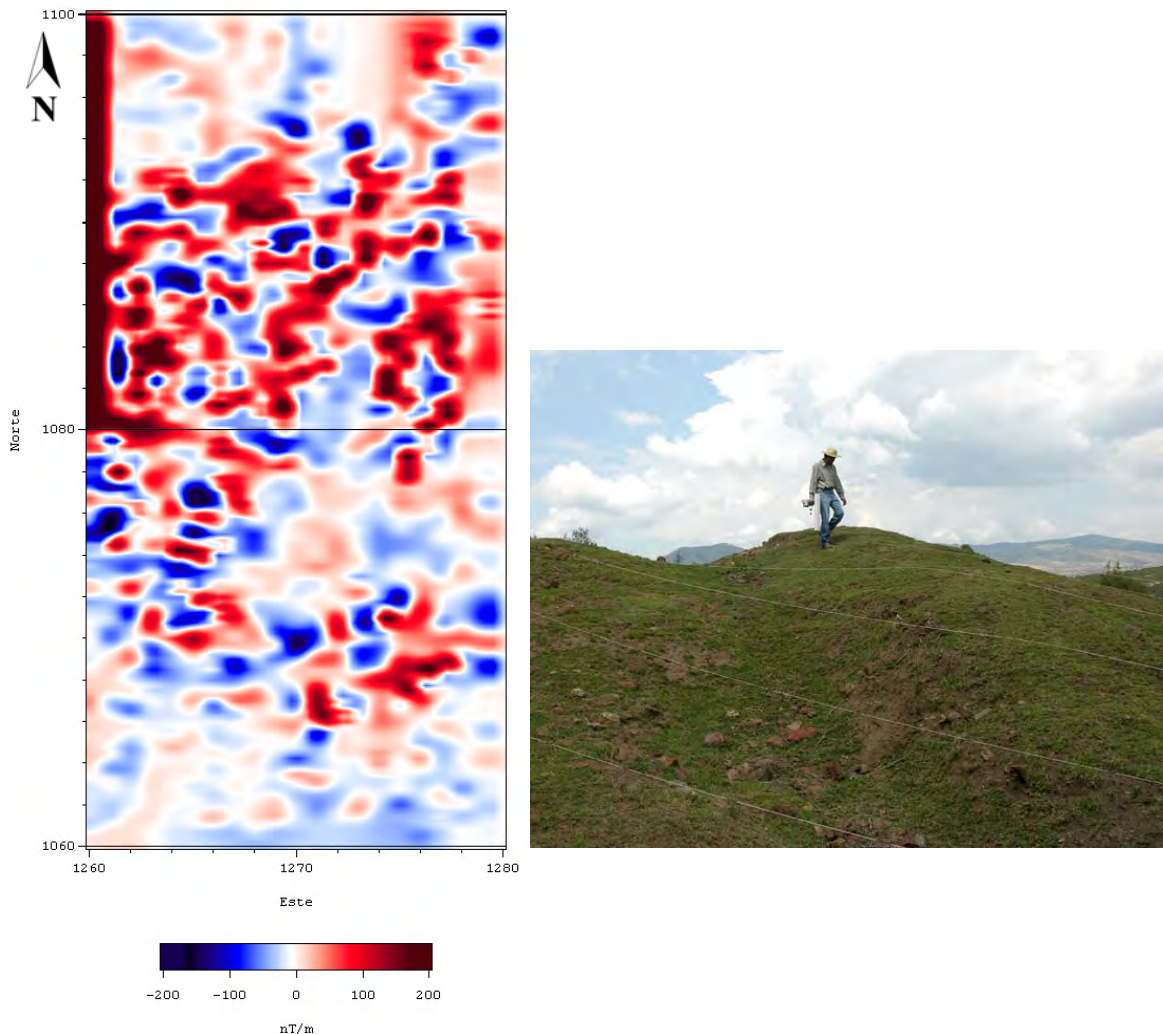


Figura 7.44. Mapa de gradiente magnético de la estructura 12M-1.

La estructura 12M-1 fue investigada por Carballo para descubrir pisos para estudio químico y para desarrollar una secuencia cronológica para uno de los montículos principales del sitio. Los datos magnéticos registraron que en el desplante de la estructura se tiene una hilera de piedras, pero en la parte superior del templo basamento la concentración de anomalías indican una mayor presencia de

materiales constructivos y piedra. El perfil de georradar muestra claramente la conformación de los pisos en varias capas como evidencia de distintas fases de modificación de la estructura.

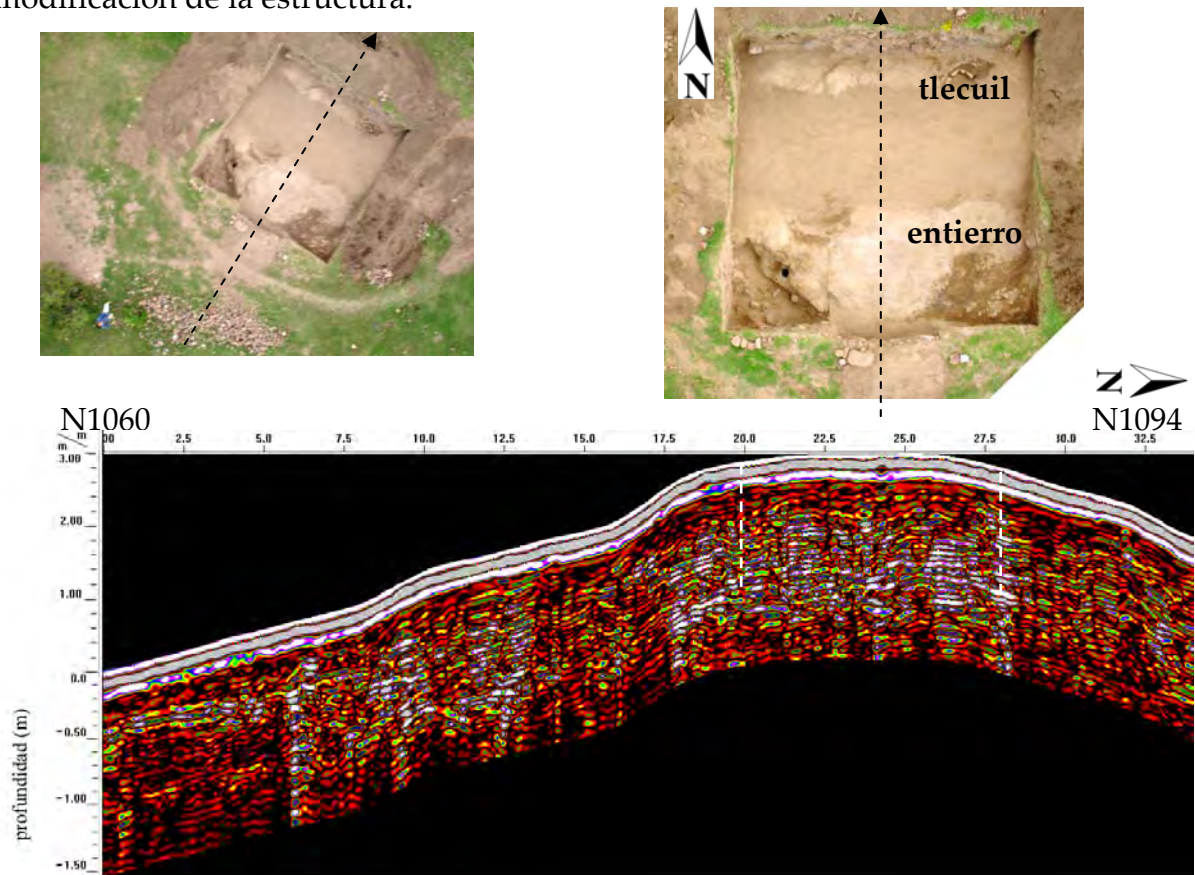


Figura 7.45. Perfil de georradar adquirido sobre la estructura 12M-1.

En el fondo de la zanja de excavación se hallaron los primeros dos pisos de la estructura. Relacionados con los pisos tempranos, el equipo de Carballo encontró los restos muy quemados y fragmentados de una pelvis humana y fibras, los cuales sugieren según Carballo una posible cremación de un bulto mortuorio. También Carballo determinó que por las muestras de carbono ^{14}C tomadas de este entierro y en pisos posteriores sugieren una construcción original durante la primera ocupación del sitio (c. 700 a.C.), pero una vasija efigie hallada y las investigaciones encima de la estructura demuestran que fue usada hasta el abandono del sitio (c. 150 d.C.), lo cual señala que la Estructura 12M-1 tuvo una historia muy larga e importante dentro del sitio.

7.11. ESTUDIOS EN LA ESTRUCTURA 13M-1

- **Prospección con gradiente magnético**

Consiste de un montículo alto y de dimensiones apreciables, para estudiarlo fue necesario 4 retículas de 20 x 20. La distribución de dipolos se parece mucho a la distribución del basamento 12L-1, con mucha piedra revistiendo los cuerpos pero con menor cantidad de piedra en la parte superior donde podrían estar los pisos. Sorprende el hecho de que la orientación de los lados, tanto superiores como inferiores, parece ser a 45 grados respecto de la retícula que se estableció N-S magnético. Esto la hace distinta del otro basamento cuyos lados parecen más alineados a la retícula. En la parte alta de la cara suroeste se aprecia una mancha roja de altos valores al centro de la parte más alta de un posible acceso que bajaría hacia el suroeste. Esto podría indicar la presencia de una ofrenda o quizá una tina, (fig. 7.46).

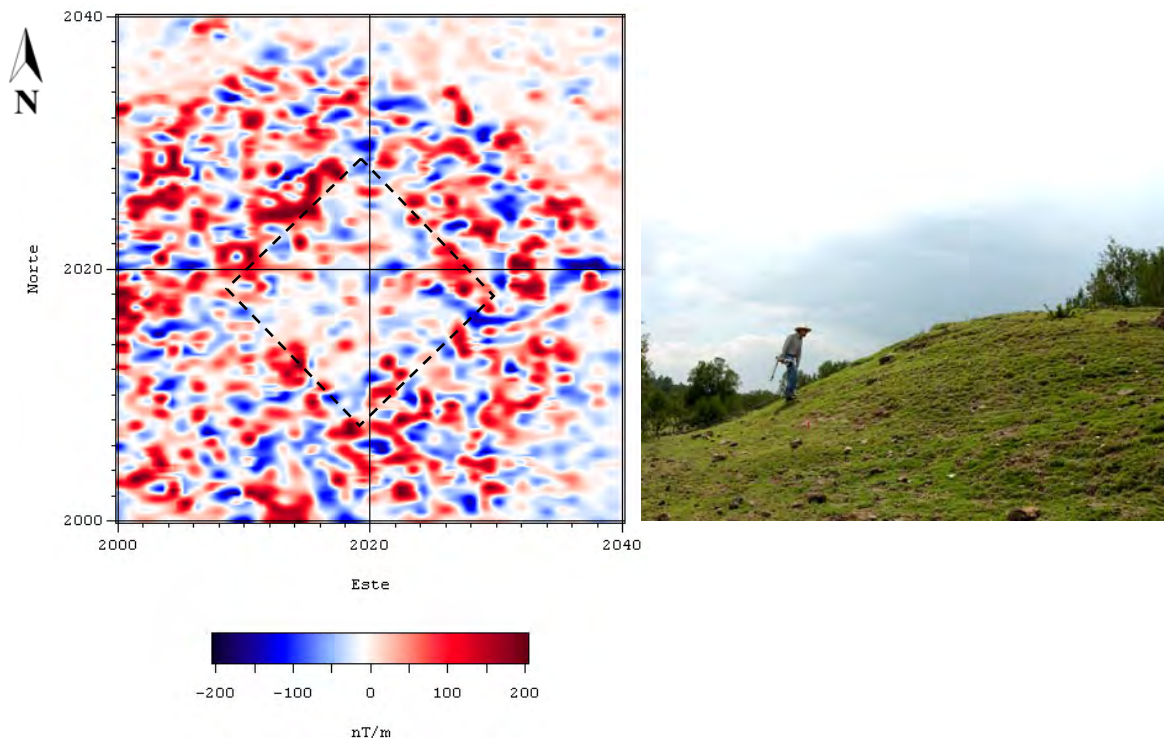


Figura 7.46. Mapa de gradiente magnético obtenido sobre la estructura 13M-1.

- **Prospección con georradar**

Sobre la estructura 13M-1 se recolectaron 7 líneas de radar, lo irregular del terreno no facilitó una adquisición con la calidad necesaria, para realizar una representación adecuada se seleccionó la línea F116 que cruzaba el montículo de sur a norte, figura 7.47. En N2005 y N2032 se registran dos reflexiones asociadas posiblemente con taludes o descansos de una etapa anterior. En N2024, N2025.5,

N2027 se detectan tres reflexiones de media amplitud que pueden ser escalones. En la cima del montículo se registra un horizonte de tierra muy superficial y un gran relleno de rocas al centro del montículo. A una profundidad aproximada de 1.5 a 2 metros se registra un apisonado o posiblemente un piso.

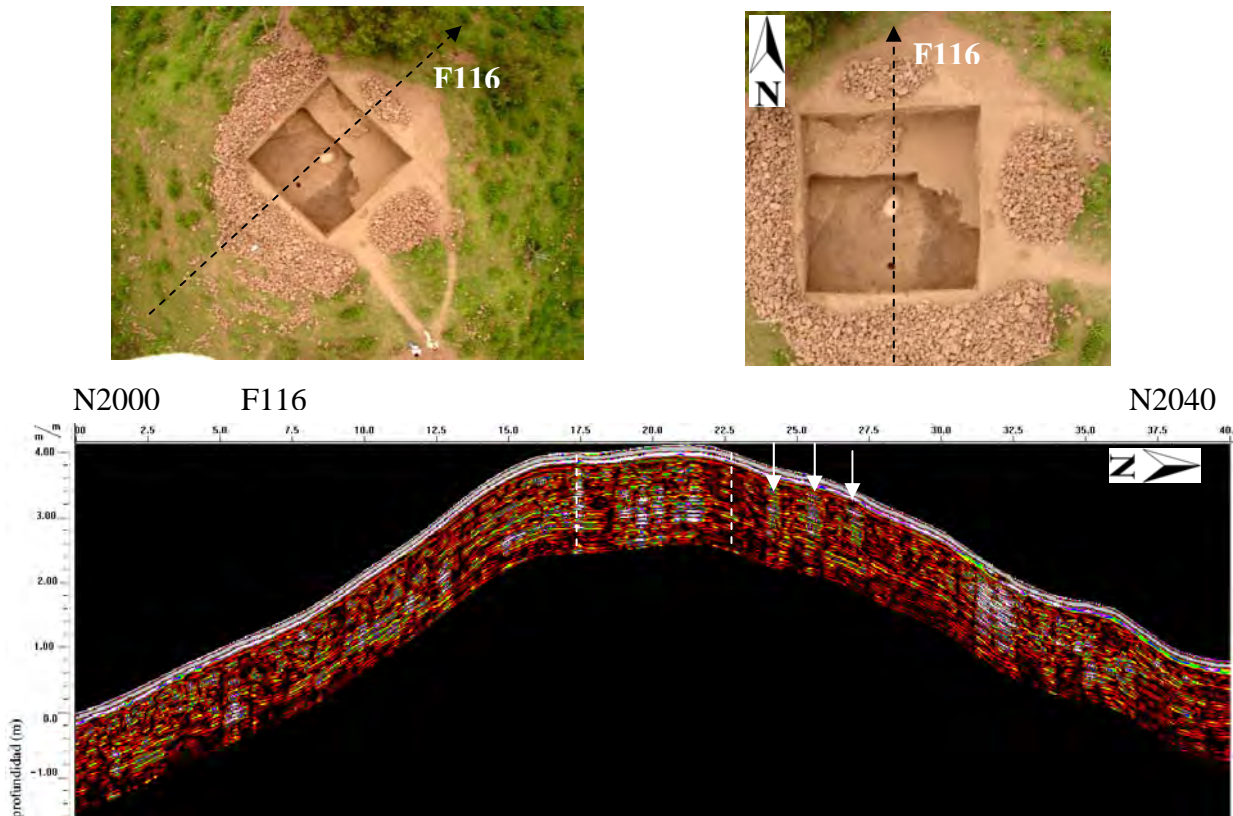


Figura 7.47. Perfil de georradar adquirido sobre la estructura 13M-1.

Las excavaciones del Dr. Carballo encontraron diferencias entre este basamento con los anteriores, el principal es que carece completamente de su piso final, el cual fue erosionado por procesos naturales. En el primer metro de profundidad se encontró muy mezclado con materiales modernos, un pozo de saqueo y madrigueras. Bajando 1.5 m más, Carballo y su equipo encontraron un núcleo constructivo que separa al último y penúltimo piso, formado principalmente por tezontle suelto. La excavación también reveló un penúltimo piso a 2.5 metros desde la superficie actual, en este piso encontraron dos elementos: un tlecuil y una ofrenda formada por una concha *Strombus* y dos vasijas miniaturas, con fechas, según Carballo, asociadas abarcando una ocupación durante los primeros siglos a.C. y d.C.—durante el Formativo Terminal. Carballo también interpreta que los fragmentos de una segunda concha *Strombus* encontrada en el relleno de piedra sugieren que estas piezas importadas, formaron parte de un ritual de terminación para la penúltima fase y/o dedicación a la última.

8. CONCLUSIONES

A diferencia de algunos años la percepción remota como herramienta para la investigación arqueológica presenta actualmente muchas ventajas porque ya se dispone de imágenes comerciales de alta resolución espectral, espacial, radiométrica y temporal que se pueden combinar con imágenes de media y baja resolución, estas últimas generalmente gratuitas, que servirán como una primera aproximación al estudio de un sitio arqueológico. El uso de esta tecnología en otros campos del conocimiento no es nuevo, sin embargo, en la arqueología ha ido creciendo a la par del desarrollo de los nuevos sensores, esto ha abierto una gama de nuevas posibilidades para las investigaciones arqueológicas. Las ventajas son muchas, entre ellas podemos mencionar la capacidad de obtener información multiespectral y junto con una alta resolución espacial se pueden detectar formas y estructuras constructivas sobre la superficie, así como proporcionar información indirecta por medio de patrones espectrales, espaciales y texturales en el suelo y en la vegetación que estén asociados con modificaciones al paisaje y por estructuras bajo la superficie, esto generalmente es representado en composiciones de falso color, matrices de correlación, coeficientes de carga, gráficas de las firmas espectrales y la clasificación de la información obtenida. El poder actual de las computadoras personales permite procesar gran cantidad de datos, que hasta hace poco requerían de centros de cómputo, ha facilitado el aprovechamiento de las imágenes comercialmente disponibles.

Por otra parte, una vez que el recorrido arqueológico y la percepción remota han establecido áreas sobre la superficie susceptibles a ser verificadas, la prospección geofísica constituye otro nivel para la investigación de un sitio, esto es, debajo de la superficie del terreno hacia el subsuelo. El empleo de estas técnicas en la arqueología también tiene sus ventajas, ya que se pueden investigar áreas en menos tiempo y a un menor costo en comparación con los métodos tradicionales de excavación, esto no quiere decir que sustituyan a la excavación arqueológica que es imprescindible para entender la parte cultural, político y social, sino que permiten ubicar áreas con mayores posibilidades de contener vestigios y guiar parte de los trabajos de excavación. Como parte de un estudio multidisciplinario, es deseable realizar excavaciones sobre las anomalías detectadas para comprobar las interpretaciones geofísicas y contrastarlas con las observaciones directas, de esta manera se pueden extrapolar los resultados a otras áreas no contempladas por el programa de excavación.

En el sitio de La Laguna las modificaciones al paisaje fueron importantes, incluyeron la nivelación del terreno y la construcción de muros de contención y

edificios de gran tamaño, como son: un recinto ceremonial con su plaza, cancha de juego de pelota y estructuras centrales en las áreas G, I, K y estructuras residenciales en el área F y H. Un sistema amplio de metepantles (bordes de piedra, tierra y magueyes para dividir las terrazas), han servido para preservar mucho del sitio, que de otra forma habría desaparecido por los procesos de fuerte erosión característicos de esta región de suelos delgados. Estos grandes movimientos de tierra y de materiales constructivos dejaron una huella en el terreno que no se percibe a simple vista, pero que el adecuado manejo de los parámetros ha destacado en las imágenes analizadas.

Los materiales constructivos mezclados con los depósitos coluviales y la forma en que sepultaron gran parte del sitio, dejaron huella en la superficie del terreno y fue reconocida a través de distintos procesos aplicados a las imágenes de los tres sensores utilizados, *Lansat ETM*, *Spot 5* y *QuickBird*, con distintos niveles de resolución. Esta cubierta tan particular tiene impacto en el tipo de suelo, en la humedad y es probable que también en la vegetación actual. Estos factores casi imperceptibles desde la superficie marcaron una pequeña diferencia en la reflectancia del suelo para esta zona, distinta a otras áreas del terreno.

Gran parte de los procesos realizados a las imágenes de los tres distintos sensores no marcaron diferencias sustanciales en el suelo y la vegetación que se pudieran vincular directamente con la presencia del sitio. Solamente el análisis de las componentes principales (*PCA*) generó indicadores espectrales evidentes para detectar indirectamente la presencia del sitio. Esto se debe a que *PCA* comprime y separa la mayor parte de la información esencial de todas las bandas en nuevas componentes no correlacionadas, para este caso, en tres componentes, *PC1*, *PC2* y *PC3*, perdiendo sólo una pequeña parte de la información, generalmente el ruido de toda las bandas. Con estas componentes fue posible diferenciar adecuadamente las clases más representativas de todas las bandas e identificar visualmente en composiciones de color, gráficas y numéricamente la relación de las componentes con una banda en particular, que a su vez, está relacionada con el suelo, la vegetación y el contenido de humedad.

A partir de la imagen *PCA* se realizó la clasificación supervisada para generar un producto temático útil para el estudio geo-arqueológico. Para llevar a cabo este proceso no sólo es necesario el conocimiento de las distintas cubiertas en el sitio, sino también del contexto en el que se encuentran. Las distintas clases se obtuvieron con las características espectrales, espaciales y texturales de las categorías bosque, vegetación estresada, suelo desnudo, entre otras. La mezcla de estas categorías por su color, tono y textura, dan como resultado una clase muy

particular que se interpretó, de acuerdo al contexto y a la información arqueológica, como la zona cultural que contiene gran parte del asentamiento del Formativo. Lo más relevante es el papel de los materiales constructivos, tierra y piedra, que al mezclarse en grandes cantidades con los sedimentos que recubren, alteran las propiedades de tal forma que permite reconocer con los sensores remotos, el área que no tiene el suelo original y eso es de especial interés para esta investigación pues indica el área que el trabajo humano altera en el terreno.

En cuanto a la prospección geofísica realizada en el sitio de La Laguna y basados en las propiedades en que son sensibles cada una de las técnicas empleadas—la constante dieléctrica y la conductividad para el georradar, la magnetización para el gradiente magnético, la resistividad eléctrica en los métodos eléctricos, hubo buenos resultados debido al contraste entre los materiales arqueológicos y los depósitos que los sepultaron. La prospección magnética fue especialmente útil para identificar la arquitectura del sitio y su extensión ya que fue construida con fragmentos de rocas ígneas, también para averiguar parcialmente la temporalidad del sitio, por la cancha del juego de pelota en forma de “I” latina que es característica del Formativo, y parte de las actividades que se realizaban dentro de los diferentes espacios debido a la presencia de fogones y altares. El georradar determinó la profundidad y los límites de las estructuras constructivas asociadas con las anomalías magnéticas. La prospección eléctrica fue muy marginal en este caso, y sólo se utilizó para confirmar los límites de la cancha del juego de pelota y de la plaza central. Por otra parte, el levantamiento topográfico fue muy útil para la creación de los MDT y junto con las diferentes capas de información asignadas pudo determinarse las direcciones de flujo de los materiales que sepultaron el sitio, así como la distribución de los distintos elementos arqueológicos dentro del paisaje. Con toda esta información se pudieron guiar parte de las excavaciones y en otros casos aportaron nuevos elementos de interés para el proyecto geo-arqueológico.

Los resultados derivados de este trabajo demostraron que es factible generar un producto temático útil para la investigación arqueológica aplicando distintas técnicas de proceso a las imágenes satelitales, y junto con la información derivada de la prospección geofísica y la topografía, constituyen una metodología apropiada para abordar este tipo de investigaciones, ya que permiten localizar indirectamente rasgos arqueológicos producidos por estructuras constructivas enterradas con un nivel de detalle, que va desde una gran escala, hasta un nivel sub-métrico, que en este sitio se pudieron corroborar mediante la excavación arqueológica para determinar los alcances de esta metodología de estudio.

APÉNDICE 1

Archivo de metadatos para las imágenes de Landsat ETM+

```

GROUP = METADATA_FILE
PRODUCT_NAME = "GLS-2000 Ver1.0"
PRODUCT_ELEVATION_DATA = "GLS-DEM Ver1.0"
PRODUCT_CREATION_TIME = 2007-11-13T19:27:45Z
PRODUCT_FILE_SIZE = 595.0
STATION_ID = "EDC"
GROUND_STATION = "EDC"
GROUP = ORTHO_PRODUCT_METADATA
SPACECRAFT_ID = "Landsat7"
SENSOR_ID = "ETM+"
ACQUISITION_DATE = 2000-09-06
WRS_PATH = 25
WRS_ROW = 047
SCENE_CENTER_LAT = +18.7873517
SCENE_CENTER_LON = -97.6051726
SCENE_UL_CORNER_LAT = +19.7236404
SCENE_UL_CORNER_LON = -98.2795980
SCENE_UR_CORNER_LAT = +19.4721965
SCENE_UR_CORNER_LON = -96.5567369
SCENE_LL_CORNER_LAT = +18.0966093
SCENE_LL_CORNER_LON = -98.6460482
SCENE_LR_CORNER_LAT = +17.8484938
SCENE_LR_CORNER_LON = -96.9372731
SCENE_UL_CORNER_MAPX = 575490.000
SCENE_UL_CORNER_MAPY = 2181060.000
SCENE_UR_CORNER_MAPX = 756480.000
SCENE_UR_CORNER_MAPY = 2154900.000
SCENE_LL_CORNER_MAPX = 537450.000
SCENE_LL_CORNER_MAPY = 2000910.000
SCENE_LR_CORNER_MAPX = 718590.000
SCENE_LR_CORNER_MAPY = 1974630.000
BAND1_FILE_NAME = "p025r047_7dt20000906_z14_10.tif"
BAND2_FILE_NAME = "p025r047_7dt20000906_z14_20.tif"
BAND3_FILE_NAME = "p025r047_7dt20000906_z14_30.tif"
BAND4_FILE_NAME = "p025r047_7dt20000906_z14_40.tif"
BAND5_FILE_NAME = "p025r047_7dt20000906_z14_50.tif"
BAND61_FILE_NAME = "p025r047_7dk20000906_z14_61.tif"
BAND62_FILE_NAME = "p025r047_7dk20000906_z14_62.tif"
BAND7_FILE_NAME = "p025r047_7dt20000906_z14_70.tif"
BAND8_FILE_NAME = "p025r047_7dp20000906_z14_80.tif"
GROUP = PROJECTION_PARAMETERS
REFERENCE_DATUM = "WGS84"
REFERENCE_ELLIPSOID = "WGS84"
GRID_CELL_ORIGIN = "Center"
UL_GRID_LINE_NUMBER = 1
UL_GRID_SAMPLE_NUMBER = 1
GRID_INCREMENT_UNIT = "Meters"
GRID_CELL_SIZE_PAN = 15.000
GRID_CELL_SIZE_THM = 60.000
GRID_CELL_SIZE_REF = 30.000
FALSE_NORTHING = 0
ORIENTATION = "NUP"
RESAMPLING_OPTION = "CC"
MAP_PROJECTION = "UTM"
END_GROUP = PROJECTION_PARAMETERS
GROUP = UTM_PARAMETERS
ZONE_NUMBER = 14
END_GROUP = UTM_PARAMETERS
SUN_AZIMUTH = 113.1479688
SUN_ELEVATION = 61.6925476 ← Angulo de elevación solar
QA_PERCENT_MISSING_DATA = 0
CLOUD_COVER = 0
PRODUCT_SAMPLES_PAN = 16358
PRODUCT_LINES_PAN = 14322
PRODUCT_SAMPLES_REF = 8179
PRODUCT_LINES_REF = 7161
PRODUCT_SAMPLES_THM = 4090
PRODUCT_LINES_THM = 3581
OUTPUT_FORMAT = "GEOTIFF"
END_GROUP = ORTHO_PRODUCT_METADATA
GROUP = L1G_PRODUCT_METADATA
BAND_COMBINATION = "123456678"
CPF_FILE_NAME = "L7CPF20000719_20000930_10"

```

```

GROUP = MIN_MAX_RADIANCE
  LMAX_BAND1 = 191.600
  LMIN_BAND1 = -6.200
  LMAX_BAND2 = 196.500
  LMIN_BAND2 = -6.400
  LMAX_BAND3 = 152.900
  LMIN_BAND3 = -5.000
  LMAX_BAND4 = 241.100
  LMIN_BAND4 = -5.100
  LMAX_BAND5 = 31.060
  LMIN_BAND5 = -1.000
  LMAX_BAND61 = 17.040
  LMIN_BAND61 = 0.000
  LMAX_BAND62 = 12.650
  LMIN_BAND62 = 3.200
  LMAX_BAND7 = 10.800
  LMIN_BAND7 = -0.350
  LMAX_BAND8 = 243.100
  LMIN_BAND8 = -4.700
END_GROUP = MIN_MAX_RADIANCE
GROUP = MIN_MAX_PIXEL_VALUE
  QCALMAX_BAND1 = 255.0
  QCALMIN_BAND1 = 1.0
  QCALMAX_BAND2 = 255.0
  QCALMIN_BAND2 = 1.0
  QCALMAX_BAND3 = 255.0
  QCALMIN_BAND3 = 1.0
  QCALMAX_BAND4 = 255.0
  QCALMIN_BAND4 = 1.0
  QCALMAX_BAND5 = 255.0
  QCALMIN_BAND5 = 1.0
  QCALMAX_BAND61 = 255.0
  QCALMIN_BAND61 = 1.0
  QCALMAX_BAND62 = 255.0
  QCALMIN_BAND62 = 1.0
  QCALMAX_BAND7 = 255.0
  QCALMIN_BAND7 = 1.0
  QCALMAX_BAND8 = 255.0
  QCALMIN_BAND8 = 1.0
END_GROUP = MIN_MAX_PIXEL_VALUE
GROUP = PRODUCT_PARAMETERS
  CORRECTION_METHOD_GAIN_BAND1 = "CPF"
  CORRECTION_METHOD_GAIN_BAND2 = "CPF"
  CORRECTION_METHOD_GAIN_BAND3 = "CPF"
  CORRECTION_METHOD_GAIN_BAND4 = "CPF"
  CORRECTION_METHOD_GAIN_BAND5 = "CPF"
  CORRECTION_METHOD_GAIN_BAND61 = "CPF"
  CORRECTION_METHOD_GAIN_BAND62 = "CPF"
  CORRECTION_METHOD_GAIN_BAND7 = "CPF"
  CORRECTION_METHOD_GAIN_BAND8 = "CPF"
  CORRECTION_METHOD_BIAS = "IC"
  BAND1_GAIN = "H"
  BAND2_GAIN = "H"
  BAND3_GAIN = "H"
  BAND4_GAIN = "L"
  BAND5_GAIN = "H"
  BAND6_GAIN1 = "L"
  BAND6_GAIN2 = "H"
  BAND7_GAIN = "H"
  BAND8_GAIN = "L"
  BAND1_GAIN_CHANGE = "0"
  BAND2_GAIN_CHANGE = "0"
  BAND3_GAIN_CHANGE = "0"
  BAND4_GAIN_CHANGE = "0"
  BAND5_GAIN_CHANGE = "0"
  BAND6_GAIN_CHANGE1 = "0"
  BAND6_GAIN_CHANGE2 = "0"
  BAND7_GAIN_CHANGE = "0"
  BAND8_GAIN_CHANGE = "0"
  BAND1_SL_GAIN_CHANGE = "0"
  BAND2_SL_GAIN_CHANGE = "0"
  BAND3_SL_GAIN_CHANGE = "0"
  BAND4_SL_GAIN_CHANGE = "0"
  BAND5_SL_GAIN_CHANGE = "0"
  BAND6_SL_GAIN_CHANGE1 = "0"
  BAND6_SL_GAIN_CHANGE2 = "0"
  BAND7_SL_GAIN_CHANGE = "0"
  BAND8_SL_GAIN_CHANGE = "0"
END_GROUP = PRODUCT_PARAMETERS
GROUP = CORRECTIONS_APPLIED
  STRIPING_BAND1 = "NONE"
  STRIPING_BAND2 = "NONE"
  STRIPING_BAND3 = "NONE"
  STRIPING_BAND4 = "NONE"
  STRIPING_BAND5 = "NONE"
  STRIPING_BAND61 = "NONE"
  STRIPING_BAND62 = "NONE"

```

Parámetros de calibración de la Radiancia espectral por banda

Nivel digital por banda

```
STRIPING_BAND7 = "NONE"  
STRIPING_BAND8 = "NONE"  
BANDING = "N"  
COHERENT_NOISE = "N"  
MEMORY_EFFECT = "N"  
SCAN_CORRELATED_SHIFT = "N"  
INOPERABLE_DETECTORS = "N"  
DROPPED_LINES = "N"  
END_GROUP = CORRECTIONS_APPLIED  
END_GROUP = LIG_PRODUCT_METADATA  
END_GROUP = METADATA_FILE  
END
```

APÉNDICE 2

Archivo de metadatos para las imágenes de SPOT 5

Multiespectral

```
<Spectral_Band_Info>
<BAND_DESCRIPTION>XS1</BAND_DESCRIPTION>
<PHYSICAL_UNIT>equivalent radiance (W.m-2.Sr-1.um-1)</PHYSICAL_UNIT>
<PHYSICAL_BIAS>0.000000</PHYSICAL_BIAS>
<PHYSICAL_GAIN>1.829788</PHYSICAL_GAIN>
<PHYSICAL_CALIBRATION_DATE>2004-10-01T00:00:00.000000</PHYSICAL_CALIBRATION_DATE>
<BAND_INDEX>1</BAND_INDEX>
```

Banda verde
calibración

```
<Spectral_Band_Info>
<BAND_DESCRIPTION>XS2</BAND_DESCRIPTION>
<PHYSICAL_UNIT>equivalent radiance (W.m-2.Sr-1.um-1)</PHYSICAL_UNIT>
<PHYSICAL_BIAS>0.000000</PHYSICAL_BIAS>
<PHYSICAL_GAIN>1.597198</PHYSICAL_GAIN>
<PHYSICAL_CALIBRATION_DATE>2004-10-01T00:00:00.000000</PHYSICAL_CALIBRATION_DATE>
<BAND_INDEX>2</BAND_INDEX>
```

Banda rojo
calibración

```
<Spectral_Band_Info>
<BAND_DESCRIPTION>XS3</BAND_DESCRIPTION>
<PHYSICAL_UNIT>equivalent radiance (W.m-2.Sr-1.um-1)</PHYSICAL_UNIT>
<PHYSICAL_BIAS>0.000000</PHYSICAL_BIAS>
<PHYSICAL_GAIN>1.748925</PHYSICAL_GAIN>
<PHYSICAL_CALIBRATION_DATE>2004-10-01T00:00:00.000000</PHYSICAL_CALIBRATION_DATE>
<BAND_INDEX>3</BAND_INDEX>
```

Banda infrarrojo
calibración

```
<Spectral_Band_Info>
<BAND_DESCRIPTION>SWIR</BAND_DESCRIPTION>
<PHYSICAL_UNIT>equivalent radiance (W.m-2.Sr-1.um-1)</PHYSICAL_UNIT>
<PHYSICAL_BIAS>0.000000</PHYSICAL_BIAS>
<PHYSICAL_GAIN>6.355000</PHYSICAL_GAIN>
```

Banda infrarrojo
medio calibración

```
<INCIDENCE_ANGLE>-13.120136</INCIDENCE_ANGLE>
<VIEWING_ANGLE>-11.596069</VIEWING_ANGLE>
<SUN_AZIMUTH>110.171800</SUN_AZIMUTH>
<SUN_ELEVATION>67.236475</SUN_ELEVATION>
```

Elevación solar

```
<IMAGING_DATE>2006-04-18</IMAGING_DATE>
<IMAGING_TIME>17:05:24.3</IMAGING_TIME>
```

Fecha y hora
de adquisición

Pancromática

```
<Spectral_Band_Info>
<BAND_DESCRIPTION>PAN</BAND_DESCRIPTION>
<PHYSICAL_UNIT>equivalent radiance (W.m-2.Sr-1.um-1)</PHYSICAL_UNIT>
<PHYSICAL_BIAS>0.000000</PHYSICAL_BIAS>
<PHYSICAL_GAIN>1.955482</PHYSICAL_GAIN>
```

Banda pancromática
calibración

```
<INCIDENCE_ANGLE>-13.130636</INCIDENCE_ANGLE>
<VIEWING_ANGLE>-11.596069</VIEWING_ANGLE>
<SUN_AZIMUTH>110.158477</SUN_AZIMUTH>
<SUN_ELEVATION>67.225673</SUN_ELEVATION>
```

Elevación solar

```
<IMAGING_DATE>2006-04-18</IMAGING_DATE>
<IMAGING_TIME>17:05:21.9</IMAGING_TIME>
```

Fecha y hora
de adquisición

APÉNDICE 3

Archivo de metadatos para las imágenes de QuickBird

```

version = "23.2";
generationTime = 2011-04-08T21:31:56.000000Z;
productOrderId = "052511738010_01_P001";
productCatalogId = "90100100746C4A00";
childCatalogId = "20300100746C4900";
imageDescriptor = "Standard2A";
bandId = "Multi";
panSharpenAlgorithm = "None";
numRows = 2095;
numColumns = 2095;
productLevel = "LV2A";
productType = "Standard";
numberOfLooks = 1;
radiometricLevel = "Corrected";
radiometricEnhancement = "Off";
bitsPerPixel = 16;
compressionType = "None";
BEGIN_GROUP = BAND_B
    ULLon = -98.02957673;
    ULLat = 19.53356088;
    ULHAE = 2589.78;
    URLon = -97.98168006;
    URLat = 19.53329735;
    URHAE = 2503.44;
    LRLon = -97.98196431;
    LRLat = 19.48788730;
    LRHAE = 2551.08;
    LLLon = -98.02984763;
    LLLat = 19.48815017;
    LLHAE = 2537.05;
    absCalFactor = 1.604120e-02;
    effectiveBandwidth = 6.800000e-02;
    TDLevel = 1;
END_GROUP = BAND_B
BEGIN_GROUP = BAND_G
    ULLon = -98.02957673;
    ULLat = 19.53356088;
    ULHAE = 2589.78;
    URLon = -97.98168006;
    URLat = 19.53329735;
    URHAE = 2503.44;
    LRLon = -97.98196431;
    LRLat = 19.48788730;
    LRHAE = 2551.08;
    LLLon = -98.02984763;
    LLLat = 19.48815017;
    LLHAE = 2537.05;
    absCalFactor = 1.438470e-02;
    effectiveBandwidth = 9.900000e-02;
    TDLevel = 1;
END_GROUP = BAND_G
BEGIN_GROUP = BAND_R
    ULLon = -98.02957673;
    ULLat = 19.53356088;
    ULHAE = 2589.78;
    URLon = -97.98168006;
    URLat = 19.53329735;
    URHAE = 2503.44;
    LRLon = -97.98196431;
    LRLat = 19.48788730;
    LRHAE = 2551.08;
    LLLon = -98.02984763;
    LLLat = 19.48815017;
    LLHAE = 2537.05;
    absCalFactor = 1.267350e-02;
    effectiveBandwidth = 7.100000e-02;
    TDLevel = 1;
END_GROUP = BAND_R
BEGIN_GROUP = BAND_N
    ULLon = -98.02957673;
    ULLat = 19.53356088;
    ULHAE = 2589.78;
    URLon = -97.98168006;
    URLat = 19.53329735;
    URHAE = 2503.44;
    LRLon = -97.98196431;
    LRLat = 19.48788730;
    LRHAE = 2551.08;
    LLLon = -98.02984763;
    LLLat = 19.48815017;
    LLHAE = 2537.05;
    absCalFactor = 1.542420e-02;
    effectiveBandwidth = 1.140000e-01;
    TDLevel = 1;
END_GROUP = BAND_N
outputFormat = "GeoTIFF";
BEGIN_GROUP = IMAGE_1
    satId = "QB02";
    mode = "FullSwath";
    scanDirection = "Forward";
    CatId = "101001000966DB00";
    firstLineTime = 2009-04-04T17:22:11.407841Z;
    avgLineRate = 1725.03;
    exposureDuration = 0.000579702;
    minCollectedRowGSD = 2.516;
    maxCollectedRowGSD = 2.523;
    meanCollectedRowGSD = 2.519;
    minCollectedColGSD = 2.475;
    maxCollectedColGSD = 2.478;
    meanCollectedColGSD = 2.477;
    meanCollectedGSD = 2.498;
    rowUncertainty = 42.81;
    colUncertainty = 39.73;
    minSunAz = 124.9;
    maxSunAz = 125.0;
    meanSunAz = 125.0;
    minSunEl = 67.8;
    maxSunEl = 67.8;
    meanSunEl = 67.8;
    minSatAz = 353.5;
    maxSatAz = 355.2;
    meanSatAz = 354.4;
    minSatEl = 78.5;
    maxSatEl = 79.5;
    meanSatEl = 79.0;
    minInTrackViewAngle = 9.8;
    maxInTrackViewAngle = 10.3;
    meanInTrackViewAngle = 10.0;
    minCrossTrackViewAngle = -2.5;
    maxCrossTrackViewAngle = -2.3;
    meanCrossTrackViewAngle = -2.4;
    minOffNadirViewAngle = 10.5;
    maxOffNadirViewAngle = 10.5;
    meanOffNadirViewAngle = 10.5;
    PNIIRS = 2.7;
    cloudCover = 0.000;
    resamplingKernel = "CC";
    positionKnowledgeSrc = "R";
    attitudeKnowledgeSrc = "R";
    revNumber = 41931;
END_GROUP = IMAGE_1
BEGIN_GROUP = MAP_PROJECTED_PRODUCT
    earliestAcqTime = 2009-04-04T17:22:23.684710Z;
    latestAcqTime = 2009-04-04T17:22:23.684710Z;
    datumName = "WE";
    semiMajorAxis = 6378137.0000;
    inverseFlattening = 298.257223563;
    datumOffset = (
        0.000,
        0.000,
        0.000 );
    mapProjName = "UTM";
    mapProjCode = 1;
    mapZone = 14;
    mapHemi = "N";
    mapProjParam = (
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000 );
    productUnits = "M";
    originX = 601810.800000004;
    originY = 2160154.799999998;
    orientationAngle = 0.0;
    colSpacing = 2.40;
    rowSpacing = 2.40;
    productGSD = 2.40;
    ULLX = 601810.800000004;
    ULY = 2160154.799999998;
    ULH = 2589.78;
    URX = 606836.400000006;
    URY = 2160154.799999998;
    URH = 2503.44;
    LRLX = 606836.400000006;
    LRLY = 2155129.199999998;
    LRLH = 2551.08;
    LLX = 601810.800000004;
    LLY = 2155129.199999998;
    LLH = 2537.05;
    DEMCorrection = "Coarse DEM";
    numGCP = 0;
END_GROUP = MAP_PROJECTED_PRODUCT
END;
    
```

Bandas multiespectrales

Clave del producto

Banda infrarroja calibración

Banda azul calibración

Elevación solar

Banda verde calibración

Banda roja calibración

Fecha y hora de adquisición


```

version = "23.2";
generationTime = 2011-04-08T21:31:56.000000Z;
productOrderId = "052511738010_01_P001";
productCatalogId = "90100100746C4A00";
childCatalogId = "20300100746C4B00";
imageDescriptor = "Standard2A";
bandId = "P";
panSharpenAlgorithm = "None";
numRows = 8380;
numColumns = 8380;
productLevel = "LV2A";
productType = "Standard";
numberOfLooks = 1;
radiometricLevel = "Corrected";
radiometricEnhancement = "Off";
bitsPerPixel = 16;
compressionType = "None";
BEGIN_GROUP = BAND_P
    ULLon = -98.02958526;
    ULLat = 19.53356906;
    ULHAE = 2589.81;
    URLon = -97.98167143;
    URLat = 19.53330543;
    URHAE = 2503.45;
    LRLon = -97.98195579;
    LRLat = 19.48787911;
    LRHAE = 2551.05;
    LLLon = -98.02985625;
    LLLat = 19.48814208;
    LLHAE = 2537.05;
    absCalFactor = 6.447600e-02;
    effectiveBandwidth = 3.980000e-01;
    TDIlevel = 13;
END_GROUP = BAND_P
outputFormat = "GeoTIFF";
BEGIN_GROUP = IMAGE_1
    satId = "QB02";
    mode = "FullSwath";
    scanDirection = "Forward";
    CatId = "101001000966DB00";
    firstLineTime = 2009-04-
04T17:22:11.408494Z;
    avgLineRate = 6900.10;
    exposureDuration = 0.00188403;
    minCollectedRowGSD = 0.632;
    maxCollectedRowGSD = 0.634;
    meanCollectedRowGSD = 0.633;
    minCollectedColGSD = 0.620;
    maxCollectedColGSD = 0.621;
    meanCollectedColGSD = 0.620;
    meanCollectedGSD = 0.627;
    rowUncertainty = 42.84;
    colUncertainty = 39.63;
    minSunAz = 124.9;
    maxSunAz = 125.0;
    meanSunAz = 124.9;
    minSunEl = 67.8;
    maxSunEl = 67.8;
    meanSunEl = 67.8;
    minSatAz = 353.9;
    maxSatAz = 355.5;
    meanSatAz = 354.5;
    minSatEl = 78.3;
    maxSatEl = 79.3;
    meanSatEl = 78.9;
    minInTrackViewAngle = 10.0;
    maxInTrackViewAngle = 10.5;
    meanInTrackViewAngle = 10.2;
    minCrossTrackViewAngle = -2.4;
    maxCrossTrackViewAngle = -2.3;
    meanCrossTrackViewAngle = -2.4;
    minOffNadirViewAngle = 10.5;
    maxOffNadirViewAngle = 10.5;
    meanOffNadirViewAngle = 10.5;
PNIIRS = 4.7;
    cloudCover = 0.000;
    resamplingKernel = "CC";
    positionKnowledgeSrc = "R";
    attitudeKnowledgeSrc = "R";
    revNumber = 41931;
END_GROUP = IMAGE_1
BEGIN_GROUP = MAP_PROJECTED_PRODUCT
    earliestAcqTime = 2009-04-04T17:22:23.454467Z;
    latestAcqTime = 2009-04-04T17:22:23.454467Z;
    datumName = "WE";
    semiMajorAxis = 6378137.0000;
    inverseFlattening = 298.257223563;
    datumOffset = (
        0.000,
        0.000,
        0.000 );
    mapProjName = "UTM";
    mapProjCode = 1;
    mapZone = 14;
    mapHemi = "N";
    mapProjParam = (
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000,
        0.000000000 );
    productUnits = "M";
    originX = 601809.900000004;
    originY = 2160155.699999998;
    orientationAngle = 0.0;
    colSpacing = 0.60;
    rowSpacing = 0.60;
    productGSD = 0.60;
    ULX = 601809.900000004;
    ULY = 2160155.699999998;
    ULH = 2589.81;
    URX = 606837.300000006;
    URY = 2160155.699999998;
    URH = 2503.45;
    LRX = 606837.300000006;
    LRY = 2155128.299999998;
    LRH = 2551.05;
    LLX = 601809.900000004;
    LLY = 2155128.299999998;
    LLH = 2537.05;
    DEMCorrection = "Coarse DEM";
    numGCP = 0;
END_GROUP = MAP_PROJECTED_PRODUCT
END;

```

Banda pancromática

Clave del producto

Banda pancromática calibración

Fecha y hora de adquisición

Elevación solar

BIBLIOGRAFÍA

Amit Agarkar, 2003. Data Fusion of IKONOS and ETM images, and compare the three different methods of Fusion. 6750- Applied Remote Sensing.

Barba, Luis. Manzanilla, Linda. 2003. La arqueología: Una visión científica del pasado del hombre. Colección la Ciencia para todos No. 123. Fondo de Cultura Económica-CONACYT-SEP. México.

Blancas, Jorge, 2000. Principios y aplicaciones del método de radar de penetración terrestre (GPR). Tesis Licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM.

Blancas, Jorge, 2010. Estudio con tomografía eléctrica en los jardines de Instituto de Geofísica de la UNAM. Trabajo final. Métodos eléctricos y electromagnéticos. Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM.

Blancas, Jorge, 2010. Identificación de rasgos arqueológicos a través de imágenes multiespectrales Landsat ETM+, en el sitio arqueológico La Laguna, Tlaxcala. Trabajo Final. Percepción Remota y Procesamiento Digital de Imágenes. Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM.

Borejsza, Alexander, 2006. Agricultural Slope Management and Soil Erosion in Tlaxcala, Mexico. Tesis doctoral, Cotsen Institute of Archaeology at UCLA, Universidad de California, Los Angeles.

Borejsza, Aleksander, Isabel Rodríguez López, Charles D. Frederick y Mark D. Bateman. 2008. Agricultural Slope Management and Soil Erosion at La Laguna, Tlaxcala, Mexico. *Journal of Archaeological Science* 35:1854-1866.

Calzada, Jacqueline, 2007. Mapas geoquímicos de metales pesados de metales pesados de suelos del Estado de Tlaxcala, México. Tesis, UNAM, Centro de Geociencias. pp 19-33.

Carballo, David, 2006. FAMSI. Proto-Urban Social Transformations and Community Organization at La Laguna, Tlaxcala, During the Late Pre-Classical.

Carballo, David M.; Pluckhahn, Thomas. 2007. Transportation corridors and political evolution in highland Mesoamerica: Settlement analyses incorporating GIS for northern Tlaxcala, Mexico. *Journal of Anthropological Archaeology* 26 (2007) 607-629.

Carballo, David.; Barba, Luis.; Blancas, Jorge.; Ortiz, Agustín.; Rodríguez, Isabel.; Toledo, Jorge.; Gómez, Alejandra.; Ortmann, Nicole. (2010). Informe técnico al Instituto Nacional de Antropología e Historia, Proyecto Arqueológico La Laguna, Tlaxcala, temporada 2009. University of Alabama- Universidad Nacional Autónoma de México.

Carballo, David; Barba, Luis; Blancas, Jorge; Agustín, Ortiz; Toledo, Jorge; Cingolani, Nicole. 2011. La Laguna, Tlaxcala: ritual y urbanización en el Formativo. Revista Teccalli. Estudios Puebla-Tlaxcala. Instituto Nacional de Antropología e Historia. Centro INAH-Tlaxcala. Julio – Diciembre del 2011. Número 1, Volumen 2, pp. 1-11.

Chavez Jr., P. S. (1996). Image-based atmospheric corrections: Revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62, 1025– 1036.

Chavez, P. S., Kwarteng A. Y. 1989. Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 55(3): 339-348.

Chander, Guyanés. Markham, Brian. Helder, Dennis. 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment* 113 (2009) 893–903.

Chuvienco, Emilio, 2008. Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio. 3^{ra} Edición actualizada. Editorial Ariel, S.A., Barcelona, España.

Chuvienco, Emilio, 2000. Teledetección. Universidad de Valencia, España.

Cocero, David; Riaño, David; Chuvienco, Emilio. Estimación de la Humedad de Diferentes Especies Vegetales Mediterráneas mediante Distintos Sensores de Teledetección. *Tecnologías Geográficas para el Desarrollo Sostenible*. Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá, 2000: 200-221.

Castro, Roberto, 1999. Sistema para el Seguimiento y Análisis de Tierras mediante Teledetección. Bases teóricas. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Pontificia Universidad Católica de Chile Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal

Davis, J. L., Annan, A. P., 1989, Ground-Penetrating Radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy: *Geophys. Prosp.*, 37, 531-551.

Digita Globe, Keith Krause. 2005. Technical Note. Radiometric Use of QuickBird Imagery.

Dumond, Donald E, 1972. Demographic Aspects of the Classic Period in Puebla-Tlaxcala. *Southwestern Journal of Anthropology*, 29:2:101-130.

FAO, 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional.

Ferrari, L., 2000, Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. LIII, p. 84-92.

García Cook, Ángel. 1981. "The Historical Importance of Tlaxcala in the Cultural Development of the Central Highlands." In Supplement to the Handbook of Middle American Indians, Vol. 1, Archaeology, edited by Jeremy A. Sabloff, pp. 244-276. University of Texas Press, Austin.

Geophysical Survey Systems, Inc., GSSI, 1992, Training notes.

Geoscan Research, 2009. Instruction Manual Version 2.98, Resistance Meter RM15-D.

Gilabert, M. A.; González-Piqueras, J.; García-Haro, J. 1997. Acerca de los índices de vegetación. Revista de Teledetección, No. 8 – Diciembre 1997.

González-Audicana, M.; Seco, R.; García, A. 2002. Fusión de imágenes multiespectrales y pancromáticas: nuevas alternativas metodológicas basadas en las transformaciones wavelet discretas empleando el algoritmo de Mallat. Revista de Teledetección. 2002. 18: 63-73.

Hara, T., and Sakayama, T., Urawa, Japan, 1985. The Aplicability of Ground Probing Radar to Site Investigations, OYO Corp. Urawa Research Institute.

Hesse, Albert; Barba, Luis; Link, Karl; Ortiz, Agustin; 1997. A Magnetic and Electrical Study of Archaeological Structures at Loma Alta , Michoacan , Mexico. Archaeological Prospection 4(2):53-67.

Holben, B. N. (1986): Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. Internacional Journal of Remote Sensing, 7: 1417-1434.

Huete, A.R., G. Hua, J. Qi, A. Chehbouni & W.J.D. Van Leeuwen, 1992. Normalization of multidirectional red and NIR reflectances with the SAVI. Remote Sensing of Environment 41, pp. 143-154.

Huete, A.R.; Didan, K.; Miura, T.; Rodríguez, E.; Gao, X. y Ferreira, L. (2002): Overview of the radiometric and biophysical performances of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of Environment, 83: 195-213.

INEGI, 2011.

<http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/tlax/geolo.cfm?c=444&e=08>

Jensen J. R., 1996. Introductory digital image processing: A remote sensing perspective. Prentice-Hall. New Jersey. USA. 379 p.

Kauth, R. J. and Thomas, G. S., 1976, The tasseled cap a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen in Landdat, in Proceedings on the

Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, West Lafayette, Indiana, June 29 -- July 1, 1976, (West Lafayette, Indiana: LARS, Purdue University), 41-51.

Landsat 7, Science Data Users Handbook. (2010). National Aeronautics and Space Administration, (NASA).

http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/Landsat7_Handbook.pdf

Lasaponara, R., Masini, N., "Improving satellite Quickbird-based identification of landscape archaeological features through Tasseled Cap Transformation and PCA," in Proceedings of 21st CIPA Symposium, pp. 812-816, Atene, Greece, June 2007.

Lesure, Richard G., Aleksander Borejsza, Jennifer Carballo, Charles Frederick, Virginia Popper y Thomas A. Wake. 2006. Chronology, Subsistence, and the Earliest Formative of Central Tlaxcala, Mexico. *Latin American Antiquity* 17:474-492.

Lillesand, T. M. y Kiefer, R. W. (1994), *Remote Sensing and Image Interpretation*, 4th Ed., New York, John Wiley and Sons. pp. 26-40. Cap. 1- Remote sensing.

Manual técnico para el manejo de imágenes Spot 5.

<http://xsei.centrogeo.org.mx/ap/leon/Documentos/manual.pdf>

Merino Carrión, B.L., 1989. *La Cultura Tlaxco*. Serie Arqueológica, Colección Científica 174. Instituto Nacional de Antropología e Historia, Mexico City.

Oivind Due Trier, Siri Oyen Larsen, Andrune Solberg, 2009. Automatic Detection of Circular Structures in High-resolution Satellite Images of Agricultural Land. *Archaeological Prospection*, 16, 1-15 (2009).

Pohl, C. y Van Genderen, J. L. 1998. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. *International Journal of Remote Sensing*. 19(5): 23-854.

Química. Un proyecto de la American Chemical Society, 2007. Editorial Reverté.

Rothaus, Richard M., 1999. Landsat TM Imagery in Landscape Archaeology: Detecting and Modeling. *Remote Sensing in Archaeology*. XI Ciclo di lezioni sulla ricerca applicata in archaeologia certosa di pontignano (Siena), 6-11 Diciembre, 1999.

Reuter, Fabian. 2009. Plataformas orbitales y sensores. Serie didáctica No. 34, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero, Cátedra de Teledetección y Cartografía.

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W., Harlan, J. C. 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation, NASA/GSFC, Type III, Final Report, Grenbelt, MD, 371 pp.

SGM, 2008. Carta Geológico-Minera de Puebla-Tlaxcala, escala 1:500,000. Servicio Geológico Mexicano.

http://portaljsp.sgm.gob.mx/cartas_impresas/productos/cartas/estados/geologia/pue_tla.html

Snow, Dean Richard, 1966. A Seriation of Archaeological Collections from the Rio Zahuapan Drainage, Tlaxcala, Mexico. University Microfilms, 66-12, 984, Ann Arbor, Michigan.

Snow, Dean Richard, 1969. Ceramic Sequence and Settlement Location in Pre-Hispanic Tlaxcala. *American Antiquity* 34(2):131-145.

Snow, Dean Richard, 1972. Influencias teotihuacanas clásicas en la región norte-centro de Tlaxcala. En *Teotihuacan, XI Mesa Redonda de la Sociedad Mexicana de Antropología*, pp. 245-251. Sociedad Mexicana de Antropología, México, D.F.

Snow, D.R., 1976. Prehistory of the valley of Tlaxcala. In: Crawford, M.H. (Ed.), *The Tlaxcaltecs: Prehistory, Demography, Morphology and Genetics*, vol. 7. University of Kansas Publications in Anthropology, Lawrence, pp. 9-12.

Surfer V.9. Surface Mapping System, 1993-2010. Golden Software, Inc.

Te-Ming Tu, Yuh-Chi Lee, Chien-Ping Chang, Ping S. Huang, 2005. Adjustable intensity-hue-saturation and Brovey transform fusion technique for IKONOS/ QuickBird imagery. *Optical Engineering* 44(11), 116201, November 2005.

Transform V3.3. Data Visualization for 2D Matrix and Image Data. 1990-1996. Fortner Research LLC, Inc.

Tschohl, Peter, 1968. Über die Aufgabe der Archäologie im Rahmen eines Interdisziplinären Arealprojekts und den Stand der Archäologische-Ethnohistorischen Landesaufnahme im Becken von Puebla-Tlaxcala. En *Berichte über Begonnene und Geplante Arbeiten*, editado por Franz Tichey, pp. 40-66. Franz Steiner Verlag, Wiesbaden, Alemania.

U.S. Geological Survey (USGS), U.S. Department of the Interior. Chengquan Huang, Bruce Wylie, Limin Yang, Collin Homer and Gregory Zylstra. Derivation of a Tasseled Cap transformation based on Landsat 7 at satellite reflectance. Raytheon ITSS, USGS EROS Data Center Sioux Falls, SD 57198, USA.

Ventanas atmosféricas:

<http://legacy.spitzer.caltech.edu/espanol//edu/ir/windows/images/transmission.gif>

WRB, 2007. Base referencial mundial del recurso suelo. Un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional. International Union of Soil Sciences, World Soil Information, FAO. ISSN 1020-430X.