



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN
EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO
EDAFOLOGIA

**DETERMINACIÓN DE SUPERFICIES CULTIVADAS EN
TERRENOS DE LADERA A PARTIR DE IMÁGENES DE
SATÉLITE Y ORTOFOTOS DIGITALES**

MAURICIO VAZQUEZ RIVERA

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

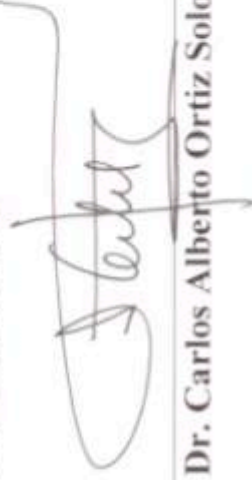
2008

La presente tesis titulada: “**DETERMINACIÓN DE SUPERFICIES CULTIVADAS EN TERRENOS DE LADERA A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE Y ORTOFOTOS DIGITALES**” realizada por el alumno Mauricio Vazquez Rivera, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EDAFOLOGIA

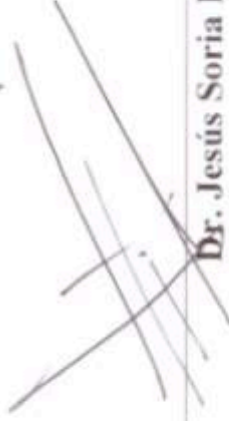
CONSEJO PARTICULAR:

Consejero:



Dr. Carlos Alberto Ortiz Solorio

Asesor:
(Director de tesis)



Dr. Jesús Soria Ruiz

Asesor:



Dra. Yolanda M. Fernández Ordóñez

Montecillo, Texcoco, Edo. de México Junio de 2008.

DETERMINACIÓN DE SUPERFICIES CULTIVADAS EN TERRENOS DE LADERA A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE Y ORTOFOTOS DIGITALES

Mauricio Vazquez Rivera, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2008

El presente estudio generó y probó una metodología para la estimación de superficies cultivadas en terrenos de ladera, a partir de imágenes de satélite y ortofotos digitales. La metodología se probó en una zona agrícola de Ixmiquilpan del Municipio de Tenango del Valle, Estado de México. Se utilizaron imágenes Spot 5 e Ikonos y una ortofoto digital. La metodología aplicó dos niveles de corrección geométrica. En el primer nivel las imágenes fueron rectificadas sin considerar la elevación del terreno. En el segundo nivel las imágenes se ortorrectificaron utilizando datos de un modelo digital de elevaciones y de las imágenes de satélite. Se realizaron cortes de 29 parcelas con cinco grados de pendiente y se estimaron las superficies a partir de una clasificación supervisada de imágenes spot pancromática y multiespectral e ikonos multiespectral. La exactitud de estas estimaciones se comparó contra mediciones realizadas a partir de levantamientos topográficos en las parcelas piloto. Para obtener resultados más exactos se generaron factores de ajuste a partir de datos estimados con levantamientos topográficos y los datos de estimaciones realizadas con las imágenes de satélite. Se determinó que la pendiente del terreno limita la determinación exacta de la superficie cultivada cuando se realiza a partir de imágenes satelitales. La estimación de superficies a partir de la imagen Spot multiespectral rectificada es la menos precisa, mientras que los mejores resultados se obtuvieron cuando se consideran los datos de elevación del terreno. La superficie estimada a partir de la imagen Ikonos ortorrectificada presentó una gran similitud con las estimaciones realizadas con levantamiento topográfico.

Palabras clave: Sensores remotos, Ikonos, Spot 5, ortorrectificación, laderas

DETERMINATION OF ARABLE LAND AREAS ON SLOPES THROUGH IMAGE SATELLITE AND DIGITAL ORTHOPHOTOS

Mauricio Vazquez Rivera, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2008

This study generated and tested a methodology for estimating cultivated areas on hillsides, from satellite imagery and digital orthophotos. The methodology was tested in the community of Santa Maria Jajalpa, Municipality of Tenango del Valle, State of Mexico. Spot 5 and Ikonos imagery and a digital orthophoto were used. The methodology applied two levels of geometric correction. In the first level the images were rectified without considering the elevation of the terrain. In the second level images were ortho-rectified using data from the digital elevation model and satellite imagery. 29 cuts of parcels with five degrees of slope were made and the surfaces were estimated through supervised classification of panchromatic and multispectral Spot and multispectral Ikonos imaging. The accuracy of these estimates was compared against measurements taken from field surveys in the pilot parcels. To obtain more accurate results were generated adjustment factors based on estimated data with surveys and obtained data from estimates with satellite imagery. It was determined that the estimated surfaces from the Spot multispectral corrected image is the least accurate, while the best results were obtained when considering the terrain elevation data. The estimated area from the orthorectified Ikonos image presented a great similarity with the estimates made from the survey.

Index words: Remote sensing, Ikonos, Spot 5, orthorectification, hillsides

CONTENIDO

I. INTRODUCCION	1
1.1 Planteamiento del problema	2
II. OBJETIVOS E HIPOTESIS	4
2.1. Objetivo general	4
2.1.1 Objetivos particulares	4
2.2. Hipótesis	4
2.2.1. Hipótesis general	4
2.2.1.1. Hipótesis particulares	5
III. JUSTIFICACION	6
3.1. Estimación de superficies cultivadas	6
3.2. La estimación de superficies cultivadas en terrenos de ladera	7
IV. REVISIÓN DE LITERATURA	9
4.1. Aplicaciones de la percepción remota en la agricultura	9
4.1.1. Uso de imágenes de satélite para estimar superficies	10
4.2. Estimación de superficies cultivadas en México	11
4.3. Morfología del terreno	12
4.3.1. Definición de pendiente del terreno	13
4.3.1.1. Pendiente simple	15
4.3.1.2. Pendiente compleja	16
4.4. Geomática	17
4.4.1. La percepción remota	17
4.4.2. El espectro electromagnético	18
4.5. Imágenes provenientes de plataformas satelitales y aviones	20
4.5.1. Imágenes satelitales	20
4.5.1.1. Imágenes Spot	21
4.5.1.2. Ikonos	22
4.5.2. Ortofotos Digitales	23
4.6. Resolución de las imágenes	23
4.7. Procesamiento digital	24
4.7.1. Correcciones radiométricas	25
4.7.2. Correcciones geométricas	26
4.7.2.1. Rectificación	27
4.7.2.2 Ortorrectificación	29
4.8. Sistemas de información geográficos	31
4.8.1. Información geográfica en un SIG	31
4.9. Geometría de observación	32
4.9.1. Angulo cenital solar y ángulo de elevación solar	33
4.9.1.1. El ángulo cenital y la corrección del sombreado topográfico	34
4.10. Modelos digitales de elevación	36
4.10.1. Estructura de datos en el DEM	36
4.10.1.1 Modelo vectorial: TIN (redes de triángulos irregulares)	37
4.10.1.2. Modelo raster: matrices regulares	38
4.10.2. Fuentes de error en los DEM	38
4.10.3. Utilidad de los Modelos digitales	39
4.11. Interpretación de imágenes	39

4.11.1. Clasificación digital.....	40
4.11.1.1. Clasificación supervisada.....	41
4.11.1.2. Clasificación no supervisada.....	42
4.12. Software procesadores de imágenes de satélite.....	43
4.12.1. PCI Geomatics.....	43
4.12.2. Software Erdas Imagine.....	43
4.12.3. Software Arc GIS.....	43
4.13. Sistemas de posicionamiento global (GPS).....	44
V. MATERIALES Y METODOS.....	46
5.1 El área de estudio.....	46
5.1.1. Localización geográfica.....	46
5.1.2. Clima.....	46
5.1.3. Agricultura.....	47
5.2. Adquisición y organización de imágenes de satélite.....	48
5.2.1. Imágenes Spot.....	48
5.2.2. Imágenes Ikonos.....	48
5.2.3. Ortofotos digitales.....	49
5.2.4. Selección del material geográfico en formato digital.....	50
5.3. Descripción y diagrama metodológico generado.....	50
5.3.1. Delimitación de sitios piloto.....	52
5.3.1.1. Digitalización de parcelas.....	54
5.3.2 Trabajo de campo.....	55
5.3.2.1. Identificación de terrenos en laderas.....	55
5.3.3. Procesamiento de las imágenes de satélite.....	57
5.3.3.1. Rectificación y Ortorectificación de imágenes.....	58
5.4. Diseño de tratamientos.....	60
5.5. Identificación de parcelas sobre Imágenes de satélite y ortofotos.....	61
5.6. Estimación de superficies a partir de análisis visual de imágenes.....	61
5.7. Estimación de superficies a partir de clasificación digital de imágenes de sensores remotos.....	62
5.8. Estimación de superficies a partir de imágenes rectificadas y ortorectificadas.....	62
5.9. Análisis estadístico.....	64
5.9.1. Elementos estadísticos.....	64
5.9.1.1. El modelo de regresión lineal simple.....	64
5.9.1.2. Coeficiente de determinación (R^2).....	66
5.9.1.3. Desviación estándar (σ).....	66
5.9.1.4. Análisis de resultados en función de la σ de las discrepancias.....	67
5.9.1.5. Obtención de coeficientes de ajuste.....	68
VI. RESULTADOS Y DISCUSION.....	69
6.1. Identificación de parcelas en campo.....	69
6.2. Estimación de superficies a partir del levantamiento topográfico.....	71
6.3. Correcciones geométricas.....	72
6.3.1. Resultado de la rectificación de las imágenes.....	72
6.3.2. Resultado de la ortorectificación de las imágenes.....	72
6.4. Estimación de superficies a partir de la digitalización de parcelas y GPS.....	73
6.5 Estimación de superficies en imágenes rectificadas y en imágenes ortorectificadas.....	75
6.6. Modelos de regresión.....	76

6.6.1. Modelos de regresión para el análisis global de datos.....	76
6.6.2. Modelos de regresión para el análisis de parcelas con pendiente de 0-29 %.....	77
6.6.3. Modelos de regresión para el análisis de parcelas con pendiente > 19.1%.....	78
6.6.4. Modelos de regresión para el análisis de parcelas agrupadas por rango de pendiente.....	78
6.6.5. Modelos de regresión para el análisis de parcelas agrupadas por complejidad de su pendiente.....	81
6.6.6. Modelos de regresión para el análisis de parcelas agrupadas por complejidad y gradiente de pendiente.....	83
6.7. Análisis de resultados en función de la Desviación estándar de las discrepancias (σ D).....	91
6.7.1. Análisis Global.....	92
6.7.2. Análisis de la σ D por rango de pendiente.....	92
6.7.3. Análisis para grupos de rangos de pendiente.....	94
6.7.4. Análisis de resultados en base a complejidad y rango de pendiente.....	96
6.7.5. Análisis en base a tamaño de la parcela.....	99
6.7.6. Análisis en base a tamaño y complejidad de las parcelas.....	101
6.7.7. Análisis de resultados sin incluir el tratamiento de Ikonos.....	103
6.7.8. Coeficientes de ajuste obtenidos.....	106
VII. CONCLUSIONES.....	108
VIII. RECOMENDACIONES.....	110
IX. LITERATURA CITADA.....	111

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Equivalencias entre el porcentaje y el ángulo de la pendiente.....	15
Cuadro 2. Clasificación de los tipos de pendientes simples.....	15
Cuadro 3. Clasificación de los tipos de pendientes complejas.....	16
Cuadro 4. Clases de pendiente según su gradiente y complejidad.....	16
Cuadro 5. Bandas espectrales y resoluciones de los sensores Spot.....	21
Cuadro 6. Características de las imágenes y ortofotos utilizadas.....	49
Cuadro 7. Intervalos de pendiente de las parcelas piloto.....	56
Cuadro 8. Tratamientos probados para estimar la superficie cultivada en laderas.....	60
Cuadro 9. Clasificación de parcelas con base en su rango de pendiente y complejidad.....	69
Cuadro 10. Superficies estimadas a partir de levantamientos topográficos.....	71
Cuadro 11. Error cuadrático medio en la rectificación de las imágenes con el mínimo de GCPs (4).....	72
Cuadro 12. Requerimientos y resultados del proceso de ortorrectificación.....	73
Cuadro 13. Superficies estimadas a partir de digitalización de parcelas y equipo GPS.....	74
Cuadro 14. Superficies estimadas a partir de imágenes rectificadas y de imágenes ortorrectificadas.....	75
Cuadro 15. Modelos de regresión generados a partir del análisis global.....	76
Cuadro 16. Modelos de regresión para parcelas con pendiente de 0-29% sin considerar su complejidad.....	77
Cuadro 17. Modelos de regresión para parcelas con pendiente mayor a 19.1% sin considerar su complejidad.....	78
Cuadro 18. Modelos de regresión para parcelas de 0-9% de pendiente sin considerar su complejidad.....	79
Cuadro 19. Modelos de regresión para parcelas con pendiente de 9.1 a 19% sin considerar su complejidad.....	79
Cuadro 20. Modelos de regresión para parcelas con pendiente de 19.1 a 29% sin considerar su complejidad.....	80
Cuadro 21. Modelos de regresión para parcelas con pendiente de 29.1 a 39%, sin considerar su	

complejidad.....	80
Cuadro 22. Modelos de regresión para parcelas con pendiente mayor a 39.1% sin considerar su complejidad.....	81
Cuadro 23. Modelos de regresión para el análisis de parcelas con pendiente simple.....	82
Cuadro 24. Modelos de regresión para el análisis de parcelas con pendiente compleja.....	82
Cuadro 25. Modelos de regresión generados a partir del análisis de parcelas con pendiente simple y donde se han agrupado los rangos 1, 2 y 3.....	83
Cuadro 26. Modelos de regresión generados a partir del análisis de parcelas con pendiente simple y donde se han agrupado los rangos 3, 4 y 5.....	84
Cuadro 27. Modelos de regresión para el análisis de parcelas con pendiente compleja y gradiente de 0-29%.....	85
Cuadro 28. Modelos de regresión generados a partir del análisis de parcelas con pendiente compleja y donde se han agrupado los rangos 3, 4 y 5.....	85
Cuadro 29. Modelos de regresión generados a partir del análisis de parcelas con superficie menor a 1 ha.....	86
Cuadro 30. Modelos de regresión generados a partir del análisis de parcelas con superficie mayor a 1 ha.....	87
Cuadro 31. Modelos de regresión generados a partir del análisis de parcelas con superficie de 1 a 2 hectáreas.....	87
Cuadro 32. Modelos de regresión generados a partir del análisis de parcelas con superficie mayor a 2 hectáreas.....	88
Cuadro 33. Modelos de regresión generados a partir del análisis de parcelas simples menores a 1 ha.....	88
Cuadro 34. Modelos de regresión generados a partir del análisis de parcelas simples mayores a 1 ha.....	89
Cuadro 35. Modelos de regresión generados a partir del análisis de parcelas complejas menores a 1 ha.....	89
Cuadro 36. Modelos de regresión generados a partir del análisis de parcelas complejas mayores a 1 ha.....	90
Cuadro 37. Modelos de regresión generados a partir del análisis de parcelas complejas mayores a 2 hectáreas.....	91
Cuadro 38. Desviaciones estándar de las discrepancias: global y por rango de	

pendiente.....	92
Cuadro 39. Desviaciones estándar de las discrepancias: global y por grupos de rangos de pendiente.....	95
Cuadro 40. Desviaciones estándar de las discrepancias: global, por complejidad, y por complejidad-grupos de rangos de pendiente.....	96
Cuadro 41. Desviaciones estándar de las discrepancias: global y por tamaño de las parcelas.....	99
Cuadro 42. Desviaciones estándar de las discrepancias: global y por complejidad-tamaño de las parcelas.....	101
Cuadro 43. Coeficientes de ajuste para los tratamientos generados ($K=SC/S$).....	107

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Pendiente expresada en porcentaje; pendiente del 60%.....	13
Figura 2. Pendiente expresada en grados sexagesimales; pendiente de 60°.....	14
Figura 3. Espectro electromagnético.....	19
Figura 4. Representación del ángulo de incidencia solar (i) y el ángulo cenital solar (Z).....	32
Figura 5. Superficies especulares y lambertianas.....	33
Figura 6. Localización geográfica de la zona de estudio.....	47
Figura 7. Modelo de elevación digital del municipio de Tenango del Valle.....	50
Figura 8. Esquema metodológico de trabajo.....	51
Figura 9. Subescena de Ikonos de la zona de estudio, compuesto en falso color.....	52
Figura 10. Subescena de ortofotos de la zona de estudio.....	52
Figura 11. Subescena de Spot Multiespectral de la zona de estudio, compuesto en falso color.....	53
Figura 12. Subescena de Spot pancromática de la zona de estudio.....	53
Figura 13. Parcelas digitalizadas sobre una imagen Ikonos en falso color.....	54
Figura 14. Equipo de trabajo para georreferenciar las parcelas y estimar la pendiente del terreno en las parcelas piloto.....	56
Figura 15. Estimación de superficie a partir de levantamiento topográfico.....	57
Figura 16. Proceso seguido para la estimación de superficies en base a clasificación supervisada de cada parcela.....	63
Figura 17. Diagrama de flujo para llegar a la estimación de superficies cultivadas.....	63
Figura 18. Parcelas con pendiente simple (a, c y e) y pendiente compleja (b, d, y f) en la zona de estudio.....	70

Dedico esta tesis a:

Mi esposa Verónica González Rivera por estar presente cuando los demás se han ido, porque con su presencia las horas de estudio se hicieron gratas y por el apoyo incesante.

Mis hijos, Mauricio, Carlos y Maximo quienes me motivaron y fueron pacientes conmigo durante todo el tiempo invertido en este trabajo.

Mis padres que con su ejemplo de lucha y dedicación al trabajo me alentaron a seguir adelante.

Mis hermanos, en especial a Hector, por los consejos y sugerencias para mejorar este trabajo.

Mis Suegros ya que con su apoyo incondicional logré culminar este trabajo

Mis tíos Jesús y Flor quienes siempre han estado en los momentos importantes de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento:

Al Colegio de Postgraduados por la enseñanza y el aprendizaje que en sus aulas recibí.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico, sin el cual no habría sido posible dar este importante paso, en mi formación profesional.

Al Dr. Carlos A. Ortiz Solorio, al Dr. Jesús Soria Ruiz, a la Dra. Yolanda M. Fernández Ordóñez, quienes con su conocimiento apoyaron la culminación de este trabajo.

A los profesores, dignos maestros, hombres íntegros, gracias por hacer posible, a través de su esfuerzo, que se engrandezca el Colegio de Postgraduados.

Me complace agradecer de forma especial al Laboratorio de Geomática del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, por el apoyo y los medios recibidos, recordando especialmente al geógrafo Mario Contreras G.

I. INTRODUCCIÓN

La estimación de la superficie cultivada es un dato fundamental para la planeación agrícola y económica de cualquier región, estado o país. De ella depende el cálculo de producción agrícola, los requerimientos de insumos, la planificación de importaciones o el cálculo de capacidades de exportación. En este sentido, la falta de información sobre la superficie real sembrada es un problema que enfrentan las dependencias federales y estatales del sector agrícola del país.

Existe la necesidad de incursionar con nuevas herramientas y técnicas que ayuden a medir las áreas cultivadas en laderas, para tener una mejor estimación de sus superficies. Esta estimación en el sector agrícola reviste primordial importancia, debido a que en forma objetiva y oportuna permite la planificación de acciones.

Las imágenes de satélite ópticas son una herramienta que tiene gran potencialidad para ser utilizada en la generación de datos e información de coberturas en general; estas almacenan las respuestas espectrales de las cubiertas presentes en la superficie terrestre. Sin embargo, por si sola una imagen nos dice poco, y para extraer de ella información confiable es necesario someterla a una serie de procesos (Chuvieco, 1996). Uno de estos es la corrección geométrica, con la cual se espera corregir la distorsión propia de la imagen debida a la curvatura de la tierra, la no uniformidad del movimiento del scanner y la no linealidad del espejo escaneador que pueden producir dicha distorsión.

Las metodologías para calcular superficies cultivadas se basan en la estimación a través de la recopilación de datos en campo complementada con técnicas de percepción remota óptica como el análisis de imágenes de satélite ópticas. En esta tesis de aquí en adelante nos referimos a percepción remota óptica y a imágenes de satélite ópticas y no de radar. En países como Argentina, Canadá, Estados Unidos y algunos de la Unión Europea, la estimación de superficie se realiza a partir de información extraída de imágenes digitales. Para el caso de México el uso de esta tecnología es relativamente reciente. Se conoce que estos métodos han sido probados en superficies comúnmente planas donde se practica una agricultura extensiva

bajo riego, pero en terrenos de ladera, de pequeña superficie y bajo condiciones de secano, como sucede en gran parte del territorio mexicano y en especial en el centro y sur del país, su uso ha sido poco implementado con resultados imprecisos, debido a las características propias del terreno.

A fin de eliminar esa incertidumbre, esta tesis desarrolló una metodología que permite estimar con exactitud la superficie cultivada y conocer hasta que punto la información extraída de imágenes de satélite ópticas es confiable cuando la pendiente de los terrenos se convierte en un factor de error.

Para el desarrollo del trabajo de investigación se dispuso de una imagen Ikonos multiespectral, una imagen Spot 5 multiespectral y una Spot 5 pancromática, una ortofoto digital, además de un modelo de elevación digital (DEM) que cubre el área de estudio; siendo esto adecuado para realizar el estudio y los procedimientos de corrección geométrica en imágenes satelitales.

1.1 Planteamiento del problema

El cultivo en laderas en nuestro país tiene un alto nivel de importancia, debido a que en gran parte del territorio mexicano se cultivan terrenos que se consideran no aptos para la agricultura y sin embargo representan una fuente de empleo en las comunidades rurales. Este nivel de importancia crea la necesidad de inventariar y desarrollar las áreas del territorio mexicano que son cultivadas en laderas.

En la actualidad se cuenta con diferentes técnicas e instrumentos para este fin, las cuales han evolucionado con el tiempo. Una de estas técnicas es la captura de datos con imágenes satelitales, que brinda la oportunidad de realizar estudios de las diferentes coberturas vegetales existentes en la superficie terrestre.

Uno de los factores más limitantes para la determinación de áreas cultivadas en laderas y en general en el territorio mexicano, es la forma irregular del terreno. Para obtener una correcta

información a partir de una imagen satelital en regiones montañosas; es necesario realizar correcciones geométricas y topográficas para eliminar el efecto del relieve, el cual es causado por una distorsión en la iluminación ocasionada por la pendiente, el aspecto topográfico y la posición del sol (González *et al.*, 2001). Debido a estas alteraciones de iluminación que se presentan en las imágenes, se hace necesario realizar una evaluación y análisis de los métodos de corrección geométrica existentes, conociendo los beneficios, alcances y limitaciones de cada método, para definir cual permite obtener los mejores resultados en la estimación de superficies cultivadas en laderas.

Para utilizar como fuente de información a las imágenes de satélites en regiones montañosas, es necesario tener presente que la pendiente modifica la geometría del flujo incidente, generando distorsión de iluminación en la imagen (Riaño *et al.*, 2003). Por tanto la reflectancia media para la misma cubierta en distintas laderas puede ser muy variada, implicando severos problemas en el reconocimiento y clasificación de coberturas temáticas (Chuvieco, 2002). Es por esto que se realiza una corrección geométrica y del desplazamiento por relieve a las imágenes, para tratar de homogenizar la señal de iluminación de la misma cubierta para todas las pendientes.

Actualmente existen dos métodos de corrección geométrica (Rectificación y Ortorectificación), pero es necesario conocer los beneficios, alcances y limitaciones de cada uno de ellos con el fin de determinar cual ofrece mayores beneficios.

El presente estudio, reviste gran importancia económica y social, debida a que mediante la aplicación los resultados, se podrá hacer uso de información digital que facilite la estimación de áreas cultivadas en laderas de manera más precisa.

II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1. Objetivo general

- Generar una metodología para mejorar la estimación de superficies cultivadas, en terrenos de ladera, a partir de imágenes de satélite y ortofotos digitales.

2.1.1 Objetivos particulares:

1. Determinar el porcentaje de pendiente del terreno, a partir del cual se tienen errores de estimación de la superficie cultivada con imagen satelital y ortofotos digitales.
2. Determinar si el ángulo de elevación solar disminuye el efecto topográfico de las imágenes, así como establecer si el Modelo de Elevación Digital mejora la estimación de superficies cultivadas en terrenos de ladera.
3. Generar coeficientes de ajuste para imágenes de satélite Spot 5 pancromáticas y multispectrales, Ikonos y ortofotos digitales, para mejorar la estimación de superficies cultivadas, en terrenos de ladera con pendiente simple y con pendiente compleja.

2.2. Hipótesis

2.2.1. Hipótesis general

- La pendiente del terreno limita la determinación exacta de la superficie cultivada cuando se realiza a partir de imágenes satelitales y ortofotos digitales.

2.2.1.1. Hipótesis particulares

1. Existe un intervalo de pendiente a partir del cual se generan errores en la estimación de la superficie cultivada cuando ésta se realiza exclusivamente a partir de imágenes de satélite.
2. La estimación de superficie cultivada en terrenos de ladera, se mejora cuando consideramos el ángulo de elevación solar de las imágenes de satélite y el Modelo de Elevación Digital para eliminar el efecto del relieve.
3. La metodología para generar estimaciones exactas en superficies cultivadas en terrenos de ladera a partir de imágenes debe considerar estimaciones con coeficientes de ajuste.

III. JUSTIFICACIÓN

En México, la falta de información sobre la superficie real sembrada, es un problema que enfrentan las dependencias federales y estatales del sector agrícola. Por ejemplo en el caso de eventos inesperados, como las pérdidas por inundaciones, heladas, sequía, entre otros, se presentan problemas por la incertidumbre de los daños estimados; la población afectada demanda recibir una retribución justa por las pérdidas sufridas, en tal proceso, las autoridades enfrentan situaciones de emergencia para generar proyectos de recuperación de las zonas, y de compensación para los afectados, quienes, en muchos casos sobre estiman las pérdidas para recibir mayores montos y/o proyectos.

Del año 2004 al año 2006, la Subsecretaría de Agricultura del Gobierno Federal, coordinó un proyecto a nivel nacional denominado PRONESPRE (*Proyecto Nacional de Estimación de Superficies, Producción y Rendimientos*). Las dependencias involucradas eran ASERCA (Apoyos y Servicios a la Comercialización Agrícola), SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) e INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias). Cada una de esas dependencias desarrolló una tarea específica dentro del PRONESPRE. Para la determinación de superficies cultivadas, ASERCA empleó imágenes de satélite Spot mediante el método de segmentación. Cabe mencionar que este método fue generado en Francia para zonas planas y con agricultura extensiva. Por ello, en México, el método utilizado, siempre se ha cuestionado sobre todo porque los sistemas de producción son totalmente distintos a los del país donde fue generado; aun existe la incertidumbre de saber si los datos reportados sobreestiman o subestiman a la superficie.

3.1. Estimación de superficies cultivadas

Existen múltiples metodologías para calcular superficies cultivadas, en varios países la estimación se realiza a través de técnicas de muestreo convencional, con recopilación de datos en campo, complementada con técnicas de percepción remota, mediante el análisis de imágenes de satélite (González y Cuevas, 1993). El uso de imágenes de satélite permite

detectar áreas cultivadas en zonas agrícolas, y mediante una calibración con muestreo de campo se relaciona la reflectancia con las características de las áreas cultivadas, para poder obtener un inventario de cultivos (Bolaños-González, *et al.*, 2001).

La estimación de superficies cultivadas mediante el uso de técnicas convencionales se complementa con la toma de muestras con técnicas de percepción remota, lo cual se ha convertido en una aplicación viable y de interés económico en la agricultura. El Servicio de Estadísticas Agrícolas de los Estados Unidos aplicó dicha metodología de 1977 a 1988, con resultados satisfactorios respecto a la oportunidad, exactitud y costo de los mismos. En Canadá, Australia, Francia e Italia se desarrollaron experiencias similares que confirman la validez e idoneidad de dicha metodología (González *et al.*, 1990).

3.2. La estimación de superficies cultivadas en terrenos de ladera

Cuando existen pendientes pronunciadas las diferencias entre la superficie geométrica y la superficie reducida, que es la que se utiliza al trabajar con cartografía y Sistemas de Información Geográfica (SIG), pueden ser importantes. La heterogeneidad del relieve es uno de los factores que aporta más varianza y confusión espectral en cualquier tipo de imagen captada por un sensor remoto. Las áreas montañosas, y el relieve abrupto en general, pueden afectar de manera importante a la imagen tomada por el sensor (Salvador *et al.*, 1996, Shepherd y Dymond, 2003).

Es claro que los suelos de laderas con fuertes pendientes han presentado un importante cambio de uso. Las actividades agrícolas en terrenos de ladera se desarrollan de manera tradicional, es decir, bajo condiciones de pequeña superficie, dependiendo de las condiciones de temporal, además de utilizar la mano de obra familiar y cultivar principalmente granos básicos (Díaz *et al.*, 2004). Bajo estas condiciones de relieve complejo es difícil derivar las firmas espectrales, tal es el caso de los cultivos en México, debido a que las parcelas varían en tamaño, forma y topografía y las características del cultivo también son variadas. Además, en México como en

otros países en vías de desarrollo, los cultivos ocupan áreas diferentes en cada ciclo del cultivo, lo cual hace más complicada su identificación (Soria-Ruiz *et al.*, 1998).

La planeación agrícola del país exige contar con información confiable acerca de la superficie sembrada, sobre todo para aquellas zonas donde se cultiva en terrenos de ladera, ya que esta información es fundamental en la toma de decisiones. Por otra parte, no existe una metodología para estimar superficies cultivadas en terrenos de ladera a partir de imágenes de satélite, lo cual crea un reto y motiva la realización de la presente investigación.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Aplicaciones de la percepción remota en la agricultura

La tecnología actual ofrece la posibilidad de interpretar a la superficie terrestre a través de la percepción remota. Este método permite obtener información con cierto grado de confiabilidad y certidumbre de la actividad fotosintética que presentan las coberturas vegetales en un determinado momento (Chuvieco, 2002; Hoffhine y Sader, 2002).

El uso de imágenes de satélite de alta resolución espacial, ha generado nuevos retos en el campo de las aplicaciones de los sensores remotos. Con tales instrumentos de percepción remota se capta la reflectancia de los objetos, y es posible conocer las características y rasgos de dichos objetos de la superficie terrestre, mediante el estudio de su radiación reflejada, emitida o de ambas.

Las imágenes satelitales y fotografías aéreas tienen diversas aplicaciones, por ejemplo, para estimar la cobertura de copa arborea (Valdez, *et al.*, 2006), para la estimación de los niveles de biomasa de diferentes cultivos (Quarmby *et al.*, 1993; Akiyama e Inoue, 1996), en la obtención de estadísticas agrícolas (Benedetti y Rossini, 1993; González y Cuevas, 1993), para evaluar el manejo y crecimiento de maíz y soya (Thenkabail *et al.*, 1992; Daughtry *et al.*, 1992) o trigo (Wiegand *et al.*, 1992; Gupta, 1993), situaciones de sequía (Liu *et al.*, 1994), obtener relaciones entre el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y la banda térmica (Van de Griend y Owe., 1993; Peña, 2007) con la predicción de rendimiento en maíz (Shanahan *et al.*, 2001, Soria-Ruiz *et al.*, 2004).

Aplicaciones completas con estos medios son cada día más frecuentes. El conocimiento detallado de la reflectancia de un objeto permite identificar sus características de interés y entre otras cosas separar tipos de cultivos, bosques, etc. (Chuvieco, 1990). Un ejemplo son los numerosos estudios realizados sobre el comportamiento de la vegetación en todo el mundo (Chuvieco, 2002; García, 2005). Particularmente el método presenta un gran número de ventajas; mediante la utilización de imágenes obtenidas con sensores remotos destinados especialmente para el estudio de los recursos naturales (Landsat, Spot, IKONOS, entre otros).

Es posible, entre otras actividades, discriminar áreas con cubiertas vegetales (Hoffine y Sader, 2002), medir la biomasa vegetal (Foody y Boyd, 2005, Liu *et al.*, 2005) y establecer el vigor de una superficie cubierta con vegetación (Rogan, *et al.*, 2001; García, 2005).

La tecnología espacial aplicada al inventario de los recursos naturales es altamente conocida; el barreador multiespectral Landsat (MSS, por sus siglas en inglés), el mapeador temático (TM), los instrumentos multiespectrales y pancromáticos Spot, IKONOS y otros de mayor resolución como el Quickbird y los sensores NOAA-AVHRR, forman parte de la lista de los llamados instrumentos operacionales para la observación de la tierra. En este sentido, la alta resolución espacial de las imágenes de los sensores recientemente lanzados ofrece nuevas oportunidades para el manejo de los cultivos y aplicaciones agrícolas (Yang, *et al.*, 2004).

4.1.1. Uso de imágenes de satélite para estimar superficies

Desde la década de los años 70 se consideró el empleo de imágenes de satélite ópticas para estimar superficies cultivadas; a partir de imágenes Landsat Multiespectral Escáner (MSS) se realizaron estimaciones con 80 % de exactitud (Bauer, *et al.*, 1979). Para obtener una mayor exactitud en el cálculo de superficies se ha incrementado el uso de Spot-vegetation (Stroppiana *et al.*, 2002) y de otros sensores de mayor resolución para una estimación más precisa de área devastada por incendios forestales (Sandoval, 2003).

Tanto para la agricultura extensiva como para el minifundio, las imágenes de satélite muestran resultados relativamente precisos en la identificación fenológica de los cultivos y en la delimitación de las superficies cultivadas.

Por ejemplo una imagen multiespectral Spot fue utilizada para la estimación del estado fenológico y la cuantificación de áreas sembradas con caña de azúcar. En este caso, para determinar la extensión superficial de parcelas de tamaño pequeño, se hizo un ensayo preliminar con una imagen Spot. En la estimación de la superficie de las parcelas estudiadas se obtuvieron errores que oscilan entre 2.7% y 1.5%, lo cual corresponde a una inexactitud de

1890 m² y 1500 m² para siete y 10 hectáreas sembradas respectivamente. Los resultados estuvieron determinados por la resolución espacial de las imágenes, sobre todo en superficies pequeñas. Sólo para parcelas mayores a dos hectáreas la estimación comienza a ser relativamente precisa (Gónima y Durango, 2005).

De manera semejante la utilización de imágenes QuickBird, para la obtención de cartografía vegetal y agrícola a escalas 1:10,000 y 1:20,000 y las ventajas del uso de este sensor en aplicaciones agrícolas tales como la detección automática de cultivos y la cuantificación de superficies cultivadas con alta exactitud, son algunos ejemplos (Sánchez y Santos, 2004).

4.2. Estimación de superficies cultivadas en México

Existen pocos trabajos en la literatura reciente donde se apliquen métodos exclusivos para determinar superficies cultivadas en terrenos de ladera, pero sí existen propuestas al respecto para zonas de riego. Por otra parte, a pesar del incremento de los cultivos en laderas y su trascendencia económica, no se dispone de información precisa respecto a su localización geográfica, ni a la tasa de aumento de superficie de cultivo desde sus inicios, hasta el presente.

En México, el INEGI realizó una serie de proyectos para cuantificar superficies cultivadas con ayuda de imágenes del satélite Landsat, en los que obtuvo resultados prometedores; tal es el caso del estudio realizado en la Unidad Celaya del Distrito de Riego La Begoña, en el cual se obtuvo una exactitud del área cultivada del 99%; además fue posible separar 7 clases, entre las que se encuentran: frutales, alfalfa desarrollada, alfalfa creciendo, alfalfa recién cortada, suelo desnudo claro y caminos, suelo desnudo y negro y suelo con rastrojo (Patlán, 1991).

Soria-Ruiz *et al.* (2000) cuantificaron sitios de ocurrencia de maíz bajo riego, a través del análisis temporal de los Índices de Vegetación de Diferencia Normalizada, obtenidos a partir de imágenes Landsat-TM. Los resultados de las imágenes clasificadas, al compararlos con la verificación de campo, indicaron que se logró una efectividad de 75 %.

A partir del 2004, para estimar superficies cultivadas, se creó el Proyecto Nacional de Estimación de Superficies, Producción y Rendimientos (PRONESPRE). En este proyecto participaron dependencias gubernamentales como el SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera); INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias); las Delegaciones de SAGARPA de los Estados y ASERCA (Apoyos y Servicios a la Comercialización Agropecuaria), donde cada una desempeña actividades específicas (Pierrot y de la Sierra, 2004).

Parte de la metodología para la estimación de superficies, con imágenes Spot, se basa en establecer zonas de muestreo denominadas “segmentos” sobre las áreas cultivadas e identificadas en la estratificación con imágenes de alta resolución. ASERCA trabajó con la metodología empleada por la Unión Europea, basada en generación de áreas de muestreo o segmentos de 49 ha, donde además es requisito una cobertura del 3% de cada Región Agrícola a evaluar, para esto se lleva a cabo una selección aleatoria dentro de la región agrícola y le da seguimiento a los segmentos seleccionados (Pierrot y de la Sierra, 2004).

Debido a la falta de exactitud, muy cuestionada de los datos reportados por ASERCA esta dependencia dejó de operar dentro del PRONESPRE en diciembre del 2006, lo cual abre un nuevo reto a la presente investigación ya que da la oportunidad de generar una metodología más confiable para su aplicación en el Gobierno Federal.

4.3. Morfología del terreno

La configuración de la superficie de la tierra considerada en este trabajo es geométrica e incluye pendiente del suelo y forma de la superficie de la tierra. La configuración de la superficie de la tierra y relieve es un tanto diferente. Relieve, en este contexto, se refiere a la elevación o diferencias en elevación sobre el nivel medio del mar, considerado colectivamente, de un suelo superficial sobre una gran escala. La elevación puede ser determinada a partir de mapas topográficos o usando un altímetro.

Dentro del relieve lo más significativo es la pendiente que afecta a las propiedades del suelo a través de la distribución de agua en el perfil, el escurrimiento superficial y la erosión.

4.3.1. Definición de pendiente del terreno

La pendiente es una forma de medir el grado de inclinación del terreno. A mayor inclinación mayor valor de la pendiente. Se mide calculando la tangente del ángulo de inclinación de la superficie, que a su vez se calcula dividiendo el cambio vertical en altitud entre la distancia horizontal. Normalmente la pendiente se expresa en porcentaje que equivale al valor de la tangente (pendiente) multiplicado por 100. $\text{Porcentaje de Pendiente} = \text{Altura} / (\text{Base}) (100)$.

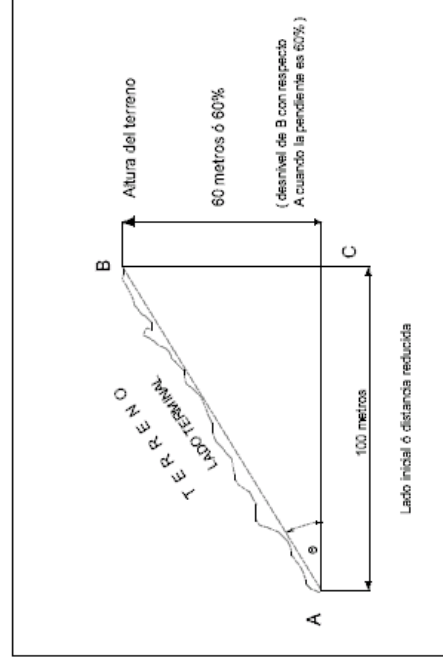


Figura 1. Pendiente expresada en porcentaje; pendiente del 60%. Fuente: Dirección General de Información Agraria – ENAPROVE, 2004.

Esta forma de expresar la pendiente es muy común, aunque puede ser algo confusa porque por ejemplo un valor de pendiente del 100% se corresponde con un ángulo de 45 grados ya que la altura y la base de un ángulo de 45 grados coinciden y al dividirlos da como resultado 1 que al multiplicarlo por 100 es igual a una pendiente del 100%.

Si un terreno tiene una pendiente de 60%, indica que el terreno sobre el cual nos desplazamos está 60 metros más arriba desde el inicio, cuando se avanza 100 metros en el lado inicial

(distancia reducida), en la práctica nos desplazamos sobre el terreno (lado terminal) y hemos recorrido 116 metros; obviamente este sistema tiene un límite práctico cuando se tiene un desnivel de 100% o sea que tenemos 100 metros de desnivel, que equivale a un ángulo de 45° , a partir de este punto es preferible expresarlo en grados.

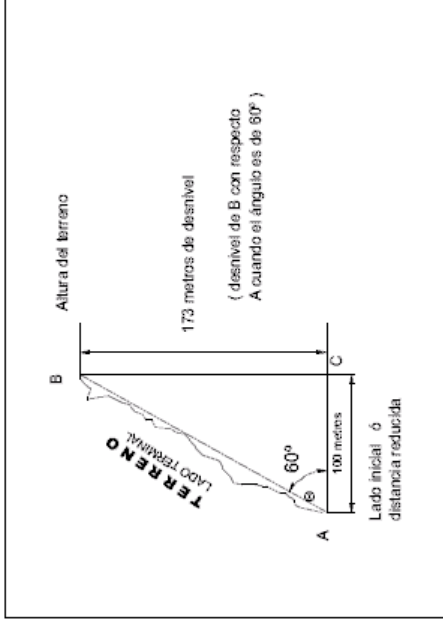


Figura 2. Pendiente expresada en grados sexagesimales; pendiente de 60° . Fuente: Dirección General de Información Agraria – ENAPROVE, 2004.

La pendiente tiene una connotación de escala y una configuración superficial, además la pendiente tiene gradiente, complejidad, longitud, y aspecto. La pendiente es además, un parámetro determinante en la estimación del riesgo de erosión de los suelos (López-Rodríguez *et al.*, 2004).

El gradiente de pendiente, es la inclinación de la superficie del suelo desde la horizontal. La diferencia en elevación entre dos puntos es expresada como un porcentaje de la distancia entre esos dos puntos. Si la diferencia en elevación es un metro sobre una distancia horizontal de 100 metros, el gradiente de pendiente es 1%.

Las pendientes se calculan con gran exactitud utilizando el aparato topográfico denominado tránsito o teodolito, existen otros instrumentos más prácticos como los clisímetros y los niveles de mano.

El Cuadro 1 muestra equivalencias entre porcentaje de gradiente y grado de ángulo de la pendiente.

Cuadro 1. Equivalencias entre el porcentaje y el ángulo de la pendiente.

Porcentaje	Angulo	Angulo	Porcentaje
0	0°00'	0°	0
5	2°52'	2°	3.5
10	5°43'	4°	7.0
15	8°32'	6°	10.5
20	11°19'	8°	14.0
25	14°02'	10°	17.6
30	16°42'	12°	21.2
35	19°17'	15°	26.8
40	21°48'	20°	36.4
50	26°34'	25°	46.6
60	30°58'	30°	57.7
70	34°59'	35°	70.0
80	38°39'	40°	83.9
90	41°59'	45°	100.0
100	45°00'	50°	109.2

Fuente: Soil Survey Manual, 2006.

4.3.1.1. *Pendiente simple*

Según el tipo de pendiente se diferencia en pendiente simple o uniforme y pendientes complejas o de topografía ondulada. En el Cuadro 2 se da una clasificación de los tipos de pendiente.

Cuadro 2. Clasificación de los tipos de pendientes simples.

DENOMINACIÓN	PORCENTAJE
Plano	0 – 1
Suavemente inclinado	1 – 3
Moderadamente inclinado	3 – 8
Fuertemente inclinado	8 – 15
Moderadamente escarpado	15 – 25
Escarpado	25 – 45
Muy escarpado	45 – 65

Fuente: CIREN, 1999.

4.3.1.2. *Pendiente compleja*

La complejidad de la pendiente se refiere a la forma superficial sobre la escala de una unidad de delineación cartográfica. Un ejemplo de la clasificación de pendientes complejas se presenta en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Clasificación de los tipos de pendientes complejas.

DENOMINACIÓN	PORCENTAJE
Casi Plano	0 – 2
Ligeramente ondulado	2 – 5
Suave ondulado	5 – 8
Moderadamente ondulado	8 – 15
Fuertemente ondulado	15 – 20
De lomajes	20 – 30
De cerros	30 – 50
De montañas	Más de 50

Fuente: CIREN, 1999.

Una guía para terminología de varias clases de pendiente definidas en términos de gradiente y complejidad se da en el Cuadro 4. Los términos son usados en discusión de la pendiente del suelo, y pueden ser usados también en nombrar fases de pendiente.

Cuadro 4. Clases de pendiente según su gradiente y complejidad.

Pendientes simples	Pendientes complejas	Límites del gradiente de pendiente	
		Porcentaje inferior	Porcentaje superior
Casi plana	Casi plana	0	3
Suavemente inclinada	Ondulada	1	8
Fuertemente inclinada	Rugosa	4	16
Moderadamente escarpada	Montañoso	10	30
Escarpado	Escarpado	20	60
Muy escarpado	Muy escarpado	>45	

Cuando existen pendientes pronunciadas las diferencias entre superficie geométrica y superficie reducida, que es la que se utiliza al trabajar con cartografía y Sistemas de

Información Geográfica (SIG), pueden ser importantes. Por ello la heterogeneidad del relieve (cambios de pendiente) es uno de los factores que aporta más varianza y confusión espectral en cualquier tipo de imagen captada por un sensor remoto. En especial las áreas montañosas, y el relieve abrupto en general, pueden afectar de manera importante a la imagen tomada por el sensor (Salvador *et al.*, 1996, Shepherd y Dymond, 2003).

4.4. Geomática

Una de las ciencias aplicadas modernas disponibles para el estudio de la superficie terrestre es la geomática. Esta disciplina, cuyo origen se encuentra en la unificación principalmente de ciencias de la tierra y de la informática, consiste en una integración de datos, métodos y tecnologías para el estudio del espacio geográfico. Las tecnologías y actividades realizadas en este ámbito, constituyen los medios para adquirir y manejar datos espaciales. Éstos, son interpretados y procesados con varios fines, tales como estudios científicos y planificación territorial (CCRS, 2004).

Dentro de la geomática, existen conceptos interrelacionados que permiten entender la manera de obtener y procesar, para finalmente representar la información obtenida. En el marco conceptual de este trabajo se abordaran cuatro conceptos esenciales que introducen en grandes rasgos al mundo de esta disciplina: i) Percepción remota; ii) Sistemas de información geográfico (SIG); iii) Modelo de Elevación Digital (MED) y iv) Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

4.4.1. La percepción remota

Percepción Remota, proviene del inglés, *Remote Sensing*, propuesto a principios de los sesenta como concepto para designar cualquier medio de observación remota (Chuvieco, 2002). Para Campbell (1996), es la práctica de derivar información acerca de la superficie de la tierra y agua usando imágenes adquiridas desde una perspectiva usando radiación electromagnética en

una o más regiones del espectro electromagnético, reflejada o emitida por la superficie de la tierra.

Para la CCRS (2004), es "Científicamente definida como "la ciencia (para muchos, arte) de conseguir información relativa a la superficie de la tierra sin necesidad de estar en contacto con ella.

Actualmente, el término es un concepto amplio y asociado a la detección de un área, objeto o fenómeno bajo investigación sin estar en contacto físico con él (Lillesand *et al.*, 2004).

La percepción remota ha sido ampliamente utilizada tanto para estudios atmosféricos como estudios de los recursos naturales sobre la superficie de la tierra y se han realizado muchas investigaciones sobre monitoreo de problemas ambientales o de la dinámica de los recursos naturales (Prados, 1995).

4.4.2. El espectro electromagnético

El espectro electromagnético es el conjunto de ondas electromagnéticas que se propaga de manera ondulatoria y con velocidad constante, que es la de la luz, aproximadamente de 300.000 km/s. En el espectro electromagnético las ondas más cortas o las de mayor energía corresponderán a los rayos gamma y las longitudes de onda más largas, o sea las menos energéticas, corresponderán a las ondas de radio (Figura 3). Si bien la sucesión de valores de longitud de onda es continua, suele establecerse una serie de bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar (Chuvieco, 1990).

En la percepción remota conviene destacar una serie de bandas espectrales, que son las más frecuentemente empleadas con la tecnología actual. La terminología usada es la siguiente:

Espectro visible (0,4 a 0,7 μm). Se denomina así por ser la única radiación electromagnética que puede percibir el ojo humano, coincidiendo con las longitudes de onda donde es máxima

la radiación solar. Suelen distinguirse tres bandas elementales que se denominan azul (0,4 a 0,5 μm); verde (0,5 a 0,6 μm), y rojo (0,6 a 0,7 μm), en razón a los colores elementales asociados a estas longitudes de onda.

Infrarrojo cercano (0,7 a 1,3 μm). Es importante por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.

Infrarrojo medio (1,3 a 8 μm). Rango en el cual se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.

Infrarrojo lejano o térmico (8 a 14 μm). Es la longitud de onda a la cual se transmite el calor.

Microondas (a partir de 1 mm). Las microondas están situadas entre los rayos infrarrojos (cuya frecuencia es mayor) y las ondas de radio convencionales. Su longitud de onda va aproximadamente desde 1 mm hasta 30 cm. La percepción remota de radar utiliza esta zona del espectro electromagnético.

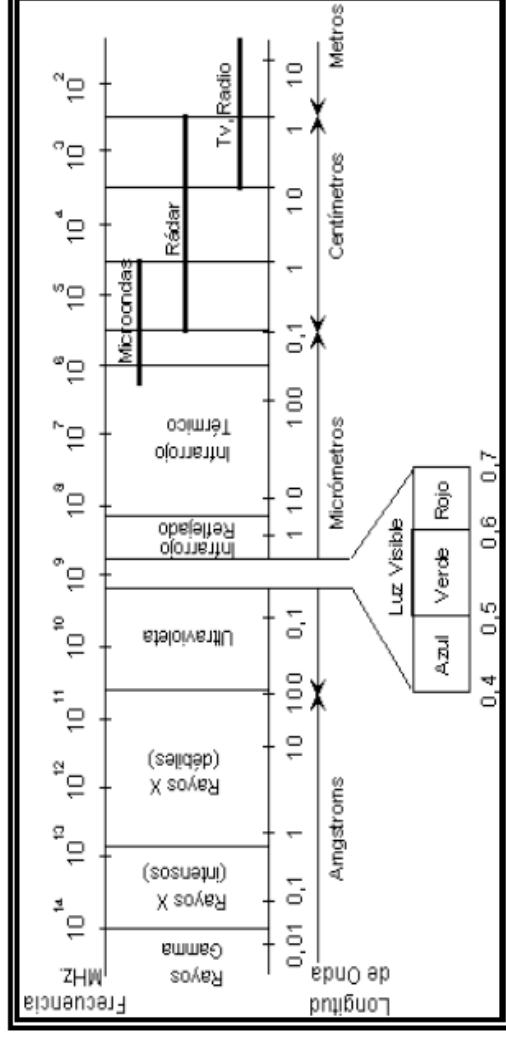


Figura 3. Espectro electromagnético. Fuente: Iurrate, 1998

4.5. Imágenes provenientes de plataformas satelitales y aviones

4.5.1. Imágenes satelitales

Las imágenes satelitales registran el comportamiento de la superficie terrestre a través de diferentes regiones del espectro electromagnético, proporcionando una gran cantidad de datos espacialmente contiguos entre sí. Estas propiedades les confieren la capacidad de detectar, reconocer e identificar coberturas de suelo, así como medir numerosas propiedades biofísicas y bioquímicas asociadas a ellas, ofreciendo ventajas en comparación con métodos *in situ*, que muchas veces requieren de mediciones en terreno que pueden resultar excesivas a amplias escalas, debido a limitantes de accesibilidad, tiempo y recursos (Lillesand *et al.*, 2004; Aronoff, 2005).

A medida que los satélites avanzan en su órbita “barren”, la superficie terrestre captando la energía del sol reflejada por ésta en distintas longitudes de onda. Éstas son agrupadas en distintos rangos o bandas espectrales. Los sensores, al codificar la información para cada banda en un formato posible de interpretar por los expertos, generan matrices digitales de píxeles, que en su conjunto constituyen una imagen raster.

Posteriormente, los raster son transmitidos a una estación receptora en la tierra, donde se verifica que la información esté debidamente decodificada y se ordena de manera tal, que se obtiene la imagen completa.

Todas las imágenes captadas por satélites comercialmente disponibles requieren de ciertas correcciones sistemáticas, las cuales son algoritmos que rectifican la imagen “cruda”, aplicados automáticamente en la estación de recepción. Para ello se utilizan parámetros espaciales contenidos en los archivos descriptores de imagen, principalmente datos de posicionamiento y del satélite. Estos ajustes minimizan las variaciones espaciales presentes en la imagen en su estado bruto tales como, corrección del ángulo de curvatura terrestre, variaciones de velocidad y altura del satélite, desplazamientos orbitales, etc. Luego de

realizada esta operación la imagen esta lista para su distribución comercial en los formatos que requiera el usuario (Chuvieco, 2002; Lillesand *et al.*, 2004).

4.5.1.1. Imágenes Spot

El primer satélite Spot fue lanzado el 21 de febrero de 1986. Se considera que estas imágenes tienen resolución media y alta, de 2.5 m, 5 m, 10 m y 20 m; una banda espectral blanco y negro, tres bandas espectrales visibles: verde, rojo e infrarrojo cercano, y una banda del infrarrojo medio (MIR) para el análisis temático fino. Son imágenes de 60 x 60 km. El satélite Spot tiene una orientación de observación oblicua que permite adquisiciones de imágenes dentro de un corredor de 900 km de ancho. En el Cuadro 5 se muestran las principales bandas y su resolución.

Cuadro 5. Bandas espectrales y resoluciones de los sensores Spot

Sensores	Bandas espectrales	Resolución espacial (m)	Resolución espectral (µm)
	Pancromático	2,5 o 5	0.48 - 0.71
Spot 5	B1: verde	10	0.50 - 0.59
	B2: rojo	10	0.61 - 0.68
	B3: infrarrojo cercano	10	0.78 - 0.89
	B4: infrarrojo medio (MIR)	20	1.58 - 1.75
	Monoespectral	10	0.61 - 0.68
Spot 4	B1: verde	20	0.50 - 0.59
	B2: rojo	20	0.61 - 0.68
	B3: infrarrojo cercano	20	0.78 - 0.89
	B4: infrarrojo medio (MIR)	20	1.58 - 1.75
	Pancromático	10	0.50 - 0.73
Spot 1	B1: verde	20	0.50 - 0.59
Spot 2	B2: rojo	20	0.61 - 0.68
Spot 3	B3: infrarrojo cercano	20	0.78 - 0.89

Fuente: Ficha técnica: Resolución y modos espectrales. www.spotimage.com

Cada satélite tiene sensores con un sistema doble de imágenes Visibles de Alta Resolución (HVR) los cuales pueden operarse individualmente o simultáneamente con la capacidad de obtener en un canal simple una alta resolución espacial de 10 m llamada Modo pancromático (PLA) o de captar tres canales en una resolución de 20 m conocida como multiespectral (MLA) con un ancho de barrido de 60 Km.

En especial, el Spot 5, lanzado en mayo del 2002, posee un instrumento HRS (alta resolución estereoscópica), que permite reconstituir el relieve terrestre. Además dispone de un escáner pancromático, con el que puede escanear dentro de una banda que incluye las tonalidades verde y roja de luz visible.

El Spot cuenta con una función especial que puede programarse para hacer tomas laterales y escanear la misma franja dos veces en dos pases consecutivos. Los dos ángulos visualmente distintos de la misma área proporcionan un efecto estereoscópico gracias al cual se pueden registrar cartográficamente las condiciones de elevación. Como el Spot cuenta con dos canales visibles y uno cercano al infrarrojo, es ideal para la cartografía de la vegetación de pequeñas áreas.

4.5.1.2. *Ikonos*

El satélite Ikonos puesto en órbita el 24 de septiembre de 1999 por la empresa *Space Imaging Inc.* Fue el primer satélite comercial que captó imágenes de alta resolución espacial de 1 m en modo pancromático y 4 m en el multiespectral, con vista fuera del nadir de hasta 50° hacia cualquier dirección del azimut. La resolución en el terreno de cada banda pancromática es 1 m (considerando la posición nominal de 26° para el nadir) y multiespectral: 4 m (considerando posición nominal de 26° para el nadir). Esta equipado con bandas espectrales: Pan: 0.45 - 0.90 μm; azul: 0.45 - 0.52 μm; verde: 0.52 - 0.60 μm; rojo: 0.63 - 0.69 μm; e infrarrojo cercano: 0.76 - 0.90 μm (Geoeeye, 2006).

El satélite Ikonos colecta información cubriendo áreas de 20 000 km² en una misma pasada. El ancho de barrido son 13 km en el Nadir; se desplaza a una altitud de 681 km; inclinación 98.1°; velocidad 7 km/s; órbita descendente; duración de la órbita 98 minutos; órbita sincrónica con el sol, rápida alternancia entre diferentes ángulos de visión; tiempo de revista aproximadamente 1 a 3 días. Con Ikonos se obtienen imágenes de 11 bits (2048 niveles de grises), lo cual genera información muy detallada.

4.5.2. Ortofotos Digitales

Son imágenes derivadas de las fotografías aéreas, tomadas desde aviones, de las que se han eliminado las deformaciones causadas por la óptica de la cámara y por el desplazamiento aparente de los objetos del terreno en el momento de la toma fotográfica. El rango espectral de las ortofotos digitales pancromáticas va de 0.4 a 0.7 μm .

Por estar georeferenciadas, es posible ubicar y determinar las dimensiones de los rasgos visibles en ellas: bosques, corrientes y cuerpos de agua, poblaciones, áreas agrícolas, entre tantos otros. Las ortofotos son de gran utilidad en la evaluación y planeación de obras de infraestructura, en urbanismo y en el estudio de los recursos naturales y los efectos que las actividades humanas tienen sobre ellos.

Están producidas con una resolución en el terreno de 2 metros por píxel. La dimensión de cada una es de 6 minutos 40 segundos de longitud por 7 minutos 30 segundos de latitud. Este formato está diseñado para que al ensamblar seis ortofotos se obtenga la cobertura de una carta topográfica 1:50 000. La proyección cartográfica es la Universal Transversa de Mercator o UTM (INEGI, 2000).

Las imágenes de sensores remotos, como las fotografías aéreas y las imágenes de satélite, son de gran utilidad por mostrar en forma directa y clara los rasgos de la superficie terrestre, por lo que además de ser la fuente básica de la información cartográfica, pueden utilizarse en diversas aplicaciones.

4.6. Resolución de las imágenes

La resolución espacial tiene un papel protagonista en la interpretación de la imagen, porque marca el nivel de detalle que ésta ofrece. En consecuencia se ha demostrado que la resolución espacial está en estrecha relación con la escala de trabajo y con la fiabilidad de la interpretación. Cuanto menor sea el tamaño del píxel menor será la probabilidad que haya confusión entre dos o más cubiertas vecinas. Sin embargo, en el caso de algunas cubiertas,

como el caso de las áreas urbanas, se ha comprobado que un incremento en la resolución espacial puede afectar negativamente a la interpretación si esta se hace digitalmente, dado que se incrementa la heterogeneidad interna de algunas categorías. Respecto al análisis visual, es indiscutible mejorar la resolución espacial para facilitar la interpretación (Hopkins, *et al.* 1988).

Por su parte la resolución espectral evidencia la importancia de contar con información multiespectral; es decir, registrar simultáneamente el comportamiento de los objetos en distintas bandas del espectro. En este sentido, un sensor será más idóneo cuanto mayor sea el número de bandas de que disponga, ya que facilita la caracterización espectral de las distintas cubiertas. Ahora bien, dada la íntima relación entre los diferentes tipos de resolución, se conoce que a mayor resolución espacial disminuye la resolución temporal y es previsible que también se disminuya la espectral. También un aumento en cualquiera de los cuatro tipos de resolución significa un incremento en el volumen de datos a procesar.

Respecto a la estimación de superficies se destaca el uso de imágenes de satélites de media y alta resolución como son: Landsat ETM+, Spot, Ikonos y QuikBird y se considera probable que la resolución de las imágenes sea un factor que interviene sobre la exactitud del cálculo de superficies estimadas, sobre todo en aquellas áreas donde la pendiente puede resultar un factor de error.

4.7. Procesamiento digital

Procesamiento de imágenes es el término usado para denominar las operaciones desarrolladas sobre los datos de una imagen para extraer algún tipo de información útil de ella.

La imagen satelital se procesa por medio de procedimientos computacionales, que incluyen procesos matemáticos y estadísticos. Tienen como finalidad corregir los datos, mejorar las imágenes y extraer información. La corrección de los datos se realiza debido a las alteraciones que sufre la imagen por distintas causas en el momento de la toma, como por ejemplo

movimientos indeseados de satélites, descalibración de los detectores, efectos de la rotación terrestre, etc.

Dependiendo de la aplicación, se emplean técnicas para extraer información útil. Algunos ejemplos son:

- Clasificación multispectral: se aplican técnicas estadísticas para identificar clases de elementos en la imagen tales como cultivos, áreas forestales y en general zonas uniformes.
- Cocientes matemáticos entre bandas: permiten separar suelo y agua y tipos de suelo entre sí.
- Componentes principales: transformación matemática de los planos de imagen, que permite la identificación de cierto tipo de elementos tales como rocas y distintos suelos, entre otras innumerables aplicaciones.
- Análisis de textura: utiliza parámetros estadísticos para evaluar las variadas texturas presentes en el terreno.
- Índices de vegetación: son combinaciones matemáticas entre bandas que indican la presencia y condición de la vegetación verde.
- Generación de modelos digitales de terreno (elevación del terreno): se realiza a partir de pares estereoscópicos, es decir imágenes de una misma zona tomada desde distintos ángulos de mira del sensor.
- Filtrados: permiten destacar o enmascarar características relativas a la variación espacial de los tonos de gris del terreno.

Algunas técnicas básicas actualmente usadas en procesamiento de imágenes son las siguientes:

4.7.1. Correcciones radiométricas

La energía radiada por la superficie terrestre debe recorrer una cierta distancia a través de la atmósfera antes de ser detectada por un sensor, la cual es conocida como longitud de ruta (*path length*). Durante este viaje, el flujo radiante es esparcido y absorbido por los aerosoles atmosféricos, lo que modifica la radiancia que finalmente registran los detectores del sensor desde su objetivo. Específicamente, el proceso de esparcimiento redirige energía que se añade

como radiancia de ruta extraña (*extraneous path radiance*) a la señal medida por el sensor, mientras que el proceso de absorción atenúa la señal de energía que éste recibe (Lillesand *et al.* 2004; Aronoff, 2005).

En la imagen, el esparcimiento *Rayleigh* suele ser el más evidente, y es ocasionado por pequeños aerosoles atmosféricos que redireccionan energía de onda corta que se añade a la radiancia de los píxeles (por ejemplo: efecto de niebla), reduciendo la visualización de detalles (debido a que la imagen pierde contraste y brillo, es decir; disminuye su detalle radiométrico) e induciendo a una estimación incorrecta de algún parámetro vegetacional (debido a que los valores de radiancia se encuentran sobreestimados) (Lillesand *et al.*, 2004; Aronoff, 2005).

La radiancia del objetivo es alterada por la atmósfera, a través de la cual ésta pasa en su camino hacia el sensor. Además, el sensor también modifica la radiancia que lo ha alcanzado. Este efecto puede ser minimizado mediante la aplicación de un modelo de corrección atmosférica sobre las bandas de la imagen. Existe una serie de técnicas para remover el efecto de la atmósfera. Las más complejas modelan matemáticamente las condiciones de la atmósfera en el momento y lugar en que la imagen fue adquirida, lo que a menudo requiere de la toma de información en terreno.

4.7.2. Correcciones geométricas

La corrección geométrica es un proceso de cambio de espacio de referencia, en el cual la imagen original tomada por el sensor está definida en un sistema local donde la localización de cada píxel queda determinada por su situación en filas y columnas: es el espacio imagen. La corrección geométrica ajusta esta imagen a un nuevo espacio de referencia donde cada píxel tiene asignado el valor XY que le corresponde en un sistema de proyección geográfica determinado: es el espacio de proyección (Cuartero y Felicísimo, 2003).

4.7.2.1. Rectificación

Las imágenes pueden ser distribuidas con cierto nivel de corrección geométrica, sin embargo se puede mejorar la integración de cualquier imagen con otros datos espaciales, si bien para ello, es necesario realizar una rectificación geográfica de las mismas.

Al efectuar una corrección geométrica se espera corregir la distorsión propia de la imagen. Las fuentes de tales distorsiones pueden ser variaciones en la altitud y latitud, a la curvatura de la tierra, la no uniformidad del movimiento del scanner y la no linealidad del espejo escaneador que pueden producir dicha distorsión además de la velocidad de la plataforma del propio sensor a factores tales como distorsión panorámica, refracción atmosférica y desplazamiento del relieve (Lillesand *et al.*, 2004)

La corrección de dichas distorsiones geométricas puede ser lograda de varias formas, dos de ellas son:

a) La posición de los píxeles se cambia, pero éstos mantienen sus valores de intensidad. Debido a que este método es de limitada exactitud se usa sólo para correcciones geométricas simples.

b) La imagen es remuestreada, es decir, una imagen digital geoméricamente distorsionada es transformada en una imagen sobre una cuadrícula igualmente espaciada, no distorsionada. La intensidad de los píxeles en la nueva cuadrícula debe ser determinada por interpolación, usando los píxeles vecinos en la imagen de la imagen distorsionada. Esto es, los píxeles deben ser remuestreados para ajustarse a la nueva cuadrícula (Lillesand *et al.*, 2004).

La rectificación es necesaria en los casos en los cuales la cuadrícula de píxeles de la imagen se debe cambiar para ajustarse a un sistema de proyección cartográfica o a una imagen de referencia. Existen varias razones para rectificar datos de imágenes:

- Identificación de muestras de entrenamiento de acuerdo con las coordenadas cartográficas antes de realizar la clasificación.
- Creación de fotomapas exactos, a escala

- Superposición de imágenes con datos vectoriales, tales como ArcInfo
- Comparación de imágenes que están originalmente en escalas diferentes
- Extracción de medidas exactas de áreas y distancias
- Mosaicos de imágenes
- Realización de otros análisis que requieren posiciones geográficas exactas

La corrección geométrica constituye un importante paso en el manejo de datos multispectrales como es el caso de la clasificación digital de imágenes, porque se disminuye la varianza dentro de las clases, lo que se refleja en un mejor funcionamiento de los algoritmos de clasificación (Felicísimo *et al.*, 1994).

Se han propuesto algunos métodos de corrección geométrica, sin embargo sólo en pocos estudios se han evaluado su aplicabilidad para tipos de coberturas específicas, uno de ellos es el estudio realizado por González *et al.* (2001), donde plantea que la corrección topográfica de imágenes Landsat-TM, es necesaria en zonas montañosas como Asturias. Sin embargo los autores concluyen que los resultados de la clasificación no fueron muy buenos, debido a que la corrección se ve limitada por otros factores como la diferencia en años entre la imagen y el mapa de vegetación utilizado para la validación, la baja resolución tanto de la imagen como del Modelo Digital de Elevación (30m) y baja exactitud en la georreferenciación.

Otro trabajo interesante es el de Riaño *et al.* (2003), cuyo objetivo fue probar diferentes métodos de corrección topográfica en imágenes Landsat TM, para diferentes tipos de vegetación. Los resultados mostraron que con el método C-corrección se obtienen mejores datos. La validación de este método se realizó considerando dos criterios: (1) los cambios en las características espectrales de la imagen y (2) la reducción de la desviación estándar de cada tipo de vegetación después de la corrección. Otro aspecto importante a resaltar de este trabajo es la discusión de las dificultades principales que se tienen al aplicar correcciones topográficas. Esta discusión muestra la falta de normas y la aceptación general de los modelos, es decir, a pesar de la variedad de métodos se ha propuesto en la literatura, no existe ningún acuerdo general que defina cual método puede ser universalmente aplicable. Adicional a esto,

la disponibilidad de modelos digitales del terreno hasta hace poco había sido restringida a países desarrollados y por consiguiente evita una aplicación más general de la corrección.

No todos los estudios obtienen buenos resultados en cuanto a la aplicación de algún tipo de corrección en las imágenes. Mitri y Gitas (2004), evaluaron un modelo de clasificación orientado a objetos para el mapeo de áreas quemadas, sin aplicar y aplicando la corrección topográfica a la imagen Landsat TM; ya que la delimitación de áreas de bosques quemados esta limitada a problemas de exactitud en la clasificación de la imagen de satélite, debido a que la respuesta espectral de las áreas quemadas puede ser confundida áreas que se encuentran con efecto de sombreado topográfico. Los resultados obtenidos en este estudio mostraron que la valoración de la exactitud (que usa la matriz de error) indicó que la corrección de efectos topográficos de la imagen antes de aplicar el modelo de clasificación orientado a objetos, sólo aumenta en 1.16% la exactitud de la cartografía base de las áreas quemadas en la zona de estudio. El autor concluye que la corrección topográfica no es esencial antes de la clasificación orientada a objetos en un paisaje quemado.

El error en la rectificación de imágenes se toma como la distancia entre sus coordenadas reales y las estimadas por la regresión de mínimos cuadrados. Para este caso, la calidad de la regresión geométrica puede valorarse comparando, para cada punto de control, las coordenadas estimadas por la regresión con las reales. El promedio de los residuales es lo que conocemos como error cuadrático medio (ECM). Es decir, el ECM se puede usar para evaluar la calidad general del ajuste.

4.7.2.2 Ortorrectificación

La corrección geométrica es un proceso que se realiza rutinariamente en percepción remota pero que ofrece resultados de calidad muy variable en función del diseño del trabajo, por esta razón en la práctica con imágenes de alta resolución existen, dos procedimientos para realizar la corrección geométrica de una imagen: la rectificación y la ortocorrección o también llamada ortorrectificación (Cuartero y Felicísimo, 2003).

Tanto en la rectificación como en la ortorrectificación se utiliza un conjunto de puntos de apoyo que podemos definir como puntos identificables en la imagen de los cuales se conocen también sus coordenadas en el sistema de proyección geográfica. Es decir, se conocen las coordenadas en los dos espacios de referencia.

Ortorrectificación es una forma de rectificación que corrige el desplazamiento debido al terreno y que se puede usar si existe un DEM del área de estudio. Está basada en las ecuaciones de colinealidad, que se pueden derivar usando GCPs (puntos de control terrestre) en 3D. En áreas relativamente planas, la ortorrectificación no es necesaria, pero en áreas montañosas se recomienda la ortorrectificación.

El método de ortorrectificación incluye la elevación de cada píxel en el cálculo de las funciones de transformación. El motivo que justifica realizar este proceso es que la elevación de un punto del terreno provoca un desplazamiento aparente de dicho punto en la imagen. Este desplazamiento depende de parámetros como la localización y orientación de la imagen, de la propia elevación del punto en el terreno y otros propios del sensor; en el caso de las cámaras fotogramétricas, de la posición planimétrica del punto respecto a la intersección del eje óptico de la toma con el terreno.

Sea cual sea el método utilizado para la corrección geométrica, el resultado es una imagen modificada geoméricamente para que se adapte al espacio de proyección. La corrección ha cambiado de lugar los píxeles en función de las diferentes propiedades geométricas de los espacios de referencia. Además, puede ser benéfico rectificar las imágenes debido a que este proceso puede ser muy exacto, con lo cual la clasificación puede ser más exacta si las nuevas coordenadas ayudan a la localización de campos de entrenamiento.

En general la corrección geométrica de una imagen satelital en regiones montañosas brinda una mayor exactitud en la extracción de información.

4.8. Sistemas de información geográficos

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) están ampliamente descritos como una herramienta muy útil que permite almacenar, gestionar, manipular y representar gráficamente datos con componentes espaciales, (Bosque *et al.*, 1994; Chuvieco, 2002). Así, la percepción remota y los SIG, tienen la finalidad de integrar la información resultante con diversas variables, relacionándolas entre sí, y mostrando finalmente la información en formato gráfico.

La integración de los SIG con la percepción remota tiene una gran posibilidad en la agricultura, desde los niveles prediales, regionales hasta nacionales (Prados, 1995). Como ejemplo se puede identificar el área exacta de un suelo cubierto por vegetación en una fecha determinada, mapeo de áreas con salinidad (Metternicht, 2001), identificar cambios en la cubierta vegetal y uso del suelo (Reyes, *et al.*, 2006), estimar la demanda de agua en cultivos de riego (EI-Madd y Taton, 2005), entre otras aplicaciones. Estas aplicaciones son de vital importancia al momento de planificar, definir y gestionar el uso del territorio.

4.8.1. Información geográfica en un SIG

Los formatos estándar para un archivo de diseño son el formato Raster y el formato tipo Vector, en el primero se define una retícula de rectángulos o cuadrados; cada retícula posee información alfanumérica asociada que representa las características de la zona o superficie geográfica que cubre. En el formato raster, se supone el espacio dividido en un conjunto de celdas distribuidas en un cierto número de filas y columnas. El raster es adecuado para variables geográficas que presentan continuidad espacial, permite la utilización de capas superponibles entre sí, cada una de ellas almacenado un valor digital. Por su parte, el formato vectorial representa la información por medio de vectores formados por pares ordenados de coordenadas, este ordenamiento da lugar a las entidades universales con las que se representan los objetos gráficos, así: un punto se representa mediante un par de coordenadas, una línea como mínimo por dos pares de coordenadas, y un polígono como una serie de líneas que se inicia y se cierra en el mismo punto.

4.9. Geometría de observación

Es importante mencionar que la cantidad de energía recibida por el sensor no solo depende de la reflectividad de la cubierta, sino de otros factores externos. Los más importantes son; las condiciones atmosféricas y la geometría de la observación.

En cuanto a las condiciones de la observación, es necesario tener presente que la cantidad de energía que llega al sensor depende del ángulo de energía incidente (i), así como del que forme el haz incidente con la posición del sensor (Z). Una representación grafica del ángulo de incidencia solar y del ángulo cenital solar reobserva en la Figura 4.

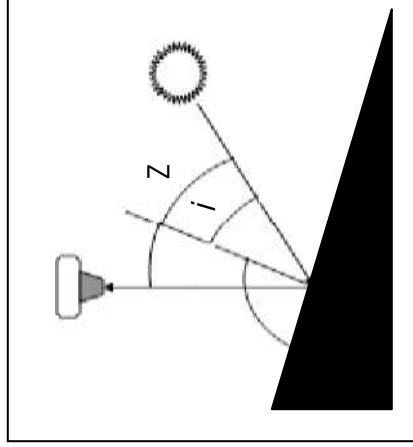


Figura 4. Representación del ángulo de incidencia solar (i) y el ángulo cenital solar (Z), (Meyer, 1993)

La geometría de observación esta estrechamente ligada a la rugosidad que presenta la superficie, en la que se distinguen dos tipos de cubierta (Figura 5); aquellas que reflejan la energía con el mismo ángulo del flujo incidente (especulares), y aquellas que lo reflejan uniformemente en todas las direcciones (lambertianas). La mayor parte de las coberturas terrestres tienen un comportamiento intermedio, en función de sus características de rugosidad y de la longitud de onda (Franklin, 1991).

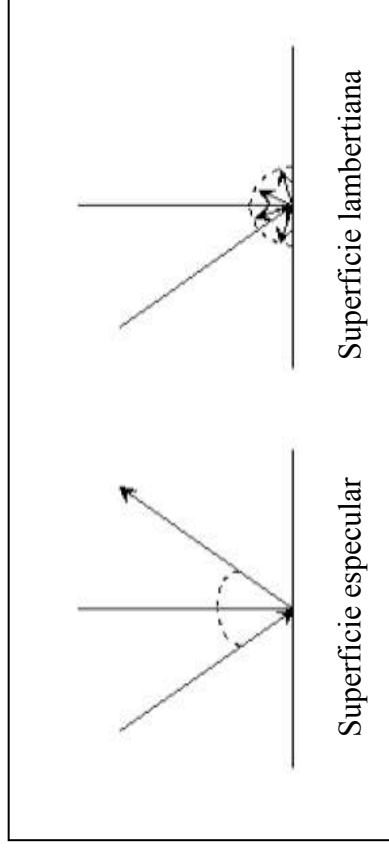


Figura 5. Superficies especulares y lambertianas (Iturrate, 1998).

En cualquier caso, el ángulo de elevación solar y el ángulo de observación juegan un papel muy destacado en la respuesta obtenida por el sensor. En síntesis, si las condiciones de observación y/o iluminación son diferentes, el sensor puede registrar un valor distinto de radiancia espectral para un mismo tipo de cubierta. El comportamiento de una cobertura en el espectro visible esta influido no solo por sus propias características, sino también por una serie de factores externos que modifican su comportamiento espectral teórico; uno de estos factores es la modificación que el relieve introduce en el ángulo de iluminación, siendo el principal factor que limita la energía solar incidente sobre la superficie terrestre (Lira, 1995). La variedad de altitudes, pendientes y orientaciones crean fuertes contrastes locales que afectan la interpretación de las coberturas presentes en una imagen satelital; debido al efecto de sombreado que se genera.

La existencia de zonas de sombras en una imagen de satélite es una variable de gran interés en regiones montañosas, donde el relieve puede ser la variable más determinante para generar este efecto (Wu, *et al.*, 2004).

4.9.1. Ángulo cenital solar y ángulo de elevación solar

El ángulo cenital solar y el ángulo de elevación, son ángulos complementarios que describen la posición del sol con relación al cenit y al plano ortogonal al cenit respectivamente. Cuando se habla de la influencia del ángulo cenital solar se acostumbra a emplear el término

iluminancia, el cual incluye la cantidad de energía radiante recibida por la superficie. Slater (1980) plantea un ejemplo de mediciones de iluminancia atmosférica obtenidas para fotografías aéreas de gran altitud, la cual indica que cuando el ángulo cenital solar aumenta desde 0° (sol sobre la cabeza), la iluminancia atmosférica aumenta debido al gran volumen dispersado, causado por el largo camino de flujo solar a través de la atmósfera. La iluminancia atmosférica alcanza un máximo (cerca de dos veces el valor obtenido para 0°) cuando el ángulo cenital solar está en proximidades de 60° a 70°. Cuando el ángulo cenital es más agudo, la iluminancia atmosférica desciende rápidamente debido a la creciente absorción en el pronunciado camino atmosférico. El ángulo cenital es considerado de gran importancia para corregir el sombreado topográfico.

El ángulo de incidencia en combinación con la longitud de onda, también juega un papel importante en la rugosidad. Para una superficie dada y una longitud de onda, ésta parecerá, mas lisa cuando aumenta el ángulo de incidencia. En terrenos planos el ángulo de incidencia es igual que el de visión. Pero cuando hay relieve, las pendientes mirando al sensor tendrán ángulos de incidencia pequeños con lo que se tiene una fuerte reflexión y tonos claros. Por esto es muy importante la geometría de observación.

4.9.1.1. El ángulo cenital y la corrección del sombreado topográfico

La utilización de imágenes de satélite en zonas de ladera requiere una corrección previa del efecto del sombreado topográfico, es decir, una corrección topográfica que disminuya apropiadamente la radiancia de las zonas más iluminadas y la aumente en las que han recibido menor radiación solar, es decir, convierta de alguna forma una región montañosa en "planicie" (Méndez *et al.*, 2001).

La compensación de esa diferente iluminación solar, que causa una alta variación en la reflectividad para tipos de vegetación similares, se puede realizar a partir de varios métodos. Casi todos parten de un modelo de iluminación de la zona, generado a partir del DEM. La fórmula habitualmente utilizada es:

$$|L = \cos \gamma| = \cos \theta_p \cos \theta_z + \text{sen} \theta_p \text{sen} \theta_z \cos(\Phi_a - \Phi_o)^2$$

donde γ = ángulo de incidencia de los rayos solares,

θ_p = ángulo de la pendiente,

θ_z = ángulo cenital solar;

Φ_a = ángulo acimutal solar y

Φ_o = el ángulo de orientación de la pendiente, (Chuvioco, 2002):

Los datos solares se toman de la cabecera de la imagen para igualar las condiciones del sombreado a las observadas por el sensor. Será preciso considerar los grados del ángulo de elevación solar y del ángulo acimutal solar (Slater, 1980).

La formulación matemática que sirve de base a la corrección topográfica es conocida y tradicionalmente dicha corrección se ha hecho programando estas fórmulas uno mismo o usando programas comerciales avanzados que la incluyan entre sus comandos. Se han aplicado estas mismas fórmulas de forma sencilla por medio de filtros sobre un DEM, tal como el método de máxima probabilidad, incluidos hasta en el software comercial más sencillo como IDRISI (Méndez *et al.*, 2001).

Por otra parte, el software puede presentar desventajas al analizar la imagen sí durante el análisis no se toma en cuenta la pendiente del terreno (Sandoval, 2003).

La superficie terrestre es irregular y la radiación solar sólo en un momento específico incide sobre ella de forma completamente vertical (por ejemplo el cenit solar), por lo que la radiancia medida por un sensor suele estar sujeta a la iluminación diferenciada del relieve que resulta de la interacción de su topografía (i.e. pendiente y exposición) con la posición solar, como la elevación y azimut solar (Eastman, 2006). Dado que las rutas orbitales de los satélites a menudo están diseñadas para cubrir áreas de interés durante las primeras horas de la mañana o alrededor de mediodía, el ángulo de elevación solar al momento de adquisición de una imagen frecuentemente es oblicuo. Por otra parte, la latitud y la época del año juegan un rol determinante en la posición solar presente a la hora del paso de un satélite en un área determinada.

En relieves montañosos la radiancia medida por un sensor desde una cobertura de suelo situada en una ladera de exposición oculta al sol puede ser considerablemente menor que aquella medida desde la misma cobertura de suelo situada en una ladera expuesta al sol, dificultando el cálculo fidedigno de algún parámetro vegetacional, ya que el comportamiento espectral de la vegetación es alterado por la presencia de sombras (Riaño *et al.*, 2003; Eastman, 2006). Este efecto puede ser minimizado mediante la aplicación de un modelo de corrección topográfica sobre las bandas de la imagen (Riaño *et al.*, 2003).

4.10. Modelos digitales de elevación

Los modelos digitales de elevación (DEM) son parte importante de la información que integra un Sistema de Información Geográfica. Por definición un modelo digital de elevaciones es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno y son considerados como la herramienta más poderosa para representar el relieve (Stocks y Heywood, 1994).

De forma general, la unidad básica de información en un DEM es un valor de altitud, definido como una terna compuesta por un valor de altitud, Z , al que acompañan los valores correspondientes de X e Y , expresados en un sistema de proyección geográfica para una georreferenciación espacial (Felicísimo, 1994). Los modelos derivados más sencillos pueden construirse exclusivamente con la información del DEM y reflejan características morfológicas simples (pendiente, orientación, etc.). Entre los modelos más complejo esta el algoritmo de ortorrectificación (García y López, 2003).

4.10.1. Estructura de datos en el DEM

Las estructuras de datos en los DEM, se dividen en dos grupos en función de la representación de los datos: vectorial y raster (Felicísimo, 1994):

1. El modelo de datos vectorial está basado en entidades u objetos geométricos definidos por las coordenadas de sus nodos y vértices. Los atributos del terreno se representan mediante puntos, líneas o polígonos con sus respectivos atributos. Los puntos se definen mediante un par de valores de coordenadas con un atributo de altitud, las líneas mediante un vector de puntos (de altitud única o no) y los polígonos mediante agrupación de líneas.
2. El modelo de datos raster está basado en localizaciones espaciales, a cada una de las cuales se les asigna el valor de las variables para la unidad elemental de superficie. Los datos se interpretan como el valor medio de unidades elementales de superficie no nula que teselan el terreno con una distribución regular, sin solapamiento y con recubrimiento total del área representada. Estas unidades se llaman celdas o teselas y/o píxeles.

Cada modelo de datos puede representarse mediante diferentes estructuras de datos. Las más representativas son dos estructuras vectoriales, basadas en entidades u objetos:

- Isohipsas o contornos
- Red irregular de triángulos (TIN, *triangulated irregular network*) y dos estructuras raster:
 - Matrices regulares (URG, *uniform regular grids*)
 - Matrices jerárquicas (*quadtrees*)

4.10.1.1 Modelo vectorial: TIN (redes de triángulos irregulares)

La estructura de datos TIN se compone de un conjunto de triángulos irregulares adosados, se identifica por su denominación *triangulated irregular network* (Peucker *et al.*, 1978, citado por Felicísimo, 1994). Los triángulos se construyen ajustando un plano a tres puntos cercanos no colineales, y se adosan sobre el terreno formando un mosaico que se adapta a la superficie con diferente grado de detalle, en función de la complejidad del relieve. Este modelo hace una representación plana del terreno. El método de triangulación más utilizado es el de *Delauray* (Felicísimo, 1994)

4.10.1.2. Modelo raster: matrices regulares

La estructura matricial propone el análisis topográfico basado en matrices regulares. Esta estructura resulta de superponer una retícula sobre el terreno y extraer la altitud media de cada celda. La retícula adopta la forma de una red regular de malla cuadrada. En esta estructura, la localización de cada dato está determinada de forma implícita por su situación en la matriz, una vez definidos el origen y el valor del intervalo entre filas y columnas (Felícisimo, 1994).

4.10.2. Fuentes de error en los DEM

Existen dos fuentes de error en los DEM; primarias y secundarias. Como fuente primaria, el error en los DEM puede provenir desde el origen, es decir; los documentos digitales existentes son creados a partir de mapas impresos de naturaleza muy heterogénea. Tales mapas pudieron haber sido generados con objetivos y expectativas distintas que no coinciden con las actuales. Como error de fuentes secundarias se consideran al error posicional, derivado de la digitalización de los mapas (Holmes *et al.*, 2000).

Los errores en los DEM pueden ser clasificados en dos categorías (Burrough *et al.*, 1998):

- Errores posicionales que refieren una deficiente localización geográfica de cota o la trayectoria de las curvas de nivel.
- Errores atributivos los cuales suponen una asignación imprecisa de la altitud asociada a la cota o a la curva e implican a las coordenadas en el eje Z.

Los errores posicionales afectan a los modelos vectoriales y los errores atributivos afectan tanto a modelos raster como vectoriales. Sea cual sea el modelo a utilizar es recomendable efectuar un análisis de la calidad del DEM ya que esto ayudará a evitar la propagación del error. De lo contrario, las máquinas actuales hacen copias exactas de los originales, copian fielmente los errores además de introducir algunos nuevos (Felícisimo, 1994; Heuvelink, 1998).

El problema se incrementa con el tiempo, cuando los datos originales se utilizan para diferentes propósitos, cuyos resultados son, asimismo, tomados como ciertos y reutilizados en otros procesos. Esto puede continuar hasta olvidarse el origen de la cadena y perdiendo, por tanto, toda referencia con la realidad (Felicísimo, 1994). Para evitar esta problemática es necesario incorporar el metadato (información sobre información) en los productos SIG.

4.10.3. Utilidad de los Modelos digitales

Para realizar la corrección topográfica y la ortorectificación de una imagen es necesario contar con un DEM. En algunos casos es otra imagen (cuyos valores digitales son alturas) obtenida del mapa topográfico de escala conocida. Los DEM también se usan junto con modelos atmosféricos para corregir las diferencias de iluminación y reflectancia sobre el dosel de vegetación en terrenos montañosos, lo cual permite eliminar las variaciones topográficas y obtener firmas espectrales limpias, incrementando la capacidad de realizar una buena clasificación de las imágenes (Shepherd y Dymond, 2003).

En terrenos de montaña donde las distorsiones de la imagen están asociadas no sólo al sensor y geometría de la imagen sino también a la topografía del terreno, se requiere una corrección de los desplazamientos debidos al relieve, y para este proceso es necesario contar con un DEM de buena calidad del cual se toman los valores de altura, requeridos durante este procedimiento (Itten y Meyer, 1993). Los modelos de elevación digital, constituyen una solución parcial al problema del cálculo de pendientes.

4.11. Interpretación de imágenes

Las técnicas existentes de procesamiento digital de imágenes permiten analizar una escena en diferentes regiones del espectro electromagnético y posibilitan la integración de varios tipos de datos, debidamente registrados. Este procesamiento digital de imágenes puede ser dividido en tres etapas independientes: preprocesamiento, realce y clasificación (Malacara, 1997).

Después de realizar las correcciones geométricas a la imagen, ésta debe ser interpretada, para extraer el significado real de los datos digitales, por ejemplo, el significado ambiental de las radiancias obtenidas por el sensor. De esto puede derivarse una clasificación de la imagen, es decir, una imagen puede ser dividida en diferentes clases de tal manera que los píxeles con propiedades espectrales similares queden agrupados en la misma clase. La separación de estas clases, es llevada a cabo mediante métodos estadísticos o geométricos.

4.11.1. Clasificación digital

La clasificación de imágenes es el proceso mediante el cual los píxeles de una imagen son agrupados dentro de clases con atributos espectrales similares, y donde cada clase espectral es asignada a un tipo de información. Como resultado de la clasificación de una imagen, es posible generar cartografía temática, así como un inventario estadístico del número de píxeles, y por tanto de la superficie, asignados a cada categoría. (Lillesand *et al.*, 2004).

La clasificación se realiza a partir de imágenes multiespectrales, consistentes en un conjunto de imágenes digitales simples que, una vez superpuestas por poseer propiedades geométricas y de georreferenciación, idénticas, forman un conjunto de información única. Este conjunto de información es equivalente a una matriz tridimensional, donde las filas y las columnas representan la localización geográfica, mientras que la tercera dimensión representa las diferentes bandas o propiedades medidas. Cada celda de la matriz (i, j, k) posee el valor de la variable k en la localización geográfica definida por la fila i y la columna j .

El proceso de clasificación comprende las siguientes fases:

- i) Definición digital de categorías, comúnmente denominada fase de entrenamiento, el objetivo se logra seleccionando una muestra de píxeles de la imagen, que represente a la categoría de interés.
- ii) Agrupación de los píxeles de la imagen en una de esas categorías, llamada también fase de asignación. En esta fase cada píxel es adscrito a una clase previamente

seleccionada. Esta asignación se realiza en función de los niveles digitales de cada píxel, para cada banda que interviene en el proceso.

iii) Y obtención de resultados.

La clasificación digital puede dividirse en dos métodos: supervisada y no supervisada (Lillesand *et al.*, 2004)

4.11.1.1. Clasificación supervisada

La clasificación supervisada supone un conocimiento previo de las clases por parte del operador, que debe delimitar grupos de píxeles representativos para cada una de ellas, a partir de los cuales se determinan los valores que definen la firma espectral. En la clasificación supervisada se emplean clasificadores basados en algoritmos realizados por un programa, previa información introducida por el operario. Esto se realiza mediante sitios de entrenamiento, los cuales son zonas delimitadas en la imagen, en donde se tiene la certeza de lo que realmente existe in-situ y en el momento de la adquisición. Posteriormente el sistema computacional es capaz de relacionar esta información y reconocerla en la imagen completa. En la rutina se realiza una clasificación en base a modelos estadísticos agrupando la información en distintas clases.

Los criterios más comunes para establecer estas fronteras estadísticas entre clases son:

- i) Mínima distancia, donde al píxel se le asigna el valor de la clase más cercana; esto es, en aquella que minimice la distancia entre este píxel y el centroide de clase. Debe tenerse claridad en que no se trata de distancias geográficas y sí de distancias espectrales, consecuencia de comparar los niveles digitales de cada píxel.
- ii) Paralelepípedos, que agrupan las clases en los rangos máximos y mínimos de acuerdo al tipo de clasificación; se fija un área de dominio para cada categoría, teniendo en cuenta sus valores de centralidad y dispersión. Un píxel es asignado a dicha clase si sus niveles digitales están dentro de esa área de dominio, en las bandas consideradas.

iii) Máxima probabilidad, en donde el píxel se asigna a la clase con que posee mayor probabilidad de pertenencia. Este método considera que los niveles digitales en el seno de cada clase se ajustan a una distribución normal. Esta particularidad permite describir esa categoría por una función de probabilidad, a partir de su vector y matriz de varianza-covarianza (Lillesand *et al.*, 2004). El cálculo se realiza para todas las categorías que intervienen en la clasificación, asignando el píxel a aquélla que maximice la función de probabilidad.

A pesar de ser el clasificador de máxima probabilidad el más complejo y el que demanda mayor volumen de cálculo, es el más empleado por su robustez y por ajustarse con más rigor a la disposición original de los datos.

4.11.1.2. *Clasificación no supervisada*

La clasificación no supervisada (*clustering*) no requiere intervención del operador ya que divide los píxeles en "grupos naturales", segmentando el espacio k-dimensional (donde cada eje de coordenadas representa una variable) con criterios estadísticos. La clasificación no supervisada no requiere un previo conocimiento de las clases existentes en la zona (Felcísimo, 1994).

Uno de los métodos más habituales en la clasificación no supervisada es el algoritmo denominado */sodata* propuesto por Duda y Hart (1973). Este algoritmo realiza un proceso iterativo para dividir el espacio k-dimensional en un número predefinido de clases, n . En un primer paso, los n vectores de medias de las clases completan con valores arbitrarios y los píxeles se clasifican en función de su vector de valores, asignándolos a la clase de signatura más próxima. Posteriormente, los vectores de medias son recalculados a partir de nuevos grupos y los píxeles son reclasificados. El proceso se repite hasta que no se detecta un cambio significativo en la asignación de píxeles entre un paso y el anterior (Felcísimo, 1994).

4.12. Software procesadores de imágenes de satélite

4.12.1. PCI Geomatics

Este software comercial usa el modelo desarrollado por Thierry Toutin del *Canadian Center for Remote Sensing (CCRS)*, el cual, fue probado usando otros dos métodos adicionales que son el método polinomial y racional polinomial. El primero sólo corrige distorsiones planimétricas básicas y el segundo involucra la altura de los puntos de control para rectificar la imagen. Estos no requieren información del sensor ni del satélite. En cambio, el método que involucra el modelo a utilizarse, calcula los parámetros orbitales del satélite (RCP) a partir de puntos de control terrestre e información del sensor.

El modelo CCRS se basa en los principios relacionados con la orbitografía, fotogrametría, cartografía y geodesia. Los modelos rigurosos reflejan la realidad física completa de la geometría de visión y corrigen las distorsiones debidas a la plataforma, sensores, la Tierra, y, a veces, la deformación debida a la proyección cartográfica.

4.12.2. Software Erdas Imagine

El software Erdas Imagine, emplea un modelo para la ortorrectificación de imágenes que considera los puntos de control terrestre (RCP, siglas en ingles) cuando se desea ortorrectificar imágenes Ikonos, sin embargo la Ortorrectificación de imágenes Spot no requiere de tales RCPs. Este modelo fue desarrollado por *Space Imagine*, reflejando la realidad física desde el punto de vista geométrico y corrige las deformaciones producidas por la plataforma, el sensor, la Tierra y también corrige algunas deformaciones introducidas por la proyección cartográfica.

4.12.3. Software Arc GIS

Este software no es en si para procesar imágenes, más bien proporciona un marco para hacer geoprosesamientos para análisis geográfico y manejo de datos. Este incluye una serie de

herramientas para hacer la superposición de características geográficas, la selección y el análisis de características, procesamientos topológicos, y la conversión de datos que forman nuevos conjuntos de datos. Este software se emplea básicamente para visualizar imágenes, para crear polígonos mediante digitalización sobre pantalla, para estimar superficies tanto de vectores como de imágenes en formato raster, para estimar distancias, para crear modelos de datos y entre otras para generar productos de salida como lo es la cartografía de mapas temáticos.

4.13. Sistemas de geoposicionamiento global (GPS)

GPS significa Sistema de Posicionamiento Global. Es un concepto de ubicación geográfica que permite determinar en cualquier momento y bajo cualquier condición atmosférica una posición precisa en cualquier punto de la superficie terrestre. Este sistema se compone de un sistema basado en una constelación de 24 satélites artificiales en seis planos orbitales a 20 000 km de altitud. A través de una triangulación de ellos, envían la información a un receptor terrestre. La exactitud de los datos dependerá del tipo de receptor que se utilice y la actividad que se realice.

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) está basado en la transmisión de información desde una constelación de satélites hasta los receptores GPS que están sobre la superficie terrestre. La red del sistema GPS está dispuesta de tal forma que un receptor sobre la superficie terrestre puede captar un mínimo de 4 satélites en cualquier momento del día y en cualquier parte de la superficie terrestre. Cada satélite describe órbitas circulares a 20.180 km de altura, con un período aproximado de 12 horas. Como la altura de los satélites equivale a tres veces el radio de la tierra, cada receptor está en capacidad de recibir la señal, por un período aproximado de 6 a 7 horas. El uso de dos receptores grabando simultáneamente y captando la señal de los satélites es una manera efectiva de disminuir el error y aumentar la exactitud del posicionamiento.

Existen diferentes métodos para obtener una posición empleando este sistema.

- a) *Navegación autónoma*, empleando un receptor simple. La exactitud de la posición es mejor que 100 m para usuarios civiles y alrededor de 20 m para usuarios militares.
- b) *Posicionamiento Diferencial Corregido*, conocido como DGPS, éste proporciona precisiones del orden de 0,5 a 5 m. Se utiliza principalmente para la adquisición de datos para los SIG.
- c) *Posicionamiento Diferencial de Fase*, en que la precisión aumenta a 0.5 a 20 mm. Utilizado principalmente para trabajos de topografía.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 El área de estudio

En el estado de México, se cultivan alrededor de 769 767 ha, de las cuales el 80.9% corresponden a cultivos de temporal, (SIAP, 2007). El área de estudio se localiza en el municipio de Tenango del Valle en el Estado de México; este municipio pertenece al Distrito de Desarrollo Rural (DDR) Toluca.

5.1.1. Localización geográfica

Tenango del Valle se caracteriza por los terrenos de ladera que posee; se localiza a 23 kilómetros al sureste de la capital estatal, es parte del DDR Toluca. Sus coordenadas geográficas son $99^{\circ} 31' 37''$ y $99^{\circ} 45'$ mínima y máxima de longitud oeste; $18^{\circ} 39' 7''$ y $19^{\circ} 8' 29''$ de mínima y máxima de latitud norte (Figura 6). Su altura promedio sobre el nivel del mar es de 2600 metros. Limita al norte con los municipios de Calimaya, Santa María Rayón y Texcalyacac, al sur con Tenancingo y Villa Guerrero, al este con Joquicingo y al oeste con Toluca. El municipio tiene una extensión de 208.88 km^2 . La orografía de Tenango del Valle se caracteriza por elevaciones que se extienden a lo largo y ancho del territorio (Salamanca, 2005).

5.1.2. Clima

El clima se clasifica como templado subhúmedo, con lluvias en verano. Se presentan heladas en los meses de octubre a enero. Vientos fuertes en febrero y marzo. La temperatura promedio anual es de 13.5°C , la máxima es de 29.5°C y la mínima de 5°C .

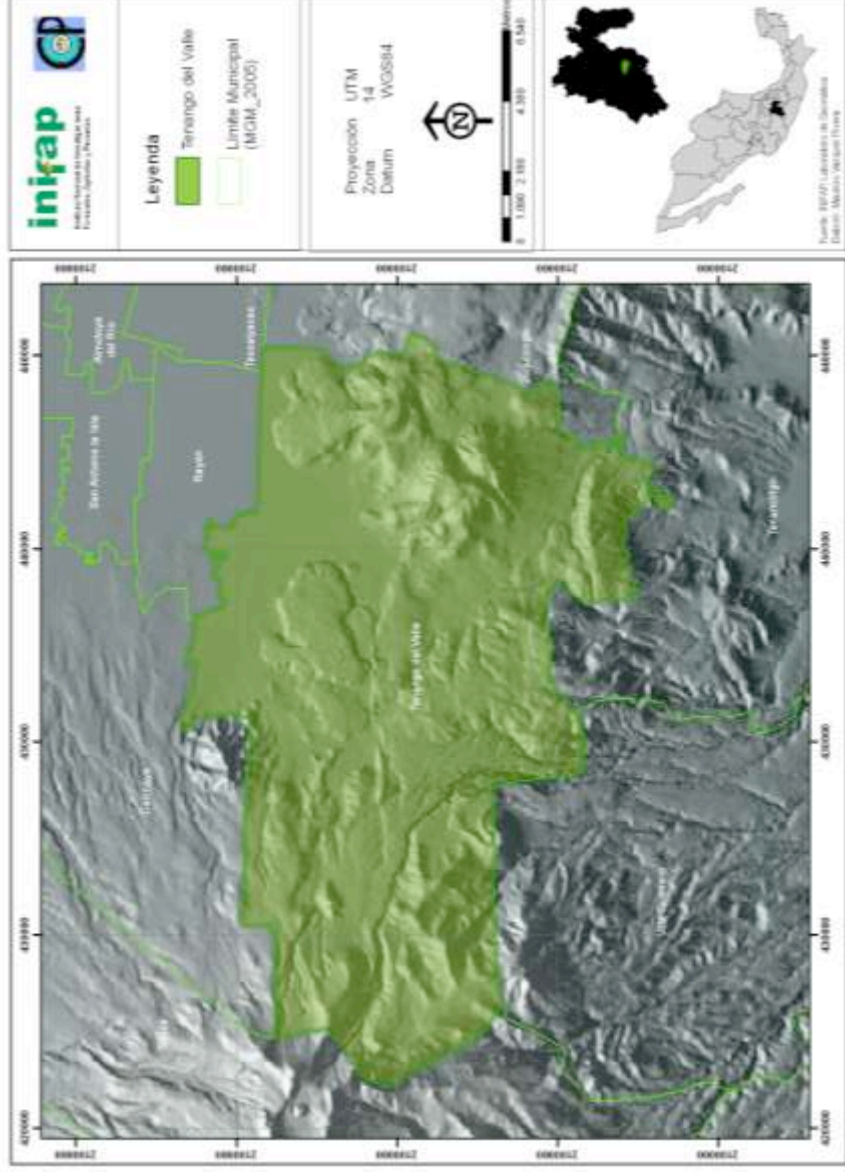


Figura 6. Localización geográfica de la zona de estudio.

5.1.3. Agricultura

Las actividades agropecuarias son muy importantes en este municipio, ya que el 39% de la población se dedica a estas actividades y el 51% del territorio municipal, está destinado a las labores del campo, lo que representa una superficie de 1957.1 hectáreas (Salamanca, 2005). La agricultura sigue siendo la principal actividad económica del municipio. El maíz es el principal producto. Las hortalizas y leguminosas le siguen por volumen de producción.

5.2. Adquisición y organización de imágenes de satélite.

La metodología utilizada se fundamenta en la utilización de imágenes de los satélites Spot e Ikonos, así como de ortofotos digitales, las cuales fueron seleccionadas para cubrir el área de estudio. Además de las imágenes digitales, se utilizó el Modelo de Elevación Digital para el Estado de México y el Marco Geostatístico Municipal del INEGI, 2005 (MGM - 2005).

La información digital se organizó de la siguiente manera:

- Cartografía base
 - a) Formato Raster
 - Imágenes de satélite
 - DEM
 - Subescenas
 - b) Formato Vector
 - Parcelas digitalizadas (Polígonos generados)
 - Límites municipales (marco geostatístico)
 - Curvas de nivel

5.2.1. Imágenes Spot.

Se trabajó con tres imágenes de satélite; dos de ellas Spot 5, una pancromática y una multispectral de resolución espacial 2.5x2.5 metros y otra de 10x10 metros por lado respectivamente.

5.2.2. Imágenes Ikonos

Se utilizó una imagen Ikonos 2 con resolución espacial de 1x1 metro de lado. La fusión de bandas permite obtener imágenes de mayor resolución, en el caso de Ikonos se empleó una imagen con esta particularidad, por ello se menciona un tamaño de píxel de 1 m. La imagen Ikonos con la que se trabajó combina digitalmente las imágenes pancromáticas de 1 metro de

resolución con las imágenes multispectrales de 4 metros, resultando una fusión que cuenta con una resolución espacial de 1 metro y con la alta resolución espectral de las bandas del visible e infrarrojo.

5.2.3. Ortofotos digitales

También se trabajo con dos ortofotos digitales de la zona cuya resolución fue de 2X2 metros.

Las fechas de toma de las imágenes y principales características se presentan en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Características de las imágenes y ortofotos utilizadas

Imagen	Bandas espectrales	Resolución Espacial (m)	Resolución espectral (μm)	Proyección	Fecha
IKONOS-2	Panromática	1	0.45 - 0.90	UTM	2006-05-08
IKONOS-2	B1: azul	4	0.45 - 0.52	UTM	2006-05-08
	B2: verde	4	0.52 - 0.60		
	B3: rojo	4	0.63 - 0.69		
	B4: infrarrojo cercano	4	0.76 - 0.90		
Ortofotos digitales	Panromática	2	0.40 - 0.70	UTM	2000-03-05
Spot 5	Panromática	2.5	0.48- 0.71	UTM	2006-04-17
Spot 5 multispectral	B1: verde	10	0.50 - 0.59	UTM	2002-10-16
	B2: rojo	10	0.61 - 0.68		
	B3: infrarrojo cercano	10	0.78 - 0.89		
	B4: infrarrojo medio (MIR)	20	1.58 - 1.75		

Todas las imágenes fueron referidas al sistema de proyección UTM (Universal Transversa de Mercator) y Datum WGS84; Zona 14N.

Un criterio importante para la selección imágenes, fue el menor % de nubosidad, para disminuir confusiones de sombreado topográfico con el sombreado causado por la presencia de nubes.

5.2.4. Selección del material geográfico en formato digital

En esta etapa se colectó toda la información geográfica, tanto en formato impreso como digital del área de estudio. Además de las imágenes satélite descritas, se dispuso de cartografía digital 1:50.000 y un modelo de elevación digital del Municipio de Tenango del Valle, con una resolución de 1.2 m generado a partir de curvas de nivel con equidistancias de 10 metros.

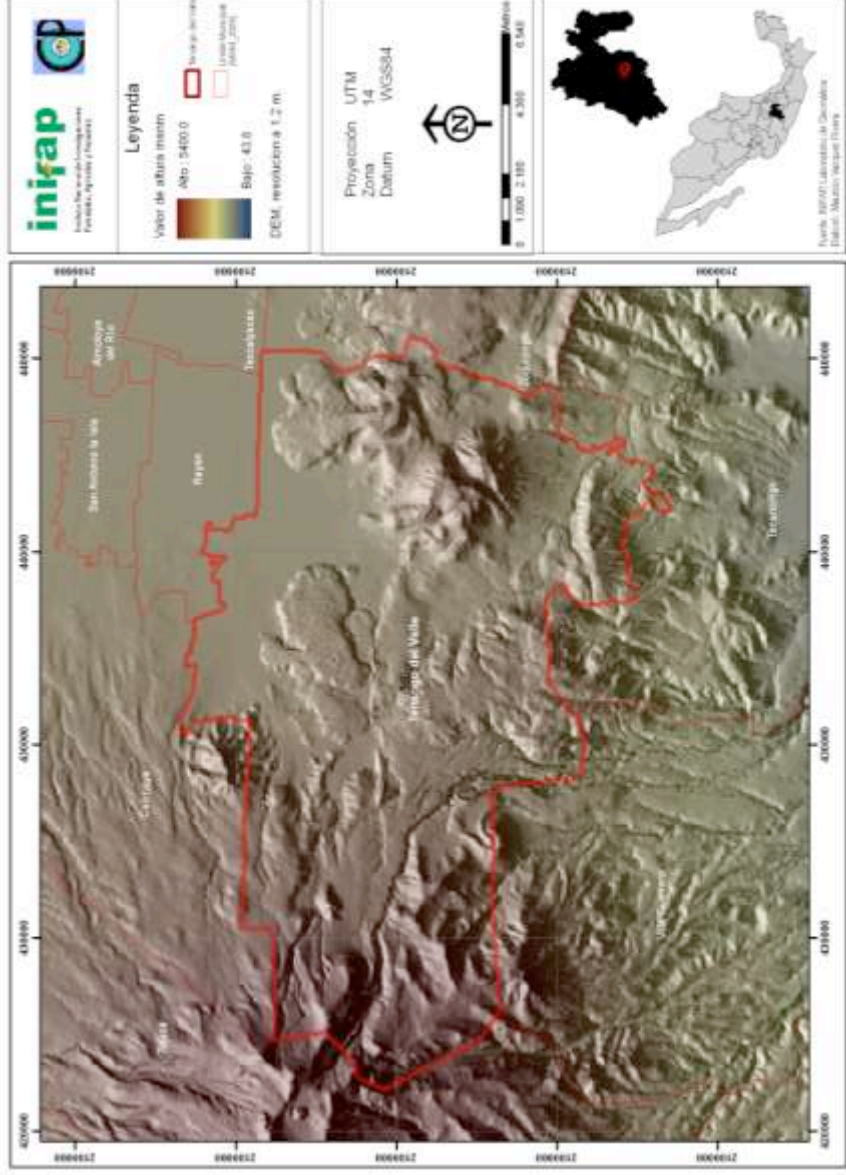


Figura 7. Modelo de elevación digital del Municipio de Tenango del Valle.

5.3. Descripción y diagrama metodológico generado.

El trabajo se dividió en dos etapas, la primera se refiere al trabajo de campo, en la cual a partir de levantamiento topográfico se delimitó la zona de estudio y se georreferenciaron con GPS las parcelas. En esta misma etapa las parcelas se clasificaron como simples ó complejas. La segunda etapa fue trabajo de laboratorio, el cual comienza con la adquisición de las imágenes.

En esta etapa se crearon subescenas de las imágenes que se corrigieron geoméricamente. Una vez corregidas se realizaron cortes de las parcelas seleccionadas en campo, los cuales se sometieron a un proceso de clasificación supervisada y a partir de esto se estimó la superficie de cada parcela. En la Figura 8 se describen las etapas realizadas de manera esquemática.

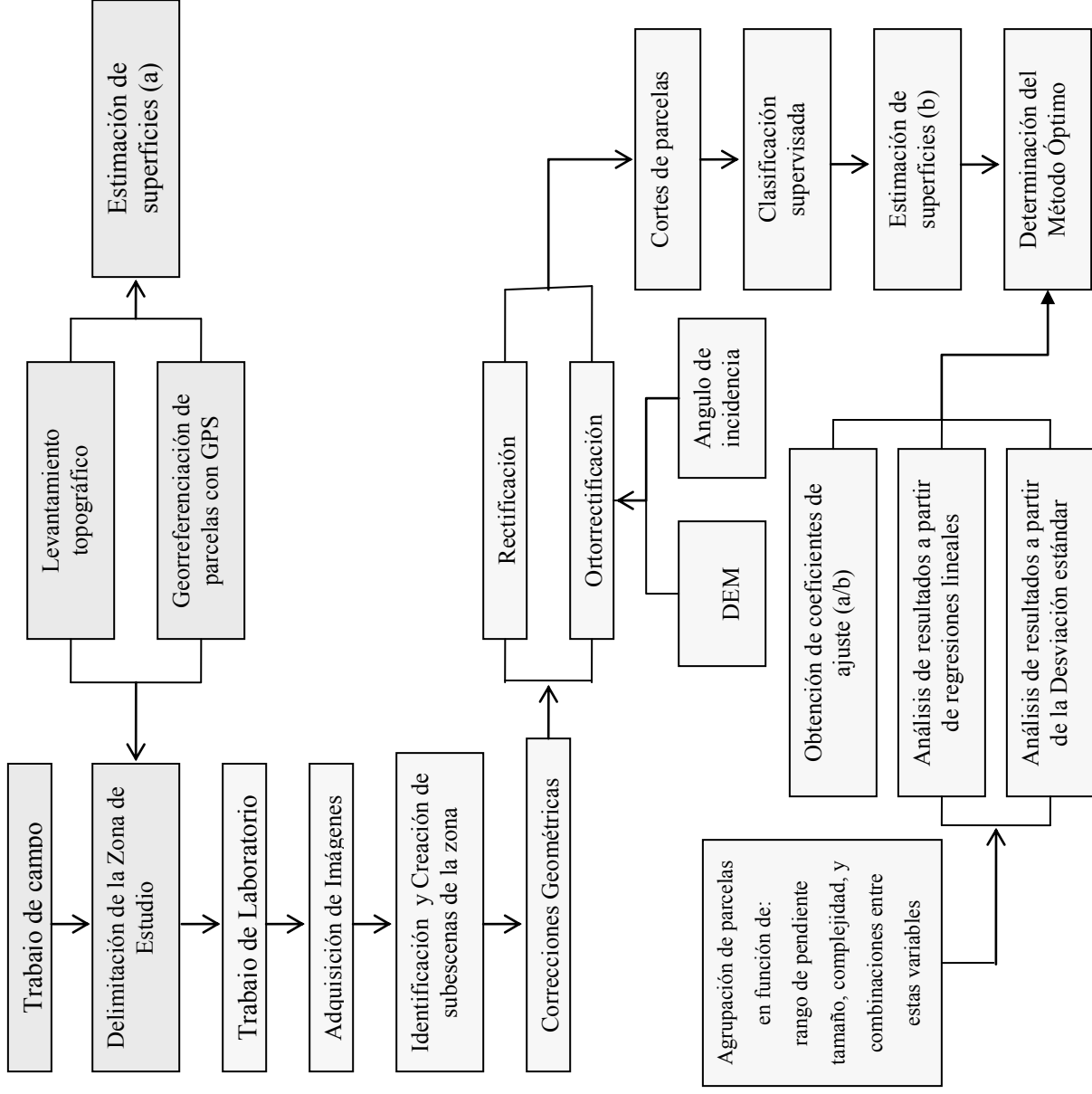


Figura 8. Esquema metodológico de trabajo.

5.3.1. Delimitación de sitios piloto.

Previo a las operaciones de procesamiento de la imagen se procedió realizar recortes del área de interés a partir de las imágenes originales. Se obtuvieron subescenas con una superficie aproximada de 24.5 Km², como las que se muestran en las Figuras 9; 10; 11 y 12.

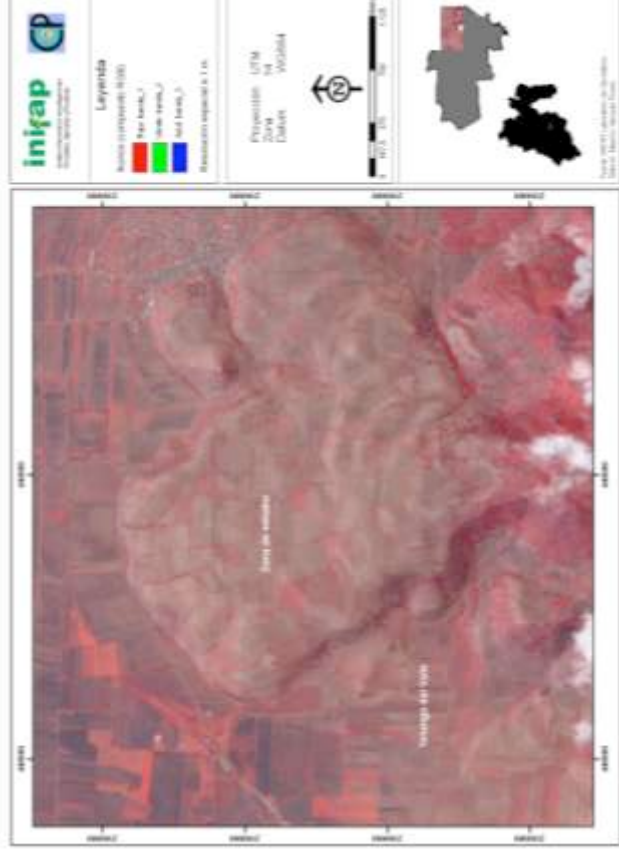


Figura 9. Subescena de Ikonos de la zona de estudio, compuesto en falso color.

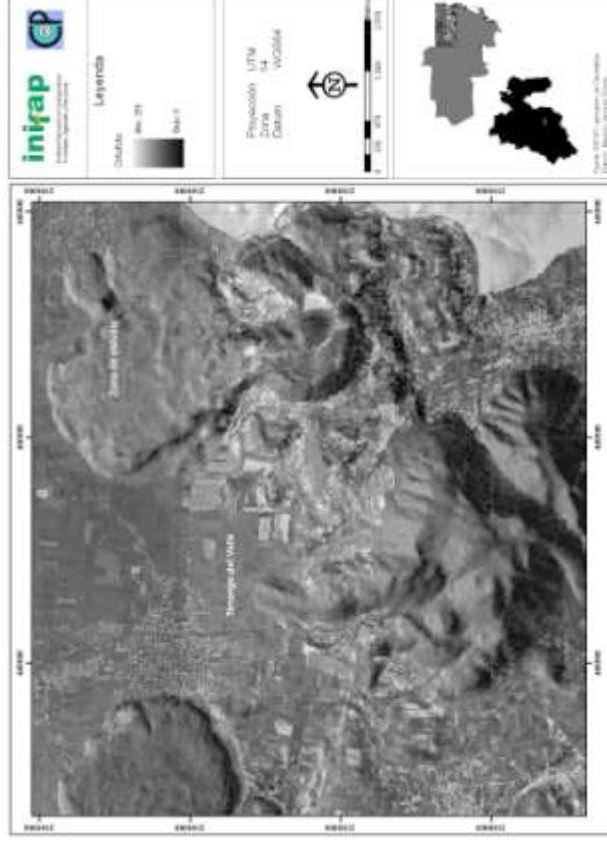


Figura 10. Subescena de ortofotos de la zona de estudio

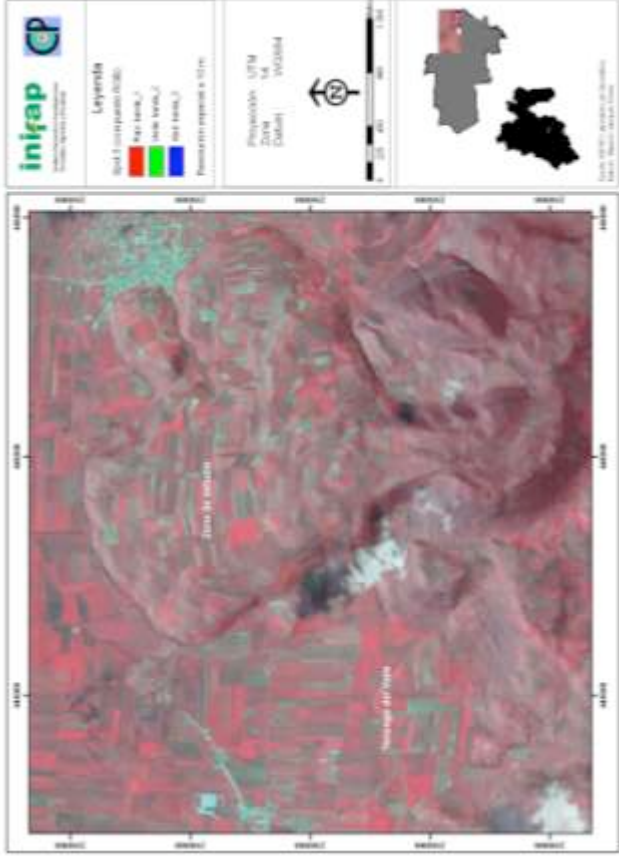


Figura 11. Subescena de Spot 5 multiespectral de la zona de estudio, compuesto en falso color.

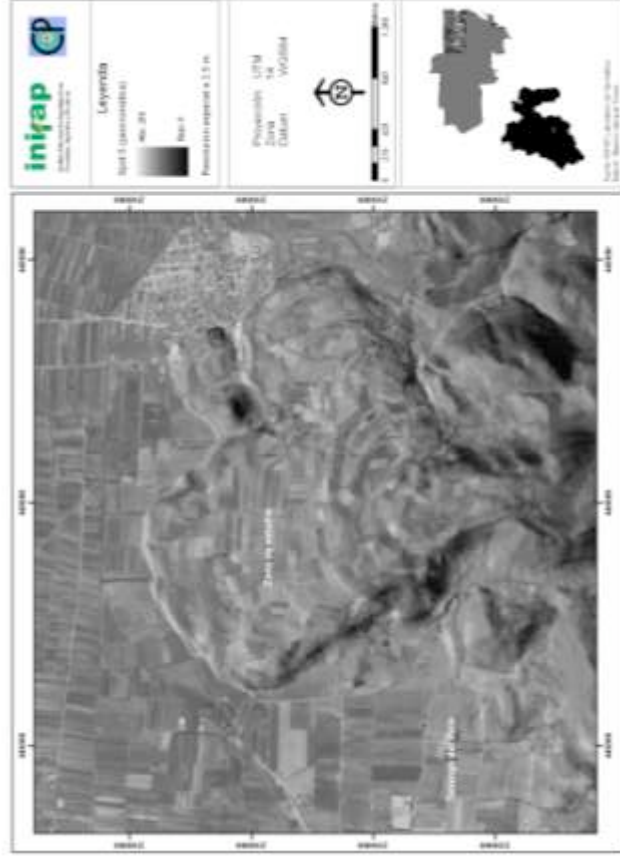


Figura 12. Subescena de Spot 5 pancromática de la zona de estudio

5.3.1.1. Digitalización de parcelas.

En el área de estudio fueron seleccionadas 29 parcelas con pendientes simples y complejas, para ello se vectorizaron y crearon los polígonos directamente sobre la imagen (Figura 13). El proceso de digitalización se realizó con el software Arc Gis® con los siguientes pasos:

1. Identificación de la zona en la imagen, a partir de los puntos generados con GPS en campo, se crea una máscara de puntos que se superpone a la imagen.
2. Digitalización, se digitalizan las parcelas identificables en la imagen.
3. Cálculo del centroide y asignación de un identificador correspondiente a cada una de las parcelas digitalizadas.

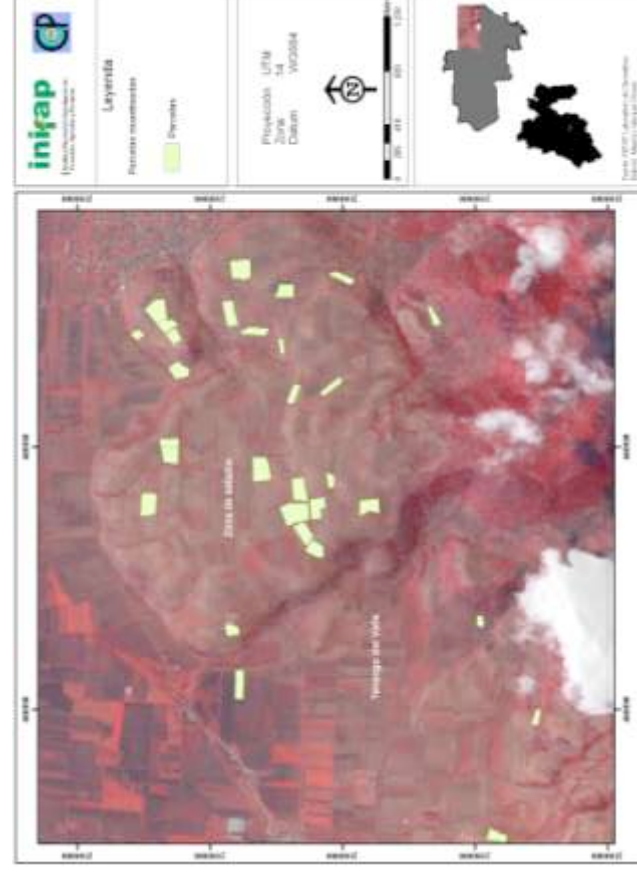


Figura 13. Parcelas digitalizadas sobre una imagen Ikonos en falso color.

El tamaño de cada área de muestreo estuvo en función del área mínima cartografiable (AMC), misma que a su vez esta en función de la resolución de la imagen. Al respecto, varios autores recomiendan que la AMC no sea inferior a 4 mm^2 medidos a escala del mapa. De ahí que la escala de trabajo esté directamente relacionada con el tipo de sensor más apto para abordar el mismo. Las escalas más idóneas para las imágenes utilizadas son:

a) Spot : 1: 50000

b) Ikonos pancromática: 1:10000

5.3.2 Trabajo de campo

El trabajo de campo se realiza para validar la superficie calculada en el laboratorio a partir de las parcelas piloto delimitadas en las imágenes con la respectiva corrección geométrica (rectificación u ortorrectificación). En este sentido se realizaron mediciones directas sobre el terreno para establecer relaciones cuantitativas con los datos de la imagen.

El primer paso fue la selección de las áreas de entrenamiento, las cuales hacen referencia a la selección de una muestra de píxeles de la imagen, que representan adecuadamente la categoría de interés (terrenos de cultivo). Para este caso las áreas de entrenamiento deben cumplir con la siguiente condición: Áreas dedicadas a la agricultura con diferente grado de pendiente.

5.3.2.1. Identificación de terrenos en laderas

La identificación de las parcelas piloto a partir de imágenes satelitales y recorridos de campo ayudan a obtener la variabilidad numérica de la categoría de interés; por lo tanto también fue importante seleccionar parcelas donde no se presente el efecto de la pendiente (terrenos planos), para obtener información que permitiera evaluar los resultados de las correcciones geométricas.

Durante los recorridos de campo se seleccionaron parcelas distribuidas en el área de estudio, con los intervalos de pendiente que se describen en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Intervalos de pendiente de las parcelas piloto

ID de la parcela	Intervalos de pendiente (%)
4,8,14,15	0-9
3,5,12,13,23,28	9.1-19
9,20,21,22,29,30	19.1-29
2,11,18,19	29.1-39
1,6,7,10,16,17,25,26,27	> 39.1

Se tomaron las coordenadas de los vértices de los polígonos de cada parcela piloto; la condición es que fueran parcelas posibles de visualizar en las imágenes. Fue importante contar con un número suficiente de parcelas que correspondan a parcelas localizadas en pendientes simples, así como parcelas que representen a pendientes complejas, lo cual aseguro contar con píxeles ubicados en diferente pendiente.

Para la georreferenciación de las parcelas, se uso un equipo geoposicionador GPS *etrex*® y un clisímetro para estimar directamente la pendiente de las parcelas (Figuras 14a y 14b). Los trabajos de campo en las parcelas seleccionadas se realizaron de marzo a junio de 2007.

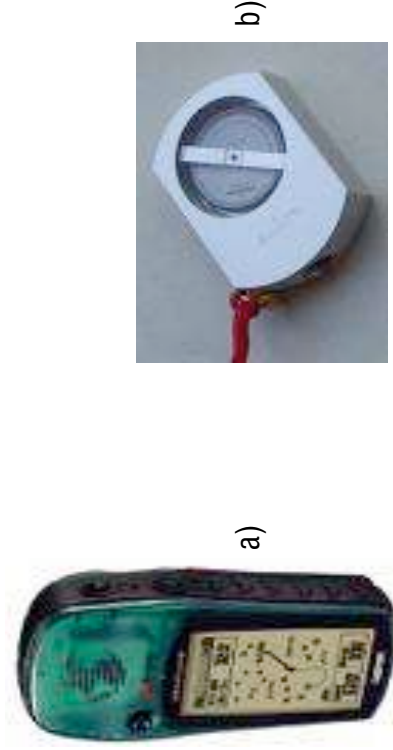


Figura 14. Equipo de trabajo para georreferenciar las parcelas y estimar la pendiente del terreno en las parcelas piloto.

Para la medición de superficies de las parcelas piloto, se realizó un levantamiento topográfico, en el cual se consideró tanto la altimetría (para conocer el comportamiento y forma de las pendientes) como la planimetría (para conocer los límites y la superficie de las parcelas). El

levantamiento topográfico se realizó con un teodolito ROSSBACH para calcular la planimetría.

El área de las parcelas piloto se calculó en función de las coordenadas polares, haciendo estación en un punto interior de cada polígono, donde el área se calcula por triangulación (Figura 15).

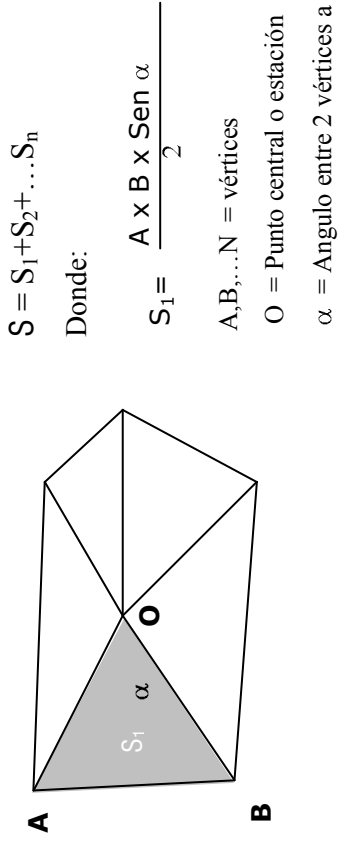


Figura 15. Estimación de superficie a partir de levantamiento topográfico.

En dichos levantamientos se discriminó las parcelas con pendiente simple de aquellas parcelas con pendiente compleja. Las parcelas con pendiente compleja son aquellas donde fue necesario tomar más de un punto central, a partir del cual se tomaron las distancias a cada vértice.

En cada una de las esquinas de las parcelas piloto se tomó un punto de control con GPS, esto último facilitó la generación de polígonos para estimar la superficie a partir de métodos automáticos.

5.3.3. Procesamiento de las imágenes de satélite

Antes de realizar cualquier tipo de análisis sobre las imágenes estas fueron rectificadas y ortorrectificadas para atenuar el efecto del desplazamiento por relieve.

La corrección geométrica y la consiguiente georreferenciación, puede ser de dos tipos. En el caso de corregir únicamente la distorsión panorámica, como si el terreno fuese llano, tal corrección recibe el nombre de rectificación y es la que se produce cuando no se considera el DEM, el producto obtenido se llama imagen rectificada. Cuando, además de la distorsión panorámica, se corrige el efecto de desplazamiento del relieve debido a la altimetría, se necesita contar con el correspondiente DEM, el proceso se denomina ortorrectificación y el producto obtenido es la imagen ortorrectificada.

Para hacer compatibles las mediciones, las imágenes usadas (Spot, Ikonos y ortofotos) fueron corregidas entre ellas usando como base las ortofotos, adquiridas con un nivel de procesamiento estándar. Esto implicó que las ortofotos previamente habían sido georreferidas y corregidas geoméricamente usando la proyección Universal Transversa de Mercator (UTM), Datum WGS84, zona 14 Norte. Jensen (1996) y Franklin (2001) detallan el uso y la pertinencia del procedimiento de registro de imagen a imagen. Este procedimiento se usa para hacer ajustes entre dos o más imágenes de geometría similar que cubren la misma área geográfica para hacer coincidir los elementos geográficos existentes; esta condición es necesaria para obtener resultados comparables entre las imágenes usadas.

5.3.3.1. Rectificación y Ortorrectificación de imágenes

Las imágenes de satélite fueron rectificadas y ortorrectificadas para atenuar el efecto del desplazamiento por relieve. Se utilizó como base de georeferencia, un mosaico de ortofotos digitales del año 2000 con proyección UTM, y sistema de referencia geodésico WGS 84. La rectificación se realizó mediante el cálculo de polinomios de segundo grado. El remuestreo de los valores digitales a su posición corregida se realizó a partir del método del vecino más cercano. Los resultados de la calidad del ajuste son expresados mediante el error cuadrático medio (ECM).

El proceso de rectificación se realizó con el módulo Ortho Engine del programa Geomática V8.2. (PCI Geomatics, 2001). A partir de la obtención de puntos homólogos imagen-imagen,

aplicándose funciones de transformación que consideran simultáneamente todas las fuentes de error, asumiendo que esos puntos de control son representativos de la deformación geométrica que tiene la imagen (Chuvieco, 2002). Se utilizaron puntos de control terrestre (GCPs) según el tipo de imagen. En este caso los puntos de control se identifican sobre la imagen base, se utilizaron 23 puntos de control para registrar la subescena correspondiente al área en estudio de la imagen Ikonos, 19 en Spot 5 multiespectral y 21 en Spot 5 pancromática. Por otra parte, para eliminar las distorsiones introducidas por la variabilidad y geometría del relieve y con la finalidad de obtener una alta exactitud métrica, se realizó la ortorrectificación sobre las imágenes Spot 5 pancromática y multiespectral; para este proceso se utilizó el software ERDAS IMAGINE® (Erdas Inc., 2001).

La ortorrectificación exige disponer de un DEM de la zona. En este trabajo se utilizó un MED de Tenango del Valle y en el proceso se varió la cantidad de los puntos de apoyo para realizar la orientación de las imágenes. Como en el caso de la rectificación, el número de puntos de apoyo varió desde el mínimo posible (4) hasta el total de 27.

En general los materiales necesarios para el proceso de ortorrectificación fueron: imágenes a ortorrectificar en formato img, base de georeferencia (en este caso el mosaico de ortofotos en formato img), modelo de elevación digital en formato img.

Para obtener mayor exactitud en la estimación de superficies cultivadas se considera el ángulo de incidencia al momento de la toma de la imagen. En este trabajo se justifica el considerar el ángulo incidencia porque este factor nos permite explicar la relación entre la forma de la pendiente y cómo es que ésta última afecta la reflexión de la luz al chocar con superficies que no son propiamente planas como es el caso de lo que se ha denominado pendientes complejas. Al respecto, Riaño *et al.* (2003) mencionan que la irradiación en una pendiente varía fuertemente con la pendiente relativa al sol, y la reflectancia de la pendiente varía con los ángulos de incidencia y exitancia relativa a la pendiente normal.

Para ortorrectificar la imagen Ikonos (GEO, 1 m) se usó el software Ortho Engine TM; éste proceso fue desarrollado por Thierry Toutin del *Canadian Centre for Remote Sensing* (Toutin

y Cheng, 2000). Este modelo consiste en utilizar información del metadato y de los archivos de la imagen; es decir toma en consideración la información de los sensores del satélite, entre estos datos están el ángulo de elevación solar y el ángulo azimutal. El modelo CCRS se basa en los principios relacionados con la fotogrametría, cartografía y geodesia, los cuales corrigen las distorsiones debidas a la plataforma, sensores, la Tierra y la deformación debida a la proyección cartográfica.

5.4. Diseño de tratamientos

Para el diseño de los tratamientos se consideraron las siguientes variables: rango de pendiente, tipo de imagen, y corrección geométrica. A partir del cual se derivó la estimación de la superficie. En total se generaron 35 tratamientos (Cuadro 8).

Cuadro 8. Tratamientos probados para estimar la superficie cultivada en laderas.

Pendiente (%)	Tipo de imagen	Nivel de corrección geométrica de la imagen
0-9	Ortofotos	ortorrectificada
	Ikonos -2	rectificada ortorrectificada
	Spot 5 P	rectificada ortorrectificada
	Spot 5 M	rectificada ortorrectificada
9.1-19	Ortofotos	ortorrectificada
	Ikonos -2	rectificada ortorrectificada
	Spot 5 P	rectificada ortorrectificada
	Spot 5 M	rectificada ortorrectificada

19.1-29	Ortofotos	{	ortorrectificada
	Ikonos -2	{	rectificada ortorrectificada
	Spot 5 P	{	rectificada ortorrectificada
	Spot 5 M	{	rectificada ortorrectificada
29.1-39	Ortofotos	{	ortorrectificada
	Ikonos -2	{	rectificada ortorrectificada
	Spot 5 P	{	rectificada ortorrectificada
	Spot 5 M	{	rectificada ortorrectificada
>39.1	Ortofotos	{	ortorrectificada
	Ikonos -2	{	rectificada ortorrectificada
	Spot 5 P	{	rectificada ortorrectificada
	Spot 5 M	{	rectificada ortorrectificada

5.5. Identificación de parcelas sobre Imágenes de satélite y ortofotos

A partir de los puntos obtenidos con GPS en campo se creó una máscara digital de puntos, misma que se superpuso a las ortofotos, imágenes Spot 5 e Ikonos de la zona de interés, para la identificación de las parcelas o grupos de parcelas, con pendientes simples y complejas.

5.6. Estimación de superficies a partir de análisis visual de imágenes.

Las parcelas se digitalizaron en pantalla sobre una composición en falso color en el caso de la Spot 5 multiespectral e Ikonos y sobre las imágenes pancromáticas en el caso de la Ortofoto y la Spot 5 pancromática.

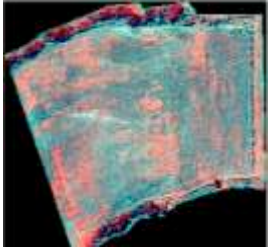
Una vez trazados los polígonos de las parcelas piloto, obtenidas por digitalización en formato vectorial, al transformarlas a formato raster se obtuvo la estimación de superficie de cada parcela empleando los programas *Xtools* y *Fragstats* que funcionan como extensiones de ArcView o bien a partir de Arc Gis cuya extensión para estimación de área es *Xtools Pro*. La digitalización de cada parcela se aplicó como máscara en las posteriores clasificaciones.

5.7. Estimación de superficies a partir de clasificación digital de imágenes de sensores remotos.

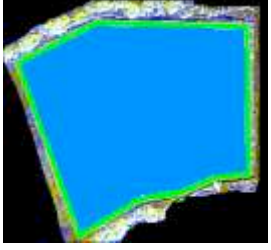
Para obtener el área de cada parcela se utilizó el método de clasificación supervisada. Al realizar esta clasificación no se discriminaron cultivos, pues este no fue nuestro objetivo. La clasificación supervisada identificó un solo elemento, el cual constituyó la clase suelo con cultivo o sin cultivo. Para la identificación de los campos de entrenamiento se utilizaron composiciones en falso color para las imágenes multispectrales y la banda PAN para las pancromáticas de Spot 5. Para los cuatro tipos de imagen se aplicaron los métodos de clasificación del vecino más cercano y el modelo de clasificación de máxima probabilidad, en donde el píxel se asigna a la clase con la que tiene mayor probabilidad de pertenencia.

5.8. Estimación de superficies a partir de imágenes rectificadas y ortorrectificadas.

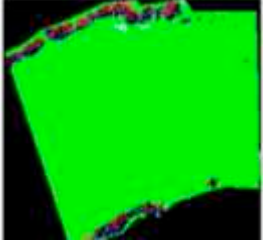
Se hicieron cortes de mayor área respecto al tamaño de cada parcela (Figura 16a), se considero esto a fin de obtener un resultado que pudiera ser extrapolado a una superficie mayor. A partir de los vectores de las parcelas, que sirvieron para realizar los cortes, se crearon *buffers* al interior de ellas Figura 16b, esto permitió obtener un área a clasificar libre de objetos y/o basura que pudieran causar confusión durante el proceso de clasificación. Se realizó la clasificación supervisada de cada parcela, Figura 16c; primero para cada tipo de imagen rectificadas y después para cada parcela proveniente de las imágenes ortorrectificadas.



a) Identificación de la parcela



b) Fase de asignación y entrenamiento



c) Resultado de la clasificación supervisada

Figura 16. Proceso seguido para la estimación de superficies en base a clasificación supervisada de cada parcela.

Un esquema de los procesos aplicados se muestra en la Figura 17:

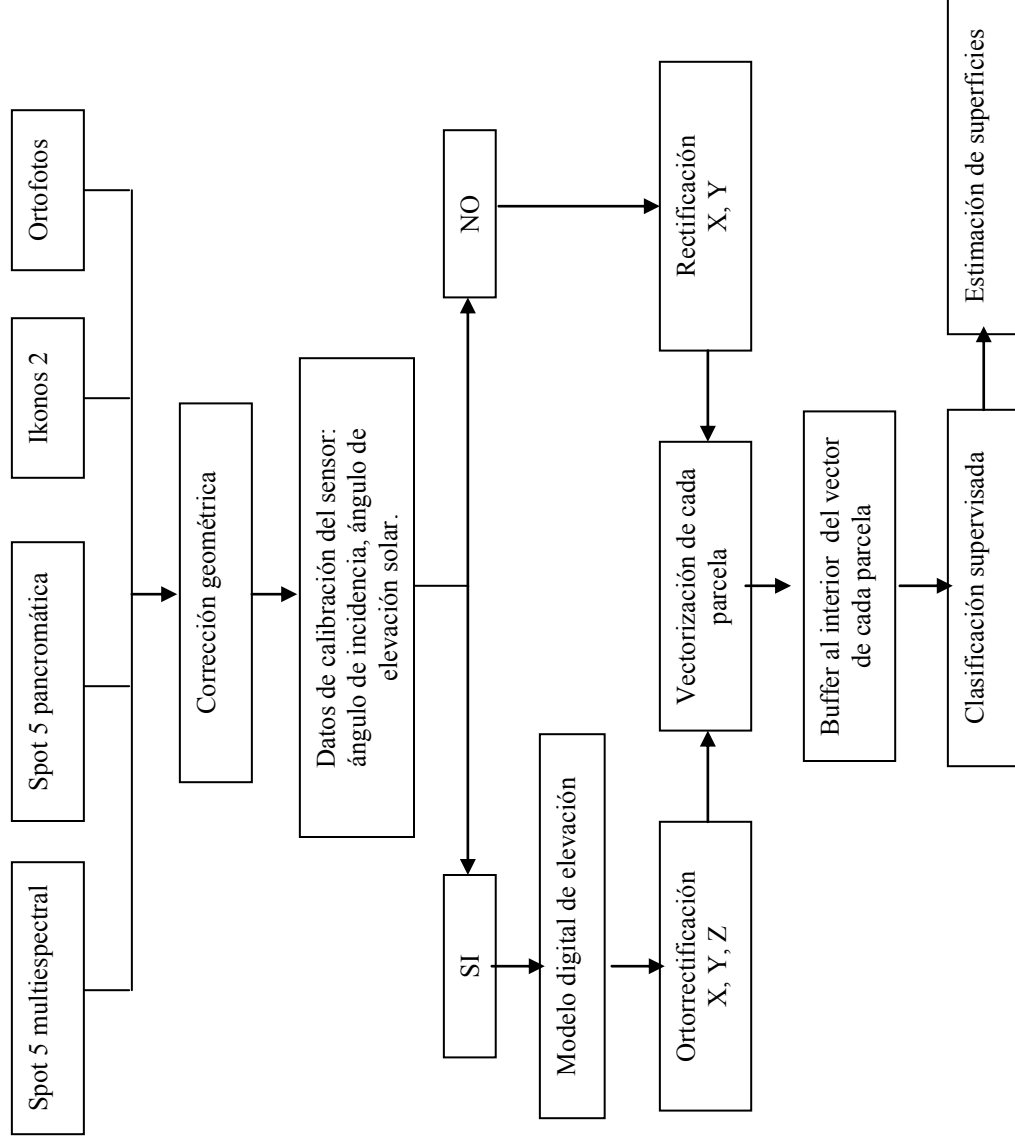


Figura 17. Diagrama de flujo para la estimación de superficies cultivadas.

5.9. Análisis estadístico

5.9.1. Elementos estadísticos

Las superficies obtenidas a partir de la digitalización de las parcelas sobre las imágenes y las obtenidas con levantamiento topográfico, fueron analizados estadísticamente por medio de correlaciones, donde las superficies calculadas mediante el proceso topográfico se consideran como las más exactas y por lo tanto constituyen el testigo, y las superficies calculadas a través de digitalización se consideran como estimadores. También se realizaron regresiones lineales simples, ya que al igual que la correlación son dos técnicas estadísticas que se pueden utilizar para solucionar diversos problemas relacionados con la identificación y cuantificación de alguna relación funcional entre dos o más variables, donde una variable depende de la otra variable. Para conocer el error absoluto cometido se analizaron los datos en función de las desviaciones de las discrepancias. Este análisis se describe más adelante.

5.9.1.1. El modelo de regresión lineal simple

El modelo de regresión lineal simple, permite construir un modelo para explicar la relación entre dos variables. Tienen como objeto estudiar cómo los cambios en una variable no aleatoria, afectan a una variable aleatoria, en el caso de existir una relación funcional entre ambas variables que puede ser establecida por una expresión lineal, es decir; su representación gráfica es una línea recta, la cual viene definida por la siguiente fórmula:

$$y = a + b x$$

Donde “ y ” es la variable dependiente, es decir, aquella que viene definida a partir de la otra variable “ x ” variable independiente.

A partir de un conjunto de observaciones de dos variables x e y sobre una muestra de individuos, el primer paso en un análisis de regresión es representar estos datos sobre los ejes X, Y , también llamado diagrama de dispersión. Esto ayuda en la búsqueda de modelos que describan la relación entre las variables, además; el diagrama de dispersión también ayuda a

encontrar algún valor atípico entre los datos de la muestra que pueda tener su origen en una mala observación o en el hecho de ser una observación correspondiente a un individuo excepcional dentro de la muestra. Cuando se tiene un valor atípico, se debe controlar las influencias que pueda tener en el análisis.

Una vez que se obtiene el diagrama de dispersión y después de observar una posible relación lineal entre las dos variables, se determina la ecuación de la recta que mejor se ajuste a la dispersión de puntos.

Para definir la recta se determinan los valores de los parámetros “a” y “b”: El parámetro “a” es el valor que toma la variable dependiente “y”, cuando la variable independiente “X” vale 0, y es el punto donde la recta cruza el eje vertical. El parámetro “b” determina la pendiente de la recta, es decir; su grado de inclinación.

Una recta queda bien determinada si el valor de su pendiente “b” y de su ordenada en el origen “a” son conocidos. De esta manera la ecuación de la recta esta dada por:

$$y = a + bx$$

A partir de la fórmula anterior se define para cada observación (x_i, y_i) el error o residuo como la distancia vertical entre el punto (x_i, y_i) y la recta:

$$y_i - (a + bx_i)$$

Por cada recta que se considere se tendrá una colección diferente de residuos. Se buscará que la recta que dé lugar a los residuos más pequeños en cuanto a la suma de los cuadrados. Para determinar la ecuación de una recta de regresión, se utiliza el método de los mínimos cuadrados. El cual consiste en buscar los valores de los parámetros “a” y “b” de manera que la suma de los cuadrados de los residuos sea mínima. Se expresa de la siguiente forma:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x$$

Una vez determinada la ecuación de la recta, se interpretan los parámetros de la ecuación en el contexto del fenómeno que se estudia. La interpretación de los parámetros es la siguiente:

- La ordenada en el origen ($\hat{\beta}_0$), este parámetro representa la estimación del valor de Y cuando X es igual a cero.

- Interpretación de la pendiente de la recta (B_1), este parámetro representa la estimación del incremento que experimenta la variable Y cuando X aumenta en una unidad. Es decir, indica la relación entre las dos variables indicando en qué cantidad (y si es positiva o negativa) varían los valores de Y cuando varían los valores de la X en una unidad.

Una vez ajustada la ecuación de la recta al grupo de observaciones, es importante disponer de una medida que mida la bondad del ajuste realizado y que permita decidir si el ajuste lineal es suficiente o se deben buscar modelos alternativos.

5.9.1.2. Coeficiente de determinación (R^2).

Como medida de bondad del ajuste de la ecuación de la recta se utiliza el coeficiente de determinación.

Se define como el cociente entre la variabilidad explicada por la regresión y la variabilidad

total, esto es:

$$R^2 = 1 - \frac{\text{Varianza no explicada}}{\text{Varianza total}}$$

El coeficiente R^2 mide la proporción de variabilidad total de la variable dependiente respecto a la variable independiente. Es común expresar esta medida en tanto por ciento, multiplicándola por cien. Si todas las observaciones están en la línea de regresión, el valor de R^2 tiende a 1, y si no hay relación lineal entre las variables dependiente e independiente, el valor de R^2 tiende a 0. El coeficiente R^2 es una medida de la relación lineal entre dos variables. A medida que su valor es mayor, el ajuste de la recta a los datos es mejor, puesto que la variación explicada es mayor; así, el desajuste provocado por la sustitución de los valores observados por los predichos es menor.

5.9.1.3. Desviación estándar (σ)

Para conocer con detalle un conjunto de datos, no basta con conocer las medidas de tendencia central, se necesita conocer también la desviación que representan los datos en su distribución

respecto de la media aritmética de dicha distribución, para tener una visión de los mismos más acorde con la realidad a la hora de describirlos e interpretarlos para la toma de decisiones.

La desviación estándar es una medida del grado de dispersión de los datos del valor promedio. Dicho de otra manera, el promedio o variación esperada con respecto de la media aritmética y se expresa de la siguiente manera:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad \text{donde } \bar{X} = \text{media de la muestra } (1, 2, \dots, n) \\ n = \text{Tamaño de la muestra}$$

Una σ alta indica que los puntos están lejos de la media, y una desviación pequeña indica que los datos están agrupados cerca de la media. La σ puede ser interpretada como una medida de incertidumbre. Cuando se pretende determinar si un grupo de medidas está de acuerdo con el modelo teórico, la σ de esas medidas es de vital importancia; si la media de las medidas está demasiado alejada de la predicción (con la distancia medida en σ), entonces se considera que las medidas contradicen la teoría. Esto es de esperarse, ya que las mediciones están fuera del rango de valores de los cuales sería razonable esperar que ocurrieran si el modelo teórico fuera correcto.

5.9.1.4. Análisis de resultados en función de la σ de las discrepancias

Se realizó el análisis de las diferencias del promedio de áreas entre el testigo y la superficie (ha) obtenida en cada una de las parcelas (tratamientos). La exactitud se determinó en términos absolutos basados en la desviación estándar de las discrepancias (σ_D).

Cabe destacar que se trabajó en pequeñas áreas, específicamente en parcelas individuales. Así que la σ_D permite conocer al mejor método, si subestima o sobreestima la superficie calculada.

En primer término se calcula la diferencia entre la superficie testigo y la superficie estimada mediante algún tratamiento, y finalmente se estima la desviación estándar de esas diferencias. Para conocer el mejor método, se escoge la σD que representa la menor diferencia y se interpreta como \pm un error de la exactitud en la estimación de la superficie obtenida por alguno de los tratamientos con respecto al testigo. Como apoyo a este criterio, se toma como error aceptable el 10 % de la unidad de medida, es decir 1 ha; se debe tener claro que dicho error hace referencia a tal unidad de medida más que al error para superficies totales.

5.9.1.5. Obtención de coeficientes de ajuste

A partir del cálculo de superficies sobre la imagen y de la estimación de superficie directamente en campo (SC), fue generado un factor k (coeficiente de ajuste), el cual será diferente para cada tratamiento (imagen utilizada, pendiente del terreno y nivel de corrección geométrica de la imagen).

En un primer caso, el coeficiente k depende de la superficie estimada sobre la imagen rectificadas (SIR), donde las principales variables son la resolución (R) propia de la imagen y la pendiente (P) del terreno. En un segundo caso, para lograr una estimación más precisa de la superficie cultivada, se generó un coeficiente a partir de los datos obtenidos de las imágenes ortorrectificadas (SIO), donde las variables son las mismas que se consideraron en el primer caso. Un resumen de la generación de estos coeficientes se presenta a continuación:

Parcela	SC (ha)	SIR ó SIO (ha)	R Resolución espacial (m)	P Pendiente del terreno (%)	k Coeficiente de ajuste
1	SC1	SIR1	1	0-9	
2	SC2	SIR2	2	9.1-19	SCn/SIRn
3	SC3	SIR3	2.5	19.1-29	ó
.	.	.	10	29.1-39	SCn/SIO n
.	.	.		>39.1	
29	SC29	SIR29			

n = número de parcela

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cada una de las fases metodológicas planteadas.

6.1. Identificación de parcelas en campo.

En total se identificaron 29 parcelas, las cuales se distribuyeron dentro de cinco rangos de pendiente y dos de complejidad (Cuadro 9). En el caso específico de las parcelas complejas se definieron como tales ya que para el levantamiento topográfico fue necesario contar con más de un punto central al momento de realizar dicho levantamiento.

Cuadro 9. Clasificación de parcelas con base en su rango de pendiente y complejidad

Intervalo de pendiente (%)	Forma de la pendiente		Total de parcelas
	Compleja	Simple	
0-9	14	4,8,15	4
9.1-19	3,5,28	12,13,23	6
19.1-29	9,22,30	20,21,29	6
29.1-39	2,19	11,18	4
> a 39.1	1,6,7,26,27	10,16,17,25	9

Es preciso mencionar la importancia que asume el tamaño de las parcelas para hacer esta discriminación, es decir, en parcelas con superficies menores a una hectárea es poco probable identificar el rasgo de complejidad pues haciendo estación con el tránsito en el centro de la parcela, es posible visualizar todos y cada unos de los vértices; en el caso contrario de parcelas con superficies mayores a una hectárea incluso en el rango de menor pendiente se debió hacer estación en tres puntos diferentes porque desde un sólo punto resultó imposible hacer las mediciones correspondiente a cada vértice.

Las siguientes imágenes muestran ejemplos de parcelas con diferentes rangos de pendiente, a la vez que ilustran la complejidad de las mismas.



a)

b)



c)

d)



e)

f)

Figura 18. Parcelas con pendiente simple (a, c y e) y pendiente compleja (b, d, y f) en la zona de estudio.

En algunos casos fue necesario agrupar parcelas para tener áreas representativas y sobre todo para que éstas pudieran ser visualizadas en la imagen Spot 5 multiespectral. Sin esta agrupación los resultados habrían sido poco precisos, incluso para imágenes de mayor resolución espacial como Ikonos. Al respecto se conocen trabajos donde la baja resolución espacial de las imágenes ha limitado la exactitud de estudios enfocados a estimar superficies. Ozdogan y Woodcock (2006), realizaron una extensa revisión de trabajos relacionados con la

estimación de áreas cultivadas a partir de sensores remotos y concluyen que los errores en la estimación se deben principalmente a la baja resolución de las imágenes utilizadas.

6.2. Estimación de superficies a partir del levantamiento topográfico

Por las características de las laderas resultó complicado encontrar parcelas con superficies mayores de una hectárea, por esta razón se tuvo alta heterogeneidad en el tamaño de las mismas (Cuadro 10). Se observó que en general la superficie de las parcelas disminuye conforme la pendiente va en aumento, lo cual es una característica en la zona de estudio. En este estudio, nueve parcelas corresponden al rango de mayor pendiente, ya que en principio se pensó en encontrar mayores imprecisiones conforme la pendiente fuera en aumento. Esto se comprobó con los datos de superficie obtenidos a partir del levantamiento topográfico para este rango de pendiente.

Para tener superficies de muestreo mayores a una hectárea, fue necesario agrupar parcelas, sin embargo, esta agrupación dificultó el posterior proceso de clasificación digital, debido a que se debió identificar dos o más clases y después reagruparlas en una sola.

Cuadro 10. Superficies estimadas a partir de levantamientos topográficos.

Superficie		Superficie	
Pendiente (%)	Parcela	Pendiente (%)	Parcela
	p4		p2
	p8		p11
0-9	p14	29,1-39	p18
	p15		p19
	p3		p1
	p5		p6
	p12		p7
9,1-19	p13		p10
	p23	>39,1	p16
	p28		p17
	p9		p25
	p20		p26
19,1-29	p21		p27
	p22		
	p29		
	p30		

Superficie		Superficie	
Pendiente (%)	Parcela	Pendiente (%)	Parcela
	p4		p2
	p8		p11
0-9	p14	29,1-39	p18
	p15		p19
	p3		p1
	p5		p6
	p12		p7
9,1-19	p13		p10
	p23	>39,1	p16
	p28		p17
	p9		p25
	p20		p26
19,1-29	p21		p27
	p22		
	p29		
	p30		

6.3. Correcciones geométricas

6.3.1. Resultado de la rectificación de las imágenes

Los resultados de la calidad del ajuste, expresada mediante el error cuadrático medio o ECM, se muestran en el Cuadro 11. Podemos comentar que los ajustes realizados con el número mínimo de puntos de apoyo pueden llegar a ser exactos pero obviamente no fiables.

Cuadro 11. Error cuadrático medio en la rectificación de las imágenes con el mínimo de GCPs (4).

IMAGEN	ECM	
	X	Y
Spot 5 multiespectral	1.01	0.69
Spot 5 pancromática	3.77	5.44
Ikonos	8.13	12.91

Para la corrección geométrica se ubicaron puntos de control distribuidos en toda la imagen: 19 para Spot 5 multiespectral; 23 para la imagen Ikonos y 21 para la imagen Spot 5 pancromática. Como función de transformación se eligió un polinomio de segundo grado. Los ECM para Spot 5 multiespectral, Spot 5 pancromática e ikonos fueron 3.48, 1.54 y 0.96, píxeles, respectivamente. Como observamos, el error cuadrático medio del ajuste polinómico superó el metro para la mayoría de los casos.

6.3.2. Resultado de la ortorrectificación de las imágenes

El Cuadro 12 muestra los resultados de la ortorrectificación y los requerimientos básicos del proceso. Puede observarse el mejor ajuste del caso tridimensional frente a los que sólo usan las coordenadas X e Y (Cuadro 11), así como una mayor estabilidad en los resultados, que son menos variables. Debe hacerse énfasis en la escasa fiabilidad de los ajustes polinómicos cuando el número de puntos de apoyo está próximo al mínimo exigible.

Cuadro 12. Requerimientos y resultado del proceso de ortorrectificación.

REQUERIMIENTOS	Imágenes a ortorrectificar		
	Spot 5 Multiespectral	Spot 5 Pancromática	Ikonos 2
Base de georeferencia	Ortofotos	Ortofotos	Ikonos Pancromática
Angulo de incidencia	58.01	78.01	73.98571
Fechas de las imágenes	16-10-2002	17-04-2006	08-05-2006
GCP	17	27	27
Total iteraciones	5	5	5
Superficie aproximada	24.5 Km ²	24.5 Km ²	24.5 Km ²
RESULTADO			
Error cuadrático medio	1.89	1.01	0.68

Una vez que las imágenes fueron ortorrectificadas, se realizó la clasificación supervisada de las imágenes.

En este trabajo se ha querido llamar la atención sobre la limitada calidad que se consigue con la rectificación ante la corrección mediante modelos digitales de elevación, que hace intervenir la elevación de cada píxel en los cálculos de cambio de espacio de referencia. La baja calidad de los resultados puede pasar inadvertida debido al uso de un número muy reducido de puntos de apoyo y a la ausencia de control del error mediante puntos de control independientes. Se comprobó que eliminando los puntos de apoyo con error elevado se consigue un mejor ajuste aparente pero carente de significado estadístico. Lo cual coincide con lo descrito por Cuartero y Felicísimo (2003).

6.4. Estimación de superficies a partir de la digitalización de parcelas y GPS.

Del análisis visual se obtuvo una primera estimación de la superficie (Cuadro 13). Se observó que las estimaciones obtenidas mediante interpretación visual están dentro de los rangos de valores obtenidos a partir del levantamiento topográfico realizado en campo (testigo). Este hecho realza la utilidad del análisis visual para cuantificar de manera rápida y aproximada las superficies totales.

Cuadro 13. Superficies estimadas a partir de digitalización de parcelas y equipo GPS

Rango de pendiente (%)	Parcela	TRATAMIENTOS/SUPERFICIE (m ²)				
		GPS	DORTOF	Dikonos	DSP5M	
0-9	4	13638.5	12356.11	12028.43	13895.20	13133.15
	8	9341	9793.78	9852.23	9969.79	8646.97
	14	21629.5	24960.89	20439.06	23876.04	19390.72
	15	16556	15871.95	14209.64	15227.56	15208.50
	3	14949.5	15169.68	15023.45	15262.69	14085.56
9.1-19	5	22449.5	23735.49	23925.29	22755.32	25464.28
	12	15322	22287.37	21119.59	24122.70	20082.58
	13	13090	16232.07	15425.67	17920.18	16234.07
	23	8511.5	12909.05	10740.60	11804.13	12079.23
	28	14704	14755.22	15450.72	15625.72	15529.54
19.1-29	9	26704.5	23561.58	22028.96	23904.63	20243.69
	20	17186.5	20453.61	19468.34	21806.46	23845.81
	21	8408	8435.40	5847.59	5505.94	6672.56
	22	6296	7450.25	6932.90	7940.98	7589.45
	29	4653	4272.47	3886.09	4630.73	4670.73
29.1-39	30	7288.5	8386.24	8730.83	7610.16	9388.06
	2	12656	20131.37	16971.27	21455.84	19210.41
	11	9086.5	8617.11	8221.95	8292.70	10214.55
	18	5273	5370.34	4906.13	6508.07	4984.89
	19	7459	8798.74	7725.73	7691.18	7404.25
>39.1	1	27901.5	27398.76	28766.29	33098.99	30821.52
	6	17066.5	14180.76	13317.37	16360.92	16992.90
	7	10450.5	11028.85	8423.10	8211.42	9282.01
	10	6549.5	9047.76	7869.99	7629.18	7985.78
	16	2869	3366.97	3961.89	4820.49	5352.83
	17	10407.5	10465.70	10205.67	7553.48	11109.10
	25	4738	6411.50	5238.21	5873.86	5470.86
	26	10890	13103.19	12264.96	13640.05	8819.90
	27	16061.54	12064.70	13723.30	14757.75	12946.38

DORTOF = Digitalización en ortofoto; Dikonos = Digitalización en Ikonos; DSP5P = Digitalización en Spot 5 pancrómica, DSP5M = Digitalización en Spot 5 multiespectral

Se realizó un análisis de correlación entre los tratamientos utilizados para estimar la superficie de las parcelas y se determinó los valores obtenidos con la imagen Ikonos con resolución de 1m covarian en la misma manera (99%) que los obtenidos con el método topográfico (Cuadro 10). En cambio, los datos que menos covarian con el testigo son los derivados de la imagen Spot 5 multiespectral de 10 m de resolución espacial. Esto indica que a menor resolución de la imagen mayor es el error de cálculo. También se observó que entre las estimaciones a partir de las imágenes pancromáticas no existe ninguna diferencia, lo cual puede deberse a que en

ambos tipos de imagen la resolución espacial difiere en 0.5 metros. No obstante, esto no significa que la superficie calculada con imágenes de mayor resolución sea más precisa al tomar como referencia la calculada con el método topográfico.

6.5 Estimación de superficies en imágenes rectificadas y en imágenes ortorrectificadas.

Los resultados de las estimaciones para todos los tratamientos se reportan en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Superficies estimadas a partir de imágenes rectificadas y de imágenes ortorrectificadas

Rango de pendiente (%)	IKOREC	SP5PREC	SP5MREC	ORTOFOTO	SP5PORTO	SP5MORTO	IKO ORTO
0-9	12393	13100	12300	13279	12737.5	13100	12158
	9864	10081.25	7500	9691	9825	10600	9955
	21307	26581.25	26600	23980	24300	21700	22999
	14058	16293.75	12000	14674	14606.25	16100	14335
9.1-19	15256	14306.25	15400	16621	13281.25	14200	14689
	25183	24512.5	30400	22542	23287.5	28500	26117
	20681	26743.75	19400	21033	24618.75	21100	20099
	14338	16812.5	13600	15603	16125	14100	16323
19.1-29	9420	10712.5	13300	12805	10606.25	12700	9654
	13944	16768.75	17700	22728	14268.75	17100	14920
	20112	23650	19800	22170	22943.75	19300	23092
	17600	22043.75	20800	20601	21600	18000	20730
29.1-39	5766	5856.25	5900	8237	5581.25	7400	4998
	6424	8825	8100	7793	7962.5	11100	6892
	3819	3793.75	4400	4034	3793.75	4800	4217
	7206	7793.75	9300	8182	7731.25	9100	8708
>39.1	16613	22550	24700	18654	19293.75	22700	17237
	7277	8443.75	10800	8068	8075	10000	8054
	4200	6981.25	6300	5146	6018.75	5400	4972
	8192	7987.5	6000	8532	7662.5	7600	7573
>39.1	32111	37887.5	34000	29394	32737.5	34400	27071
	12506	15606.25	11700	14016	15650	16000	14511
	7701	10181.25	10200	11585	8481.25	10100	8832
	6778	9268.75	10900	8652	7656.25	11000	8195
>39.1	3946	5087.5	4300	3137	4543.75	4700	4084
	10493	8862.5	11047	10088	8131.25	13700	10421
	3996	5906.25	4800	6413	5568.75	5900	6409
	12940	12768.75	9900	12519	12550	9900	12489
	13939	16131.25	14300	10900	15743.75	17200	13624

IKO ORTO: Ikonos ortorrectificada; IKOREC: Ikonos rectificada; SP5PREC: Spot 5 pancromática rectificada; SP5MREC: Spot 5 multispectral rectificada; SP5PORTO: Spot 5 pancromática ortorrectificada; SP5MORTO: Spot 5 multispectral ortorrectificada

En las parcelas con tamaño menor a una hectárea se tuvo mayor dificultad al hacer la identificación de las mismas sobre la imagen, además de resultar poco precisa la estimación de la superficie cuando se realizó la clasificación supervisada. Al respecto, Gónima y Durango (2005), mencionan que sus resultados se vieron afectados por la resolución espacial de las imágenes, sobre todo en superficies pequeñas, donde sólo para parcelas mayores a 2 hectáreas la estimación comienza a ser relativamente precisa.

6.6. Modelos de regresión.

Se generaron modelos en función de cómo fueron agrupados los datos de estimación de superficies (ha) para ser analizados. El objetivo es explicar el comportamiento de la variable Y, que denominaremos variable explicada (o dependiente o endógena), a partir de otra variable X, que llamaremos variable explicativa (o independiente o exógena).

6.6.1. Modelos de regresión para el análisis global de datos

Para el análisis global donde no importa las condiciones de complejidad de la pendiente, el mejor modelo resultó de las estimaciones realizadas a partir de la imagen Ikonos ortorrectificada (Cuadro 15); en dicho modelo tenemos un valor de la pendiente muy cercano a uno (0.9859) y un valor de ordenada al origen de 503.67, además de un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9881 que indica la proporción de la variación de la variable dependiente explicada por la variable independiente.

Cuadro 15. Modelos de regresión generados a partir del análisis global

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R^2)	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (r)
1	Ortofoto	$y = 0.9317x + 632.75$	0.9162	0.9572
2	Ikonos rectificad	$y = 0.9234x + 1795.2$	0.9386	0.9688
3	Ikonos ortorrectificada	$y = 0.9859x + 503.67$	0.9881	0.9940
4	SP5P rectificad	$y = 0.7772x + 2060.9$	0.923	0.9607
5	SP5P ortorrectificada	$y = 0.8727x + 1600$	0.9495	0.9744
6	SP5M rectificad	$y = 0.7826x + 2526$	0.8589	0.9268
7	SP5M ortorrectificada	$y = 0.8688x + 989.36$	0.8638	0.9294
8	GPS	$y = 0.9654x + 1161.5$	0.9013	0.9494

Por otra parte, los modelos menos recomendables son los generados a partir de la imagen spot 5 pancromática y Spot 5 multiespectral que sólo fueron rectificadas con valores de 0.7772 y 0.7826 respectivamente, ambos valores lejanos de 1 (valor óptimo de la pendiente de la recta), y valores de ordenada al origen de 2060.9 y 2526 respectivamente.

Resulta interesante observar en el Cuadro 15 el comportamiento del modelo generado con las estimaciones de datos obtenidos con GPS, dicho modelo incluso fue mejor que el modelo para la imagen spot 5 Multiespectral rectificada.

De considerarse el coeficiente de determinación como decisivo para elegir al mejor modelo, el obtenido para ikonos ortorrectificada es la mejor opción (Cuadro 15). De igual forma si se toma a este coeficiente como indicador del porcentaje de exactitud, es clara la ventaja sobre los otros modelos e incluso se puede decir que supera a los peores modelos en más del 10%.

6.6.2. Modelos de regresión para el análisis de parcelas con pendiente de 0-29 %

Se agruparon las parcelas con los rangos de pendiente 1, 2 y 3 (0-29%) y de acuerdo con los datos analizados, el mejor modelo, por su ordenada al origen (435.7) y valor de pendiente (0.9841), es el generado para Ikonos ortorrectificada. Por otro lado el modelo menos aceptable en función de estos parámetros corresponde a Spot multiespectral rectificada (Cuadro 16).

También, en función de los coeficientes de determinación el modelo más aceptable corresponde a Ikonos ortorrectificada y el menos aceptable de nueva cuenta es el generado para Spot multiespectral rectificada.

Cuadro 16. Modelos de regresión para parcelas con pendiente de 0-29% sin considerar su complejidad

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R ²)	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (r)
1	Ortofoto	$y = 0.9956x - 605.15$	0.9052	0.9514
2	Ikonos rectificada	$y = 1.0479x + 339.69$	0.9527	0.9761
3	Ikonos ortorrectificada	$y = 0.9841x + 435.7$	0.9883	0.9941
4	SP5P rectificada	$y = 0.8723x + 1062$	0.9398	0.9694
5	SP5P ortorrectificada	$y = 0.9424x + 836.12$	0.9492	0.9743
6	SP5M rectificada	$y = 0.8529x + 1968.5$	0.8664	0.9308
7	SP5M ortorrectificada	$y = 1.0444x - 1018.3$	0.8674	0.9313
8	GPS	$y = 1.0056x + 703.58$	0.8743	0.9350

6.6.3. Modelos de regresión para el análisis de parcelas con pendiente > 19.1 %

En este análisis se agruparon todas las parcelas con mayor pendiente y se obtuvo que el mejor modelo, por su pendiente de la recta (1.0137) y su elevado coeficiente de determinación (0.9912), es Ikonos ortorrectificada, seguido del obtenido para la ortofoto. Por el contrario el peor modelo le corresponde a Spot pancromática rectificada, sobre todo por su ordenada al origen y pendiente de la recta. El coeficiente de determinación indica que el peor modelo se generó para Spot multiespectral ortorrectificada (Cuadro 17).

Cuadro 17. Modelos de regresión para parcelas con pendiente mayor a 19.1% sin considerar su complejidad

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R ²)	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (r)
1	Ortofoto	$y = 0.9673x + 428.48$	0.9386	0.9688
2	Ikonos rectificada	$y = 0.9133x + 1841.8$	0.9289	0.9638
3	Ikonos ortorrectificada	$y = 1.0137x + 216.6$	0.9912	0.9956
4	SP5P rectificada	$y = 0.7601x + 1946.6$	0.9273	0.9630
5	SP5P ortorrectificada	$y = 0.862x + 1474.5$	0.9626	0.9811
6	SP5M rectificada	$y = 0.8037x + 1921.3$	0.8526	0.9234
7	SP5M ortorrectificada	$y = 0.8426x + 965.84$	0.8494	0.9216
8	GPS	$y = 0.9281x + 1208.5$	0.9198	0.9591

6.6.4. Modelos de regresión para el análisis de parcelas agrupadas por rango de pendiente

Con la finalidad de identificar los mejores modelos y estar en posibilidad de ajustar los errores en la estimación de superficies, se obtuvieron modelos matemáticos por rango de pendiente.

Modelos matemáticos para el análisis de parcelas con pendiente de 0 a 9%

El mejor modelo para parcelas de poca pendiente, de acuerdo a su ordenada al origen y su pendiente de la recta (1.0182), es el generado para estimaciones con GPS, sin embargo el coeficiente de determinación indica que éste es el peor modelo, dado que sólo explica el 0.9168 de la variación en los valores de Y respecto de X (Cuadro 18). Por otra parte el siguiente mejor modelo corresponde a Ikonos ortorrectificada con un valor de ordenada al origen de 707.67, una pendiente de 0.959 y un coeficiente de determinación de 0.996.

Para este caso en particular se observa la clara desventaja de esta forma de analizar los datos, por lo que en adelante se toma con cierta reserva la discriminación entre el mejor y el peor modelo.

Cuadro 18. Modelos de regresión para parcelas de 0-9% de pendiente sin considerar su complejidad

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R ²)	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (r)
1	Ortofoto	$y = 0.9009x + 1080.7$	0.9989	0.9994
2	Ikonos rectificada	$y = 1.1158x - 1114.6$	0.9978	0.9989
3	Ikonos ortorrectificada	$y = 0.959x + 707.67$	0.996	0.9980
4	SP5P rectificada	$y = 0.7623x + 2370.9$	0.993	0.9965
5	SP5P ortorrectificada	$y = 0.8748x + 1515.5$	0.9994	0.9997
6	SP5M rectificada	$y = 0.6568x + 5369.8$	0.9856	0.9928
7	SP5M ortorrectificada	$y = 1.1267x - 2364$	0.9624	0.9810
8	GPS	$y = 1.0182x - 610.92$	0.9168	0.9575

Modelos matemáticos para el análisis de parcelas con pendiente de 9.1 a 19%

Para parcelas con pendiente fuertemente inclinada (mayores de 9%) se da la misma situación que en el caso anterior, donde por un lado, los datos de ordenada al origen (195.73) señalan a la ortofoto como generadora del mejor modelo, y por otro su coeficiente de determinación que es el más pequeño (0.6223). Excluyendo estos datos, el mejor modelo corresponde a Ikonos ortorrectificada por su ordenada al origen y coeficiente de determinación de 0.9707 (Cuadro 19).

Cuadro 19. Modelos de regresión para parcelas con pendiente de 9.1 a 19% sin considerar su complejidad

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R ²)	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (r)
1	Ortofoto	$y = 0.9424x - 195.73$	0.6223	0.7889
2	Ikonos rectificada	$y = 0.8433x + 3400.9$	0.9135	0.9558
3	Ikonos ortorrectificada	$y = 0.8664x + 2590.2$	0.9707	0.9852
4	SP5P rectificada	$y = 0.7232x + 4048.1$	0.8109	0.9005
5	SP5P ortorrectificada	$y = 0.7818x + 3974.7$	0.8091	0.8995
6	SP5M rectificada	$y = 0.6611x + 5191.7$	0.7335	0.8564
7	SP5M ortorrectificada	$y = 0.7483x + 3857.6$	0.8239	0.9077
8	GPS	$y = 1.0114x + 2283.4$	0.8544	0.9243

Modelos matemáticos para el análisis de parcelas con pendiente de 19.1 a 29%

El mejor modelo, para el grupo de parcelas con pendiente moderadamente escarpada, es el generado a partir de ikonos ortorrectificada, en cuyo caso su ordenada al origen es 222.68 y su coeficiente de determinación 0.9981, un segundo mejor modelo lo presenta el tratamiento Spot pancromática ortorrectificada (Cuadro 20) en contraparte los peores modelos se generaron a partir del análisis de datos obtenidos de Spot multiespectral ortorrectificada (por su ordenada al origen) y GPS (por su coeficiente de correlación).

Cuadro 20. Modelos de regresión para parcelas con pendiente de 19.1 a 29% sin considerar su complejidad

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R ²)	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (r)
1	Ortofoto	$y = 1.1179x - 1625.9$	0.9742	0.9870
2	Ikonos rectificadas	$y = 1.2453x - 1039.6$	0.9961	0.9980
3	Ikonos ortorrectificada	$y = 1.034x - 222.68$	0.9981	0.9990
4	SP5P rectificadas	$y = 0.9926x - 299.28$	0.9882	0.9941
5	SP5P ortorrectificada	$y = 1.0158x - 180.34$	0.9919	0.9959
6	SP5M rectificadas	$y = 1.1862x - 1897.9$	0.9683	0.9840
7	SP5M ortorrectificada	$y = 1.4254x - 4953.7$	0.9413	0.9702
8	GPS	$y = 0.9601x + 318.81$	0.9118	0.9549

Modelos matemáticos para el análisis de parcelas con pendiente de 29.1 a 39%

Con uno de los coeficientes de determinación más alto (0.9991) y un valor de ordenada al origen de 410.34, generado a partir de Ikonos ortorrectificada, se obtiene el mejor modelo para parcelas con pendiente de 29.1 a 39% (Cuadro 21).

Cuadro 21. Modelos de regresión para parcelas con pendiente de 29.1 a 39%, sin considerar su complejidad

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R ²)	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (r)
1	Ortofoto	$y = 0.8917x + 687.48$	0.9984	0.9992
2	Ikonos rectificadas	$y = 0.9862x + 748.86$	0.9904	0.9952
3	Ikonos ortorrectificada	$y = 0.9815x + 410.34$	0.9991	0.9995
4	SP5P rectificadas	$y = 0.6995x + 1656.9$	0.967	0.9834
5	SP5P ortorrectificada	$y = 0.8586x + 882.78$	0.986	0.9930
6	SP5M rectificadas	$y = 0.5792x + 2772.8$	0.9336	0.9662
7	SP5M ortorrectificada	$y = 0.6735x + 1999.3$	0.9833	0.9916
8	GPS	$y = 1.6136x - 4212.7$	0.9107	0.9543

Para este mismo grupo de parcelas, el peor modelo se obtuvo a partir del análisis de datos generados con GPS, en cuyo caso su valor de ordenada al origen es 10 veces más alta que el valor de la ordenada al origen de Ikonos ortorrectificada. Lo anterior se observa en el Cuadro 21.

Modelos matemáticos para el análisis de parcelas con pendiente mayor a 39.1%

Para parcelas consideradas con pendiente muy escarpada el mejor modelo corresponde a Ikonos ortorrectificada (Cuadro 22), y por otra parte los peores modelos se generaron a partir de Spot pancromática rectificada (por su ordenada al origen) y Spot multiespectral rectificada por su coeficiente de determinación.

Cuadro 22. Modelos de regresión para parcelas con pendiente mayor a 39.1% sin considerar su complejidad

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R ²)	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (r)
1	Ortofoto	$y = 0.8774x + 1900.6$	0.9229	0.9607
2	Ikonos rectificada	$y = 0.7683x + 3390.1$	0.9565	0.9780
3	Ikonos ortorrectificada	$y = 0.9981x + 587.76$	0.9844	0.9922
4	SP5P rectificada	$y = 0.6596x + 3383.5$	0.9469	0.9731
5	SP5P ortorrectificada	$y = 0.7641x + 2874.3$	0.9702	0.9850
6	SP5M rectificada	$y = 0.73x + 3287.9$	0.8994	0.9484
7	SP5M ortorrectificada	$y = 0.7356x + 2258.2$	0.9333	0.9661
8	GPS	$y = 0.873x + 1987.5$	0.9761	0.9880

6.6.5. Modelos de regresión para el análisis de parcelas agrupadas por complejidad de su pendiente

La complejidad de la pendiente de un terreno esta íntimamente relacionada con la capacidad del sensor de captar la reflectividad del terreno, por tal motivo se agrupó las parcelas de modo que se pudiera realizar un análisis por separado para parcelas simples y parcelas complejas.

Modelos matemáticos para el análisis de parcelas con pendiente simple

Esta particular forma de agrupar los datos, permite reducir los valores de ordenada al origen, en este sentido dos modelos tienen valores de ordenada al origen de 50.76 y 52.39 (Ikonos

ortorrectificada y Ortofoto), por tal motivo se reconocen como los mejores modelos para estimar superficies en terrenos con pendiente simple (Cuadro 23).

Cuadro 23. Modelos de regresión para el análisis de parcelas con pendiente simple

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R ²)	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (r)
1	Ortofoto	$y = 0.9823x - 52.399$	0.9478	0.9736
2	Ikonos rectificada	$y = 1.026x + 628.1$	0.9531	0.9763
3	Ikonos ortorrectificada	$y = 1.0159x + 50.765$	0.9971	0.9985
4	SP5P rectificada	$y = 0.8181x + 1250.6$	0.9353	0.9671
5	SP5P ortorrectificada	$y = 0.8694x + 1277.3$	0.9517	0.9756
6	SP5M rectificada	$y = 1.0164x - 140.91$	0.8707	0.9331
7	SP5M ortorrectificada	$y = 1.0465x - 1241.1$	0.8856	0.9411
8	GPS	$y = 1.1119x - 273.43$	0.8342	0.9133

Cabe señalar que de estos dos modelos, el de Ikonos ortorrectificada es el mejor por su coeficiente de determinación (0.9971). El peor modelo para estimar superficies de acuerdo al coeficiente de determinación, se obtiene con estimaciones realizadas con GPS (Cuadro23).

Modelos matemáticos para el análisis de parcelas con pendiente compleja

El mejor modelo para este grupo de parcelas se generó a partir de la imagen Ikonos ortorrectificada y los peores modelos corresponden a Spot multiespectral rectificada y ortorrectificada (Cuadro24).

Cuadro 24. Modelos de regresión para el análisis de parcelas con pendiente compleja

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R ²)	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (r)
1	Ortofoto	$y = 0.8779x + 1666.1$	0.8641	0.9296
2	Ikonos rectificada	$y = 0.8459x + 3168.6$	0.9195	0.9589
3	Ikonos ortorrectificada	$y = 0.9462x + 1278.9$	0.9799	0.9899
4	SP5P rectificada	$y = 0.7179x + 3471.9$	0.8971	0.9472
5	SP5P ortorrectificada	$y = 0.8353x + 2585.8$	0.9366	0.9678
6	SP5M rectificada	$y = 0.6787x + 4521.3$	0.8514	0.9227
7	SP5M ortorrectificada	$y = 0.7639x + 3028.5$	0.8306	0.9114
8	GPS	$y = 0.8968x + 2232.2$	0.9308	0.9648

De este análisis destaca el incremento de los valores de ordenada al origen, los cuales van de 1278.9 para el mejor modelo hasta 4521.3 para el modelo de Spot multiespectral rectificada (Cuadro 24). Este razonamiento surge al comparar los modelos con pendiente compleja contra

aquéllos generados para parcelas con pendiente simple (Cuadro 23), donde el valor más alto es 1277. Esto refuerza la sugerencia de que, se debe tener cuidado al estimar superficies en terrenos donde la pendiente y complejidad del terreno se convierten en factores determinantes para la exactitud de los resultados que se pretenden obtener.

6.6.6. Modelos de regresión para el análisis de parcelas agrupadas por complejidad y gradiente de pendiente

Con la idea de encontrar modelos matemáticos para obtener estimaciones más exactas, las parcelas se agruparon en base a su complejidad y gradiente de pendiente.

Modelos matemáticos para el análisis de parcelas con pendiente simple y gradiente de 0-29%

El primer grupo se conformó por parcelas con pendiente simple y gradiente de 0-19%, así se obtuvo que por su ordenada al origen (101.21) y por su coeficiente de determinación (0.9958), el mejor modelo es Ikonos ortorrectificada, mientras que el peor modelo resultó ser donde se utilizó GPS para la estimación de superficie (Cuadro 25).

Cuadro 25. Modelos de regresión generados a partir del análisis de parcelas con pendiente simple y donde se han agrupado los rangos 1, 2 y 3

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R ²)	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (r)
1	Ortofoto	$y = 1.0561x - 1308.2$	0.9359	0.9674
2	Ikonos rectificada	$y = 1.0905x - 309.95$	0.9511	0.9752
3	Ikonos ortorrectificada	$y = 1.0136x + 101.21$	0.9958	0.9979
4	SP5P rectificada	$y = 0.7906x + 1749.4$	0.9368	0.9679
5	SP5P ortorrectificada	$y = 0.8612x + 1333.9$	0.9556	0.9775
6	SP5M rectificada	$y = 1.0111x + 500.69$	0.8807	0.9385
7	SP5M ortorrectificada	$y = 1.122x - 1930.3$	0.8872	0.9419
8	GPS	$y = 1.2509x - 2063.3$	0.7957	0.8920

Modelos matemáticos para el análisis de parcelas con pendiente simple y gradiente > 19.1%

Aun con el incremento en el gradiente de la pendiente, la estimación realizada con Ikonos ortorrectificada se genera el mejor modelo con $R^2 = 0.9998$, pendiente de la recta de 1.0018 y ordenada al origen de 95.48, e incluso en la mayoría de los modelos la ordenada al origen disminuye sensiblemente. Por otra parte los peores modelos se generaron a partir de estimaciones realizadas con GPS y Spot multiespectral ortorrectificada (Cuadro 26).

Cuadro 26. Modelos de regresión generados a partir del análisis de parcelas con pendiente simple y donde se han agrupado los rangos 3, 4 y 5

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R ²)	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (r)
1	Ortofoto	$y = 0.9886x - 50.481$	0.95	0.9747
2	Ikonos rectificadas	$y = 1.1367x + 51.422$	0.9577	0.9786
3	Ikonos ortorrectificada	$y = 1.0018x + 95.487$	0.9998	0.9999
4	SP5P rectificadas	$y = 0.9492x + 77.902$	0.9619	0.9808
5	SP5P ortorrectificada	$y = 0.9577x + 567.02$	0.9639	0.9818
6	SP5M rectificadas	$y = 0.9504x - 249.85$	0.9387	0.9689
7	SP5M ortorrectificada	$y = 1.0646x - 1450.7$	0.8758	0.9358
8	GPS	$y = 1.132x - 581.28$	0.8675	0.9314

Modelos matemáticos para el análisis de parcelas con pendiente compleja y gradiente de 0-29%

De nueva cuenta se presenta el caso en el cual el mejor modelo, con el criterio de ordenada al origen, pertenece a la ortofoto, sin embargo de acuerdo al coeficiente de determinación es uno de los menos recomendables junto con el modelo para Spot multiespectral ortorrectificada. En tanto, el mejor modelo es Ikonos ortorrectificada con un R^2 de 0.9803 (Cuadro 27).

Cuadro 27. Modelos de regresión para el análisis de parcelas con pendiente compleja y gradiente de 0-29%

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R ²)	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (r)
1	Ortofoto	$y = 0.9595x - 100.33$	0.8617	0.9283
2	Ikonos rectificada	$y = 0.9999x + 1267.9$	0.949	0.9742
3	Ikonos ortorrectificada	$y = 0.9632x + 742.56$	0.9803	0.9901
4	SP5P rectificada	$y = 0.9333x + 575.53$	0.9564	0.9780
5	SP5P ortorrectificada	$y = 0.9903x + 803.13$	0.9644	0.9820
6	SP5M rectificada	$y = 0.8159x + 2061.8$	0.8597	0.9272
7	SP5M ortorrectificada	$y = 0.9989x - 366.56$	0.8275	0.9097
8	GPS	$y = 0.9201x + 1911.5$	0.9575	0.9785

Modelos matemáticos para el análisis de parcelas con pendiente compleja y gradiente mayor de 19.1%

Para este análisis; parcelas complejas con pendiente de 19.1 a mayor, el modelo matemático que representa mayor ventaja es para Ikonos ortorrectificada; tanto su coeficiente de determinación como su ordenada al origen son buenos parámetros para definirlo como tal (0.9848 y 178.9, respectivamente). Por otra parte el peor modelo se generó con los datos de estimaciones realizadas con Spot multiespectral rectificada (Cuadro 28).

Cuadro 28. Modelos de regresión generados a partir del análisis de parcelas con pendiente compleja y donde se han agrupado los rangos 3, 4 y 5

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R ²)	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (r)
1	Ortofoto	$y = 0.9195x + 1388.5$	0.9094	0.9536
2	Ikonos rectificada	$y = 0.8253x + 3238.7$	0.911	0.9545
3	Ikonos ortorrectificada	$y = 0.9918x + 718.9$	0.9848	0.9924
4	SP5P rectificada	$y = 0.6819x + 3465.9$	0.909	0.9534
5	SP5P ortorrectificada	$y = 0.8089x + 2411.4$	0.9541	0.9768
6	SP5M rectificada	$y = 0.6881x + 4423$	0.8022	0.8957
7	SP5M ortorrectificada	$y = 0.7389x + 2975.9$	0.8061	0.8978
8	GPS	$y = 0.8474x + 2557.1$	0.9344	0.9666

Modelos matemáticos para el análisis de parcelas menores a 1 ha.

Cuando el tamaño de las parcelas se toma en consideración para el análisis de superficies es interesante apuntar que para la mayoría de los modelos generados tienen un R^2 muy bajo (Cuadro 29), sólo con Ikonos ortorrectificada se obtiene un coeficiente de determinación de 0.9796.

También debe mencionarse que sólo las estimaciones a partir de Spot pancromática permiten obtener un R^2 superior al 0.85. Por otra parte el peor modelo se obtiene a partir de estimaciones de superficies realizadas con GPS (Cuadro 29).

Cuadro 29. Modelos de regresión generados a partir del análisis de parcelas con superficies menor a 1 ha.

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R ²)	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (r)
1	Ortofoto	$y = 0.7156x + 1636.8$	0.7126	0.8442
2	Ikonos rectificada	$y = 0.8994x + 1335.7$	0.7431	0.8620
3	Ikonos ortorrectificada	$y = 0.9808x + 229.3$	0.9796	0.9897
4	SP5P rectificada	$y = 0.8495x + 575$	0.7776	0.8818
5	SP5P ortorrectificada	$y = 1.0255x - 107.58$	0.8675	0.9314
6	SP5M rectificada	$y = 0.5478x + 2638$	0.652	0.8075
7	SP5M ortorrectificada	$y = 0.5681x + 2142.1$	0.6776	0.8232
8	GPS	$y = 0.581x + 2878.6$	0.4139	0.6434

Modelos matemáticos para el análisis de parcelas mayores a 1 ha.

Con respecto al análisis anterior, se observa un incremento en los valores de ordenada al origen conforme se incrementa el tamaño de la parcela, lo cual es relativamente lógico, también es importante mencionar la mejora en los modelos con este incremento en el tamaño de las parcelas. El mejor modelo reporta un R^2 de 0.9785, y corresponde a Ikonos ortorrectificada, no obstante para Spot Multiespectral ortorrectificada se obtiene un R^2 de 0.7654 (Cuadro 30).

Cuadro 30. Modelos de regresión generados a partir del análisis de parcelas con superficie mayor a 1 ha.

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R ²)	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (r)
1	Ortofoto	$y = 0.8607x + 2087.2$	0.8288	0.9104
2	Ikonos rectificada	$y = 0.8309x + 3572.9$	0.8873	0.9420
3	Ikonos ortorrectificada	$y = 0.9324x + 1536.3$	0.9785	0.9892
4	SP5P rectificada	$y = 0.665x + 4616.4$	0.8806	0.9384
5	SP5P ortorrectificada	$y = 0.7712x + 3692.7$	0.9179	0.9581
6	SP5M rectificada	$y = 0.6383x + 5807$	0.7982	0.8934
7	SP5M ortorrectificada	$y = 0.7339x + 3946.1$	0.7654	0.8749
8	GPS	$y = 0.869x + 3040.5$	0.8271	0.9095

Modelos matemáticos para el análisis de parcelas de 1 a 2 hectáreas.

Se determinó que para parcelas con tamaño entre 1 y 2 hectáreas, el mejor modelo pertenece a Ikonos ortorrectificada por su pendiente de la recta, ordenada al origen de 558.53 y R² de 0.9214, por el contrario Spot multiespectral rectificada representa al peor modelo con un R² de 0.4819, seguida por GPS con un R² de 0.5016 (Cuadro 31).

Cuadro 31. Modelos de regresión generados a partir del análisis de parcelas con superficie de 1 a 2 hectáreas.

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R ²)	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (r)
1	Ortofoto	$y = 0.5432x + 6044.1$	0.5026	0.7089
2	Ikonos rectificada	$y = 0.9835x + 1330.1$	0.799	0.8939
3	Ikonos ortorrectificada	$y = 1.0098x + 558.53$	0.9214	0.9599
4	SP5P rectificada	$y = 0.6793x + 4073.2$	0.8309	0.9115
5	SP5P ortorrectificada	$y = 0.7878x + 3316.1$	0.8402	0.9166
6	SP5M rectificada	$y = 0.4552x + 7616.5$	0.4819	0.6942
7	SP5M ortorrectificada	$y = 0.5926x + 5150.4$	0.549	0.7409
8	GPS	$y = 0.7117x + 4514$	0.5016	0.7082

Modelos matemáticos para el análisis de parcelas mayores a 2 hectáreas.

El análisis de parcelas mayores a 2 hectáreas permite observar como el valor de ordenada al origen es considerablemente grande, alcanza valores superiores a 12 200 m² en los peores modelos. También el valor de la pendiente de la recta se aleja del valor óptimo (la unidad), llegando a ser de apenas 0.2983 en el peor modelo, el cual es para este caso Spot pancromática

rectificada, esto se considera dado el bajo valor de su R^2 cuyo valor es apenas 0.4515. Para este mismo análisis el mejor modelo es el de Ikonos ortorrectificada (Cuadro 32).

Cuadro 32. Modelos de regresión generados a partir del análisis de parcelas con superficie mayor a 2 hectáreas.

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R^2)	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (r)
1	Ortofoto	$y = 0.6564x + 7962.5$	0.7058	0.8401
2	Ikonos rectificada	$y = 0.4173x + 13720$	0.7058	0.7332
3	Ikonos ortorrectificada	$y = 0.8617x + 3125.7$	0.9174	0.9578
4	SP5P rectificada	$y = 0.2983x + 15223$	0.4515	0.6719
5	SP5P ortorrectificada	$y = 0.4407x + 12267$	0.4857	0.6969
6	SP5M rectificada	$y = 0.3342x + 14836$	0.6653	0.8157
7	SP5M ortorrectificada	$y = 0.3278x + 15435$	0.6788	0.8239
8	GPS	$y = 0.4681x + 13012$	0.8646	0.9298

Modelos matemáticos para el análisis de parcelas simples menores a 1 ha.

Bajo esta condición de agrupación se generó un modelo con el menor valor de ordenada al origen, el cual es igual a 17.414 (Cuadro 33). Esto lo convierte en un modelo recomendable, con $R^2 = 0.9977$ y pendiente de la recta de 1.0157. El haber obtenido un valor de ordenada al origen tan pequeño sugiere la conveniencia de agrupar de esta forma los datos a fin de obtener estimaciones más exactas. Por otro lado, el peor modelo se generó con el análisis de datos estimados a partir de GPS (Cuadro 33).

Cuadro 33. Modelos de regresión generados a partir del análisis de parcelas simples menores a 1 ha.

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R^2)	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (r)
1	Ortofoto	$y = 0.6422x + 1948.4$	0.6414	0.8009
2	Ikonos rectificada	$y = 0.9775x + 959.83$	0.6691	0.7332
3	Ikonos ortorrectificada	$y = 1.0157x + 17.414$	0.9977	0.9988
4	SP5P rectificada	$y = 0.8349x + 548.6$	0.8171	0.9039
5	SP5P ortorrectificada	$y = 1.0616x - 297.73$	0.8691	0.9323
6	SP5M rectificada	$y = 0.5526x + 2214.4$	0.8205	0.9058
7	SP5M ortorrectificada	$y = 0.6288x + 1536.9$	0.8318	0.9120
8	GPS	$y = 0.4774x + 3120.9$	0.3602	0.6002

Modelos matemáticos para el análisis de parcelas simples mayores a 1 ha.

Nuevamente el modelo generado a partir del análisis de datos estimados con GPS significa el peor por su R^2 de 0.6715 y a pesar de haber obtenido un valor de ordenada al origen de 35.556, este no es suficiente para considerarlo como recomendable. Se hace patente la eficacia del tratamiento Ikonos ortorrectificada; con un R^2 de 0.9915 y su pendiente de la recta igual a 1.0015, siendo este el mejor modelo (Cuadro 34).

Cuadro 34. Modelos de regresión generados a partir del análisis de parcelas simples mayores a 1 ha.

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R^2)	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (r)
1	Ortofoto	$y = 1.0026x - 244.31$	0.9123	0.9551
2	Ikonos rectificada	$y = 1.0771x - 140.07$	0.9023	0.7332
3	Ikonos ortorrectificada	$y = 1.0015x + 284.44$	0.9915	0.9957
4	SP5P rectificada	$y = 0.6787x + 3940.4$	0.8958	0.9465
5	SP5P ortorrectificada	$y = 0.7407x + 3566.2$	0.9183	0.9583
6	SP5M rectificada	$y = 0.9025x + 2112$	0.7721	0.8787
7	SP5M ortorrectificada	$y = 1.1437x - 2553.9$	0.7263	0.8522
8	GPS	$y = 1.1133x + 35.556$	0.6715	0.8195

Modelos matemáticos para el análisis de parcelas complejas menores de 1 hectárea.

Es importante aclarar que para este análisis (Cuadro 35), sólo se consideraron tres datos para cada tratamiento; se obtuvieron correlaciones negativas, lo cual puede ser atribuido al insuficiente número de datos analizados, y por consiguiente no se considera oportuno declarar ni al mejor ni al peor modelo.

Cuadro 35. Modelos de regresión generados a partir del análisis de parcelas complejas menores a 1 ha.

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R^2)	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (r)
1	Ortofoto	$y = 1.2376x - 2285.8$	0.6333	0.7958
2	Ikonos rectificada	$y = 0.4759x + 4362.3$	0.538	0.7332
3	Ikonos ortorrectificada	$y = 0.547x + 3599.1$	0.762	0.8729
4	SP5P rectificada	$y = -1.0486x + 16425$	0.9996	0.9998
5	SP5P ortorrectificada	$y = -3.3999x + 34294$	0.8639	0.9295
6	SP5M rectificada	$y = 0.0004x + 7821.2$	1.00E-06	0.0010
7	SP5M ortorrectificada	$y = -0.2705x + 10330$	0.6825	0.8261
8	GPS	$y = 0.8762x + 1678$	0.9163	0.9572

Modelos matemáticos para el análisis de parcelas complejas mayores a 1 hectárea.

Bajo estas condiciones de análisis, con el tratamiento de Ikonos ortorrectificada, se obtuvieron los datos que generaron el mejor modelo matemático, el valor de la pendiente de la recta no ha sido la mejor, en contraparte con los análisis anteriores pues es igual a 0.885 (Cuadro 36), sin embargo al comparar este modelo con los otros generados bajo estas condiciones, es suficiente para ser considerado el mejor con un R^2 de 0.9758.

Como en la mayoría de los casos anteriores el modelo menos recomendable se generó a partir del análisis de datos de estimaciones realizadas con Spot Multiespectral rectificada (Cuadro 36).

Cuadro 36. Modelos de regresión generados a partir del análisis de parcelas complejas mayores a 1 ha

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R ²)	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN	(t)
1	Ortofoto	$y = 0.7894x + 3591.6$	0.7675	0.8761	
2	Ikonos rectificada	$y = 0.7495x + 5256.2$	0.8939	0.7332	
3	Ikonos ortorrectificada	$y = 0.885x + 2575.8$	0.9758	0.9878	
4	SP5P rectificada	$y = 0.6326x + 5605.5$	0.8586	0.9266	
5	SP5P ortorrectificada	$y = 0.7511x + 4482.1$	0.9161	0.9571	
6	SP5M rectificada	$y = 0.5832x + 6928.5$	0.8040	0.8967	
7	SP5M ortorrectificada	$y = 0.6517x + 5804.5$	0.7951	0.8917	
8	GPS	$y = 0.8361x + 3498.1$	0.8807	0.9385	

Modelos matemáticos para el análisis de parcelas complejas mayores a 2 hectáreas.

En general, los modelos generados para parcelas con superficie mayor a 2 ha, no arrojan información consistente, sin embargo a pesar de estas condiciones de análisis, sólo con Ikonos rectificada se ha logrado obtener un modelo donde su R^2 es 0.8505, con valor de la pendiente de la recta de 0.3034 y ordenada al origen de 17,113; considerando estos altos valores se justifica una opción, la del modelo de Ikonos ortorrectificada (Cuadro 37), con una pendiente de la recta igual a 0.741 y una ordenada al origen igual a 6,209.6, que lo hacen una opción recomendable, sobre todo si se recuerda las condiciones bajo las cuales se está realizando el análisis.

Cuadro 37. Modelos de regresión generados a partir del análisis de parcelas complejas mayores a 2 hectáreas.

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R ²)	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (r)
1	Ortofoto	$y = 0.4219x + 14255$	0.6278	0.7923
2	Ikonos rectificadas	$y = 0.3034x + 17113$	0.8505	0.7332
3	Ikonos ortorrectificadas	$y = 0.741x + 6209.6$	0.7547	0.8687
4	SP5P rectificadas	$y = 0.2218x + 18356$	0.6775	0.8231
5	SP5P ortorrectificadas	$y = 0.3264x + 16173$	0.7278	0.8531
6	SP5M rectificadas	$y = 0.194x + 19227$	0.4384	0.6621
7	SP5M ortorrectificadas	$y = 0.2264x + 18719$	0.7571	0.8701
8	GPS	$y = 0.4294x + 14006$	0.5585	0.7473

Como se observa en la mayoría de los análisis, el tratamiento Spot multiespectral rectificadas es el modelo menos recomendable. Puede deberse a falta de exactitud del tratamiento y específicamente a la resolución “baja” de la imagen empleada, en contraste con el mejor tratamiento de la imagen Ikonos con mayor resolución espacial.

6.7. Análisis de resultados en función de la Desviación estándar de las discrepancias (σ_D).

En este trabajo, la unidad de medida es igual a 1 hectárea, y para analizar los resultados de la estimación de superficies se ha considerado como error aceptable un 10 % de esta unidad de medida, es decir 1000 m². Debe aclararse que este criterio del 0.1 de error se adopta para definir en términos globales, al mejor tratamiento. Sin embargo debido a la heterogeneidad en cuanto a su tamaño, puede resultar inadecuado definir bajo este mismo criterio al mejor método en parcelas que son ligeramente mayores a 0.4 ha, lo mismo sucede para las más grandes dado que superan los 2.7 m². Por esta razón y tratando de realizar un análisis completo de los datos, se consideran varias combinaciones de agrupación y donde a partir de la σ_D se define al mejor método en términos globales. Al considerar como mejor método aquel que tenga la menor σ_D , se han realizado los siguientes análisis:

6.7.1. Análisis Global

Cuando se realiza un análisis global, sin lugar a dudas el mejor tratamiento para estimar la superficie es con la imagen Ikonos ortorrectificada, con una σD total de 722.6 m² la estimación con Ikonos ortorrectificada, es mejor que cualquier otro tratamiento (Cuadro 38).

Cuadro 38. Desviaciones estándar de las discrepancias: global y por rango de pendiente.

TRATAMIENTOS	PARCELAS σD (m ²)					
	GLOBAL	RANGO DE PENDIENTE (%)				
		0-9	9.1-19	19.1-29	29.1-39	> 39.1
T-IKOORT	722.60	420.28	1126.92	464.94	187.06	839.83
T-IKREC	1711.46	624.30	1692.25	1771.03	519.91	2426.64
T-SPSPORT	1746.78	797.23	2481.26	785.53	1061.63	2349.23
T-ORTOFO	1956.89	630.66	3035.81	1643.64	672.15	2071.26
T-GPS	2076.14	1586.05	1879.73	2571.38	2473.84	1417.65
T-SP5PREC	2568.57	1766.49	2732.35	934.136	2420.11	3710.86
T-SP5MORT	2594.11	1225.09	2555.41	3240.79	2619.23	2907.05
T-SP5MREC	2991.97	2922.33	3337.21	2022.65	3935.16	3176.51
n =	29	4	6	6	4	9

Ahora bien, los tratamientos restantes están por encima del error aceptable, y si analizamos estos resultados pero considerando la resolución de las imágenes es claro que a mayor resolución menor es el error cometido (Cuadro 38). De este análisis también se obtiene el tratamiento menos recomendable, el cual es el de Spot multiespectral, con la menor resolución espacial y sin haber sido ortorrectificada.

6.7.2. Análisis de la σD por rango de pendiente

Para hacer un análisis más detallado los datos se agruparon por rango de pendiente, de esta manera para cada rango de pendiente se estimó la σD y en base al menor valor se obtuvo al mejor tratamiento

Rango de pendiente 0-9 %.

Los mejores resultados fueron obtenidos de Ikonos ortorrectificada con una σD de $\pm 420 \text{ m}^2$, seguida de Ikonos rectificada ($\sigma D = 624 \text{ m}^2$), Ortofoto ($\sigma D = 630 \text{ m}^2$) y Spot pancromática ortorrectificada ($\sigma D = 797 \text{ m}^2$). Por otro lado, la resolución parece ser un factor determinante en los resultados obtenidos; en este sentido destacan los mejores resultados obtenidos a partir de Ikonos con 1 m de resolución espacial, en contraparte del resultado obtenido a partir de Spot multispectral rectificada cuya resolución espacial es de 10 m. También destaca la conveniencia de analizar los datos agrupados en rangos de pendiente con lo cual se tienen un mayor número de opciones para recomendar (Cuadro 38).

Igual que para el análisis global, se obtuvo el tratamiento menos recomendable y en este caso resultó ser el de Spot multispectral rectificada (Cuadro 38), lo cual confirma que la resolución espacial aun para este tipo de pendientes es un factor que determina el resultado obtenido.

Rango de pendiente 9.1-19 %.

Para este caso no fue conveniente el tipo de análisis utilizado, ya que con ninguno de los tratamientos se obtuvo un valor de error inferior al 0.1, aunque con Ikonos ortorrectificada se mantiene la tendencia de menor valor de error, ya que sobrepasa el límite aceptable. Por otra parte, es claro que Spot multispectral rectificada reportó el mayor valor de error (Cuadro 38).

Rango de pendiente 19.1-29 %.

Para el análisis de para parcelas con este rango de pendiente fue conveniente agruparlos; así, se obtuvo una σD de 464 m^2 para Ikonos ortorrectificada, la cual es inferior al valor de la σD obtenido en el análisis global. Además para este caso se encontraron dos valores inferiores al 0.1 del error aceptable. Estos valores corresponden a la estimación a partir de Spot

pancromática ortorrectificada y Spot pancromática rectificada, con 785 m² y 934 m² respectivamente, donde también el tratamiento menos recomendable resultó Spot multispectral ortorrectificada (Cuadro 38).

Rango de pendiente 29.1-39 %.

En el Cuadro 38 se observa que, en este grupo de parcelas, lo más recomendable es utilizar el tratamiento a partir de imágenes Ikonos ortorrectificadas, seguido por Ikonos rectificada y finalmente el tratamiento Ortofoto. En contraparte, estimar las superficies a partir de imágenes Spot multispectral rectificadas, es impreciso ya que el error es 3935 m².

Rango de pendiente > 39.1 %.

Para este grupo, el más numeroso y con el mayor número de parcelas con pendiente compleja, se ha obtenido que, el único tratamiento recomendable es Ikonos ortorrectificada. Los demás tratamientos están por encima del error aceptable, y en este caso el menos recomendable es Spot pancromática rectificada (Cuadro 38).

6.7.3. Análisis para grupos de rangos de pendiente

El análisis se realiza a fin de determinar la conveniencia de agrupar en rangos de pendiente, por ello se compara con la σD global, significando el primer criterio para definir el mejor tratamiento. Como segundo criterio se tomó que el error fuera \pm de 0.1 como unidad de medida.

Grupo de parcelas con rango de 0-29%

Bajo el criterio de menor σD respecto a la σD global ninguno de los tratamientos es aceptable, pero considerando el segundo criterio, sólo el tratamiento de Ikonos ortorrectificada resulta recomendable para estimar superficies cuando se agrupan las parcelas en pendientes de 0 a 29% (Cuadro 39). De acuerdo con los mismos criterios, el tratamiento menos recomendable es Spot multiespectral rectificada.

Cuadro 39. Desviaciones estándar de las discrepancias: global y por grupos de rangos de pendiente.

TRATAMIENTOS	PARCELAS σD (m ²)	
	GLOBAL	RANGO DE PENDIENTE %
		0-29
		19.1 a > 39.1
T-IKOOORT	722.60	734.83
T-IKREC	1711.46	1491.73
T-SP5PORT	1746.78	1567.23
T-ORTOFO	1956.89	2069.83
T-GPS	2076.14	2383.28
T-SP5PREC	2568.57	1904.70
T-SP5MORT	2594.11	2462.35
T-SP5MREC	2991.98	2683.46
n =	29	16
		19

Grupo de parcelas con rango de 19.1% a mayor

De nueva cuenta el mejor tratamiento resultó ser el de Ikonos ortorrectificada en cuyo caso se obtuvo una $\sigma D = 645 \text{ m}^2$, la cual es inferior al resto. En este análisis se determinó además que el menos recomendable es Spot multiespectral rectificada (Cuadro 39).

6.7.4. Análisis de resultados en base a complejidad y rango de pendiente

Parcelas con pendiente simple

De acuerdo a este análisis, se recomienda separar parcelas en función de su complejidad para reducir la σD . La σD obtenida para ikonos ortorrectificada, cuando se agrupan y analizan únicamente las parcelas con pendiente simple, se reduce a menos del 50 % ($\pm 314 \text{ m}^2$) en comparación con la σD total (Cuadro 40). Por otra parte es notorio que esta forma de agrupar reduce la σD en todos los tratamientos, aunque con ninguno de ellos se obtienen valores inferiores al 0.1 del error aceptable, a excepción del mencionado. Cabe señalar que, el tratamiento menos recomendable fue GPS con una σD de $\pm 2320 \text{ m}^2$.

Cuadro 40. Desviaciones estándar de las discrepancias: global, por complejidad, y por complejidad-grupos de rangos de pendiente

TRAT.	PARCELAS ($\sigma D \text{ m}^2$)						
	GLOBAL	SIMPLES	COMPLEJAS	RANGOS DE PENDIENTE			COM > 19.1 %
				SIM 0-29%	SIM > 19.1%	COM 0-29%	
T-IKOOT	722.60	314.16	995.12	399.36	77.12	1059.87	565.44
T-IKREC	1711.46	1211.83	2173.77	1422.64	1240.26	1645.01	2543.26
T-SPSPORT	1746.78	1469.01	2060.83	1589.41	1020.24	1377.25	2242.05
T-ORTOFO	1956.89	1273.87	2548.62	1560.70	1171.83	2723.89	1286.82
T-GPS	2076.14	2320.84	1861.94	2937.00	1988.45	1624.60	2222.73
T-SP5PREC	2568.57	1851.88	3204.88	2169.63	1058.53	1604.44	3810.37
T-SP5MORT	2594.11	1894.89	3253.18	2121.71	1868.30	3025.51	3898.18
T-SP5MREC	2991.98	2001.04	3799.99	2087.87	1322.89	3125.47	4263.87
n =	29	15	14	9	9	7	10

Parcelas con pendiente compleja

Los resultados indican la magnitud del error cometido cuando el total de las parcelas complejas se agruparon para ser analizadas. En este caso, fue necesario pasar al segundo criterio para definir que Ikonos ortorrectificada es el tratamiento más recomendable cuando las parcelas son agrupadas de esta forma; a pesar del límite del error aceptable de 995 m^2 . Otros dos puntos se destacan en este análisis; el primero es un incremento de la σD en la mayoría de los casos, y específicamente para Spot multiespectral rectificadas que corresponde a $\pm 3800 \text{ m}^2$;

el segundo es el resultado obtenido con el tratamiento GPS, donde la σD es menor al 50 % de la σD del tratamiento menos recomendable para parcelas complejas (Cuadro 40).

Parcelas con pendiente simple entre 0-29%

Se contó con 9 datos para determinar al tratamiento más recomendable cuando las parcelas se agrupan en simples y con pendientes de 0-29%; con base en esto, Ikonos ortorrectificada se considera el mejor tratamiento con una σD de $\pm 399 \text{ m}^2$. En contraste, GPS es el tratamiento menos recomendable con una σD de $\pm 2937 \text{ m}^2$ (Cuadro 40).

Parcelas con pendiente simple mayores de 19.1 %

Aparentemente al agrupar las parcelas simples con pendientes mayores de 19.1 % obtenemos la σD mas pequeña ($\pm 77 \text{ m}^2$), sin embargo, cabe mencionar que este resultado es producto del análisis de 9 datos, de los cuales 7 corresponden a parcelas con superficies menores a 1 hectárea, y por consiguiente se debe cuidar la interpretación que se se de a este análisis, pues el bajo valor de σD puede ser atribuido al tamaño de las parcelas analizadas.

Por otro lado, los resultados indican que para estimar superficies pequeñas, de parcelas individuales con pendientes mayores a 19.1%, se recomienda usar imágenes ikonos ortorrectificadas. De este mismo análisis queda definido que no se recomienda usar imágenes Spot multiespectrales ortorrectificadas y mucho menos GPS dado que estos dos tratamientos reportan los mayores errores (Cuadro 40).

Parcelas con pendiente compleja entre 0-29%

De acuerdo a los dos criterios utilizados para definir al mejor tratamiento, ninguno de ellos se considera recomendable para estimar superficies en parcelas complejas con pendiente de 0-29%. Así, el tratamiento menos recomendable es Spot multispectral rectificada (Cuadro 40).

Parcelas con pendiente compleja mayores de 19.1%

De 10 datos analizados, el mejor tratamiento para estimar superficies en parcelas complejas con pendientes mayores a 19.1%, le corresponde a Ikonos ortorrectificada con una σD de ± 565 m². Un resultado que merece ser mencionado es el obtenido en el tratamiento Spot multispectral rectificada con una σD de ± 4263 m², ya que significa el mayor error al estimar la superficie en terrenos de ladera, puesto que la σD supera al tamaño de la parcela que en este trabajo tiene la menor superficie (Cuadro 40).

Queda claro que, los mayores errores se detectan cuando las parcelas se agrupan en base a complejidad, esto fortalece el supuesto de que a mayor pendiente y complejidad de los terrenos mayor será el error estimado si se realiza a partir de imágenes de satélite de baja resolución espacial. En contraste los menores valores de σD corresponden a las parcelas en pendientes simples. Lo anterior puede estar relacionado con la superficie terrestre irregular, ya que la radiación solar, incide sobre ella de forma completamente vertical (cenit solar) sólo en un momento específico, por lo que la radiancia medida por un sensor suele estar sujeta a la iluminación diferenciada del relieve que resulta de la interacción de su topografía (pendiente y exposición) con la posición solar (elevación y azimut solar) (Eastman, 2006).

También se ha detectado que el tratamiento Ikonos ortorrectificada esta subestimando la superficie independientemente de la forma de analizar los datos obtenidos; este pudiera ser un resultado que refuerza los comentarios de Riaño *et al.*, (2003) y Eastman (2006) quienes mencionan que en relieves montañosos, la radiancia medida por un sensor desde una cobertura de suelo situada en una ladera de exposición umbria (oculta al sol), puede ser

considerablemente menor que aquella medida desde la misma cobertura de suelo situada en una ladera de exposición solana (expuesta al sol), dificultando el cálculo fidedigno de algún parámetro, pues el comportamiento espectral es alterado por la presencia de sombras.

Además, se pone de manifiesto la importancia de la resolución espacial de las imágenes, pues debe apuntarse la correspondencia del mayor error con la menor resolución espacial de las imágenes y viceversa.

6.7.5. Análisis en base a tamaño de la parcela

Para analizar los resultados con base en el tamaño de las parcelas, se toman los mismos criterios de evaluación. El mejor tratamiento es aquel donde se obtenga una σD inferior a la σD del global, si este criterio no se cumple entonces se tomará como mejor tratamiento aquel donde se obtenga una σD inferior al 0.1 de la unidad de medida, es decir 1000 m².

Cuadro 41. Desviaciones estándar de las discrepancias: global y por tamaño de las parcelas

TRATAMIENTOS	PARCELAS (σD m ²)				
	GLOBAL	< 1 ha	> 1 ha	1 - 2 ha	> 2 ha
T-IKOOT	722.60	247.31	861.42	787.24	820.13
T-IKREC	1711.46	886.24	2038.68	1259.26	3278.07
T-SP5PORT	1746.78	626.39	2128.68	1319.01	2865.37
T-ORTOFO	1956.89	1086.20	2316.64	2592.42	1757.35
T-GPS	2076.14	1537.59	2309.00	2139.08	2815.65
T-SP5PREC	2568.57	853.26	3088.03	1670.82	4393.17
T-SP5MORT	2594.11	1451.25	3053.42	2366.15	4484.54
T-SP5MREC	2991.98	1528.66	3569.83	3085.64	4340.35
n =	29	10	19	13	6

Parcelas menores de 1 ha.

Se recomienda utilizar los tratamientos Ikonos ortorrectificada y Spot pancromática ortorrectificada, para estimar superficies pequeñas; ambos cubren el primer criterio de evaluación, ya que reportan valores de σD inferiores a la σD del total (± 247 m² y ± 626 m²

respectivamente); por su parte los tratamientos Spot pancromática rectificada e Ikonos rectificada también se consideran recomendables pues cumplen con el segundo criterio al tener una σ_D inferior al 0.1 de error aceptable (Cuadro 41).

Con los resultados obtenidos, se aclara que la disminución en el error puede ser atribuida al tamaño de las parcelas analizadas y no necesariamente a la exactitud del tratamiento.

Parcelas mayores de 1 ha.

Se agruparon para ser analizados datos de 19 parcelas con superficie mayor de 1 ha, sin considerar la complejidad del terreno ni el grado de pendiente. Del análisis se obtuvo que únicamente el tratamiento de Ikonos ortorrectificada es recomendable para estimar la superficie en terrenos de ladera. Con este mismo análisis se determinó que ninguno de los otros tratamientos se recomienda para el mismo propósito y bajo las mismas condiciones, ya que no se obtuvo un valor inferior al 0.1 de error aceptable (Cuadro 41).

Parcelas entre 1 y 2 ha

Analizando bajo las condiciones del caso inmediato superior se encuentra un claro efecto del tamaño de la parcela al separar y analizar los datos de manera tal que se elimine la mayor fuente de error (la diferencia en tamaño de una parcela a otra). Se determinó que el mejor tratamiento para estimar las superficies entre 1 y 2 hectáreas es Ikonos ortorrectificada. Con esta forma de agrupar, también se determinó que el tratamiento menos recomendable es Spot multispectral rectificada (Cuadro 41).

Parcelas mayores de 2 ha

El tratamiento Ikonos ortorrectificada cumple con el criterio del 0.1 de error aceptable con una σD de $\pm 820 \text{ m}^2$ (Cuadro 41). Es probable que por el tamaño de las parcelas se haya obtenido los mayores valores de σD : Spot multispectral rectificada ($\pm 4 \text{ 340 m}^2$), Spot pancromática rectificada ($\pm 4 \text{ 393 m}^2$) y Spot multispectral ortorrectificada (4 484 m^2), siendo este último uno de los valores de σD más alto.

En este caso en particular los altos valores son aceptable si consideramos que los datos analizados son mayores a dos hectáreas, entendiéndose que existe una correspondencia entre el tamaño de la superficie analizada con la magnitud del error que puede ser cometido.

6.7.6. Análisis en base a tamaño y complejidad de las parcelas

Cuadro 42. Desviaciones estándar de las discrepancias: global y por complejidad-tamaño de las parcelas

TRATAMIENTOS	PARCELAS ($\sigma D \text{ m}^2$)						
	GLOBAL	SIM < 1ha	SIM > 1ha	COM < 1ha	COM > 1ha	COM > 2 ha	
T-IKOORT	722.60	88.96	412.30	501.39	1092.35	1033.49	
T-IKREC	1711.46	1012.43	1433.96	606.86	2457.98	3828.94	
T-SP5PORT	1746.78	643.36	1975.53	723.28	2326.34	3266.24	
T-ORTOFO	1956.89	1313.59	1327.86	359.01	2901.44	2215.31	
T-GPS	2076.14	1820.73	2596.92	183.56	2118.79	2125.50	
T-SP5PREC	2568.57	815.27	2475.99	1122.91	3555.37	5236.09	
T-SP5MORT	2594.11	1190.51	2394.22	2254.26	3559.09	5360.14	
T-SP5MREC	2991.98	1489.72	2182.38	1765.89	4217.93	5072.16	
n =	29	7	8	3	11	4	

Parcelas con pendiente simple y menores a 1 ha

Con una σD de $\pm 88.9 \text{ m}^2$, se ha determinado que es conveniente agrupar los datos en base a complejidad y tamaño de parcela. El mejor tratamiento le corresponde a Ikonos ortorrectificada. También es importante mencionar la σD para Spot pancromática

ortorrectificada de $\pm 643 \text{ m}^2$, la cual es inferior a la σD del análisis global; otro caso importante lo observamos en Spot pancromática rectificadas, donde se obtiene una σD de $\pm 815 \text{ m}^2$, que es inferior al 0.1 del error aceptable (Cuadro 42).

El análisis indica además, que las estimaciones con el tratamiento GPS es el menos recomendable bajo esta forma de agrupación. Se puntualiza que la σD se originó de analizar superficies pequeñas.

Parcelas con pendiente simple y mayores a 1 ha

Para el caso de parcelas mayores a una hectárea y con pendiente simple, la menor σD se obtuvo en Ikonos ortorrectificada ($\pm 412 \text{ m}^2$), en contraste, el tratamiento GPS obtuvo la mayor σD ($\pm 2596 \text{ m}^2$), por lo tanto, se convierte en el tratamiento menos recomendable. Lo anterior se aprecia en el Cuadro 42.

Parcelas con pendiente compleja y menores a 1 ha

Cinco de los tratamientos probados resultaron ser recomendables y lo más interesante es observar la σD de GPS (183 m^2), la cual es 60% menor que la σD para Ikonos ortorrectificada, que ha representado en la mayoría de los casos la σD más pequeña (Cuadro 42). No menos importante es señalar la σD en la ortofoto, en cuyo caso también es menor a la σD en Ikonos ortorrectificada. El tratamiento menos recomendable es Spot multiespectral ortorrectificada.

Cabe señalar que para este análisis, sólo se contó con tres datos y que estos corresponden a parcelas menores de 1 ha, por lo cual los resultados pueden ser atribuidos al insuficiente número de datos analizados y al menor tamaño de las parcelas, y por consiguiente se debe cuidar la interpretación que se de a este análisis.

Parcelas con pendiente compleja y mayores de 1 ha

Después de agrupar sólo las parcelas complejas mayores de 1ha, se observa que ninguno de los tratamientos es recomendable para hacer la estimación de superficies, además puede observarse una tendencia al incremento de la σD (Cuadro 42).

Parcelas con pendiente compleja y menores de 2 ha

Con base en este análisis se confirma que para parcelas complejas y con superficie mayor de dos hectáreas, la estimación es imprecisa. La σD de 5360 m² le corresponde a Spot multispectral ortorrectificada (Cuadro 42), que equivale al mayor valor.

6.7.7. Análisis de resultados sin incluir el tratamiento de Ikonos.

En el supuesto de no contar con una imagen de alta resolución como Ikonos, sería preciso seleccionar al mejor tratamiento entre los restantes, es decir, de aquellos basados en imágenes Spot, Ortofotos y GPS. Al trabajar bajo este supuesto, y considerando la σD para definir que tratamiento sería recomendable, se ha determinado lo siguiente:

Análisis global y por rango de pendiente.

En caso de un análisis global ninguno de los tratamientos sería recomendable, por lo tanto al analizar por rango de pendiente, se presenta la opción de encontrar el mejor tratamiento, así para pendientes de 0-9% se recomienda estimar, en orden de importancia, a partir de Ortofoto y Spot pancromática ortorrectificada. Para pendientes de 9.1- 19% ninguno de los tratamientos es recomendable; para pendientes de 19.1-29% en primer lugar esta Spot pancromática ortorrectificada seguida de Spot pancromática rectificada. Para pendientes de 29.1 a 39 % lo

mejor es utilizar la ortofoto. Finalmente para pendientes mayores a 39.1 %, ninguno de los tratamientos es recomendable y sólo la estimación con GPS es la menos errónea (Cuadro 38).

Bajo las condiciones de los análisis realizados, considerando el rango de pendiente de las parcelas, en ninguno de los casos la estimación a partir del GPS debe ser recomendada, ya que la σD más baja fue de 1,417.65 m².

Los mejores tratamientos cuando no se considera a Ikonos, indica la inexistencia de un tratamiento recomendable, esto debido a la diferencia en tamaño de las parcelas. Dentro de este grupo están la parcela más grande y la más pequeña (27,017 m² y 4,137 m² respectivamente), razón por la cual la σD es alta en la mayoría de los casos.

Se debe señalar la importancia de las ortofotos como una buena opción, esto en caso de no contar con imágenes Ikonos, ya que estas cuentan con una resolución espacial de 2 metros y lo más importante es que éstas están ortorrectificadas. La desventaja de estas es su limitada capacidad para discriminar cultivos debido a su resolución espectral, sin embargo para los fines de este trabajo esa característica deja de ser una limitante, pues ese no el objetivo.

Análisis agrupando los rangos de pendiente

Cuando se agruparon las parcelas con rangos de pendiente 1, 2 y 3 (0-29%), ninguno de los tratamientos esta por debajo del 0.1 del error aceptable. Y bajo estas condiciones el tratamiento menos erróneo es Spot pancromática ortorrectificada. Para los rangos de pendiente 3, 4 y 5 (19.1 a > 39.1%) no hubo un tratamiento que este por debajo del 10% del error aceptable. Sin embargo cabe destacar que los tratamientos Spot pancromática ortorrectificada y ortofotos tienen una σD que difiere sólo en 6 m², lo anterior se observa en el Cuadro 39.

Análisis con agrupación de parcelas por complejidad y rango de pendiente

Se observa que al agrupar las parcelas por su complejidad en: simples; complejas; simples con pendiente de 0 a 29%; simples de 19.1 a mayor de 40%; complejas de 0 a 29% y complejas de

19.1 a más 40%, en ningún tratamiento se obtuvo una σD inferior a 1,000 m² (Cuadro 40), lo cual significa que en ninguno de estos casos se recomienda estimar la superficie con alguno de los tratamientos restantes, a menos que se tome un margen de error mayor.

Con la salvedad de aceptar un margen de error mayor, y poder dar una recomendación, para parcelas con pendiente simple y parcelas complejas de 19.1 a mayor de 39.1%, únicamente la estimación a partir de ortofotos sería recomendable; por su parte Spot pancromática ortorrectificada podría recomendarse para estimar la superficie en parcelas con pendiente simple de 19.1 a mayor de 39.1% y para estimaciones en parcelas complejas con pendientes de 0 a 29% (Cuadro 40).

Análisis donde se agruparon parcelas por tamaño.

Se recomienda usar Spot pancromática ortorrectificada y Spot pancromática rectificada para estimar superficies menores de 1 ha, y sólo en caso de ser necesario Spot pancromática ortorrectificada para estimar superficies de 1 a 2 hectáreas con un 13 % de error (Cuadro 41). En parcelas mayores de 1 ha el menor porcentaje de error (21%) corresponde a Spot pancromática ortorrectificada, y en parcelas mayores de 2 ha el menor error (17.5%) corresponde al tratamiento de la Ortofoto (Cuadro 41).

Análisis con agrupación de parcelas por tamaño y complejidad.

En las parcelas de menor tamaño con pendiente simple, la σD indica que tanto Spot pancromática ortorrectificada como rectificada, ambas son recomendables (Cuadro 42), esto con el criterio de una σD inferior a 1000 m². Sin embargo, se debe tener presente que, las parcelas no llegan a 1 ha, y por lo tanto una σD de 643.36 m² representa un error mayor al 0.1 del error aceptable. Lo anterior se debe a que, el tamaño promedio de las parcelas estimado con Spot pancromática ortorrectificada, es 5,891 m² por lo cual el error cometido es mayor al 10%.

Para parcelas simples y mayores de 1 ha (Cuadro 42), el menor error cometido pertenece a estimaciones con la Ortofoto (13%), el cual debe ser considerado una alternativa para estimar superficies.

En las parcelas complejas y sobre todo en aquellas con superficie mayor de 1 ha, se dificulta estimar la superficie a partir de imágenes captadas por sensores remotos, prueba de ello es el alto margen de error obtenido, el cual es mayor al 20% para cualquier tratamiento (Cuadro 42). Por esta razón se debe considerar el uso de imágenes de mayor resolución espacial para este propósito.

6.7.8. Coeficientes de ajuste obtenidos.

Para poder aplicar los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, se obtuvieron en total 184 coeficientes de ajuste, estos se generaron para cada tipo de imagen y bajo diferentes situaciones: rango y complejidad de la pendiente, tamaño de la parcela y las posibles combinaciones entre estas variables.

En el Cuadro 43 se muestran los 184 coeficientes generados; señalando, que estos se obtuvieron de dividir la superficie obtenida en campo por medio de levantamiento topográfico (Testigo absoluto), entre la superficie obtenida en cada uno de los tratamientos estudiados.

Estos coeficientes abren la posibilidad de dar una recomendación sobre el tipo de imagen a utilizar, es decir, se recomendará una imagen u otra en función de las condiciones de pendiente y superficie de las parcelas. Así, por ejemplo, en parcelas complejas y con pendiente de 19.1 a mayor de 39%, para obtener dato cercano a la realidad, cuando la superficie se haya estimado a partir de imágenes Spot pancromáticas ortorrectificadas, se deberá utilizar el coeficiente de ajuste de 0.969.

Cuadro 43. Coeficientes de ajuste para los tratamientos generados ($K=SC/SI$)

PARCELAS	TRATAMIENTOS										n=
	Ortofoto	IKOREC	SP5PREC	SP5MREC	SP5PORTO	SP5MORTO	IKO		GPS		
							ORTO	GPS			
Global	0.979	1.069	0.921	0.968	0.993	0.939	1.025	1.059	29		
0-9%	0.971	1.038	0.906	1.025	0.973	0.973	1.007	0.978	4		
9.1-19%	0.932	1.050	0.944	0.945	1.015	0.963	1.019	1.165	6		
19.1-29%	0.980	1.143	0.968	1.019	1.000	0.999	1.014	0.987	6		
29-39%	0.960	1.069	0.844	0.811	0.945	0.849	1.025	1.125	4		
> 39.1	1.038	1.060	0.910	0.996	0.997	0.901	1.048	1.041	9		
0-29%	0.956	1.073	0.941	0.986	1.000	0.976	1.014	1.057	16		
19.1 a >39.1%	1.005	1.087	0.914	0.964	0.988	0.920	1.033	1.037	19		
SIMPLES	0.977	1.091	0.928	1.003	0.990	0.936	1.021	1.084	15		
COMPLEJAS	0.979	1.054	0.916	0.945	0.996	0.941	1.028	1.042	14		
SIM 0-29%	0.958	1.065	0.916	1.052	0.962	0.975	1.022	1.077	9		
SIM 19.1 a >39.1%	0.982	1.144	0.958	0.922	1.030	0.903	1.014	1.056	9		
COM 0-29%	0.954	1.081	0.966	0.929	1.040	0.978	1.007	1.037	7		
COM 19.1 a >39.1%	1.016	1.060	0.894	0.987	0.969	0.928	1.043	1.027	10		
< 1ha	0.956	1.131	0.932	0.920	1.009	0.846	1.017	1.041	10		
> 1ha	0.983	1.057	0.919	0.978	0.990	0.961	1.027	1.062	19		
1 A 2 ha	0.972	1.089	0.967	1.025	1.039	0.950	1.053	1.062	13		
> 2 ha	0.998	1.018	0.864	0.924	0.933	0.975	0.996	1.063	6		
SIM < 1ha	0.954	1.165	0.920	0.880	1.011	0.847	1.019	1.003	7		
SIM > 1ha	0.986	1.067	0.932	1.056	0.982	0.973	1.022	1.116	8		
COM < 1ha	0.958	1.076	0.954	1.003	1.005	0.844	1.013	1.115	3		
COM > 1ha	0.982	1.051	0.912	0.938	0.995	0.954	1.030	1.034	11		
COM > 2ha	1.003	0.997	0.874	0.888	0.953	0.947	0.991	0.997	4		

Por otra parte estos coeficientes de ajuste permiten conocer con que tratamientos se subestima y con cuales se sobreestima la superficie. En este sentido, las estimaciones realizadas a partir de la imagen Ikonos rectificadas y ortorrectificadas subestiman la superficie, en tanto que con los tratamientos restantes ocurre lo contrario, es decir la superficie se sobreestima.

VII. CONCLUSIONES

Como conclusiones de la presente investigación, se destaca lo siguiente:

- a) En este trabajo se comprobó que para la mayoría de las estimaciones realizadas, la pendiente del terreno limita la determinación exacta de la superficie cultivada cuando se realiza a partir de imágenes satelitales y ortofotos digitales.
- b) Esta investigación ha sido útil para determinar que para parcelas con pendientes superiores de 9%, se obtienen resultados más inexactos en la estimación de la superficie cultivada cuando ésta se realiza exclusivamente a partir de imágenes de satélite. Se demostró que a mayor pendiente y complejidad del terreno, los errores detectados son mayores cuando las estimaciones se realizan a partir de imágenes de satélite de resolución media como es el caso de Spot multiespectral. Sin embargo, las estimaciones a partir de la clasificación de la imagen Ikonos ortorrectificada no presentaron los mismos resultados que las imágenes Spot y por el contrario son las más parecidas a las estimaciones con levantamiento topográfico.
- c) La estimación de superficie cultivada en terrenos de ladera, se mejora sustancialmente cuando se consideran el ángulo de elevación solar, el ángulo de incidencia de las imágenes de satélite y el Modelo de Elevación Digital para eliminar el efecto del relieve a partir de la ortorrectificación. Los resultados obtenidos de esta corrección, se encuentran en gran medida sujetos a la información obtenida a partir del Modelo de Elevación Digital. Se obtienen datos más exactos una vez que las imágenes son ortorrectificadas, es decir la ortorrectificación reduce la variación de la estimación de superficie.
- d) La metodología para generar estimaciones exactas en superficies cultivadas en terrenos de ladera, se basa en el producto de las estimaciones sobre imágenes con coeficientes de ajuste. Los coeficientes de ajuste generados, para los diferentes tratamientos, permiten hacer recomendaciones que llevan a estimaciones más cercanas a los datos obtenidos con levantamientos topográficos.

- e) Mediante el estudio realizado se pudo detectar que los mayores errores se cometen cuando las parcelas se agruparon en base a su complejidad.
- f) En este trabajo la baja resolución espacial del tratamiento Spot 5 multiespectral no permitió obtener resultados confiables, lo cual también se debió al tamaño de las parcelas que dominan en el área de estudio.
- g) Para la estimación de superficie cultivada usando sensores remotos, se encuentran los siguientes problemas:
1. Algunos métodos que tienen gran exactitud en áreas planas se convierten en inválidos a nivel de pequeñas superficies en laderas.
 2. Algunos métodos que son efectivamente aplicados en pequeñas áreas no pueden ser aplicados debido a su alto costo. Por lo tanto, la metodología para la estimación de superficie de cultivo en laderas deberá tener las siguientes propiedades:
 - Suficiente exactitud para soportar decisiones
 - Suficiente rapidez para cumplir con el tiempo requerido por la sección de aplicación.
 - Tener criterios unificados y poder ser operado fácilmente

VIII. RECOMENDACIONES

- a) Para obtener un máximo de exactitud en las estimaciones de superficies se recomienda utilizar imágenes de la mayor resolución espacial posible, y preferentemente que estas imágenes pasen por un proceso de ortorrectificación.
- b) En particular, para este estudio la recomendación es emplear imágenes Ikonos ortorrectificadas. Sin embargo, debemos considerar la utilización de imágenes Spot pancromáticas o multiespectrales, ya que en México se cuenta con una estación de recepción de imágenes de este satélite. Se menciona lo anterior por el costo que puede significar la adquisición de imágenes comerciales, de alta resolución, como los son Ikonos y Quick Bird, y por el contrario la adquisición de imágenes Spot puede ser gratuita para los centros de investigación en México.
- c) Los factores de ajuste en el presente estudio, son específicos para los tratamientos estudiados y no pueden ser aplicados para otro escenario sin hacer las adaptaciones necesarias, ya que las constantes utilizadas para las correcciones se calcularon con respecto a las parcelas de interés, por lo cual no se debe asumir que estas constantes den la misma respuesta en otro tipo de parcelas.
- d) Tomando en cuenta los problemas metodológicos del diseño de la muestra, para futuros estudios, se recomienda hacer una buena selección de tratamientos y tener un control mas estricto del tamaño de las parcelas, para obtener mejores factores de ajuste a partir de imágenes ortorrectificadas y rectificadas, lo cual a su vez permitirá por un lado una evaluación de los coeficientes de ajuste generados y por otro definir su confiabilidad.

IX. LITERATURA CITADA

- Akiyama, T. and Inoue Y. 1996. Monitoring and predicting crop growth and analyzing agricultural ecosystems by remote sensing. *Agric. Food Sci.* in Finland 5:367-376.
- Aronoff S. 2005. Remote sensing for GIS managers. New York, USA. ESRI Press. 487 p.
- Bauer, M. E., J. E. Cipra., P. E Anuta., and J. B. Etheridge. 1979. Identification and Area Estimation of Agricultural Crops by Computer Classification of LANDSAT MSS Data. *Remote Sensing of Environment* 8:77-92.
- Benedetti, R. and P. Rossini. 1993. On the use of NDVI profiles as a tool for agricultural statistics: the case study of wheat yield estimate and forecast in Emilia Romagna. *Remote Sensing. Environment.* 45:311- 326.
- Bolaños-González, M., E. Palacios-Vélez, C. Scott y A. Exebio-García 2001. Estimación del volumen de agua usado en una zona de riego mediante una imagen de satélite e información complementaria. *Agrociencia.* 35: 589-597
- Bosque J., F. Escobar, E. García y M. Salado. 1994. Sistemas de información geográfica: prácticas con PC ARC-Info e IDRISI: Delaware, Iberoamericana. 478 p.
- Burrough, P. A. and R. A. McDonnell, 1998. Principles of Geographical Information Systems. Spatial Information Systems, Oxford University Press, New York. 333 p.
- Campbell, J.B. 1996. Introduction to Remote Sensing. Second edition. The Guilford Press. New York. 622 p.
- Canada Centre for Remote Sensing (CCRS). 2004. Fundamentals of remote sensing. http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/tutorials/fundam/chapter1/chapter1_1_e.html.
- Disponible al 2 de marzo de 2007.

- Chuvieco, S. E. 1990. Fundamentos de la Teledetección Espacial. Ediciones Rialp. Madrid, España. 427 p.
- Chuvieco, S. E. 1996. Fundamentos de teledetección espacial. 3 ed. Madrid, España. Ediciones Rialp. pp. 370-385, 386, 558
- Chuvieco, S. E. 2002. Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio. Ariel Ciencia, Barcelona, España. 586 p.
- CIREN. 1999. http://www.ciren.cl/_datos/archivo/pdf/suelos/e8matsim.pdf. Disponible al 03 de junio de 2007.
- Cuartero, A. y A. M. Felicísimo. 2003. Rectificación y ortorrectificación de imágenes de satélite: análisis comparativo y discusión. *GeoFocus*. 3: 45-57.
- Daughtry, C. S. T., K. P. Gallo, S. N. Goward, S. D Prince and W. P. Kustas. 1992. Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies. *Remote Sens. Environ.* 39:141 -152.
- Díaz, V. P., F. J. Cortés I., F. Turrent A., C. A. Ortiz, S. y A. Martínez G. 2004. La etnoagricultura en laderas de México y su reingeniería para su reconversión sustentable. [SUSTENTABLEhttp://www.colpos.mx/proy_rel/ladera/Word/TAS%20Publicaciones01.pdf](http://www.colpos.mx/proy_rel/ladera/Word/TAS%20Publicaciones01.pdf). Disponible al 07 de marzo de 2007.
- Duda, R. D. and P. E. Hart. 1973. *Pattern Classification and Scene Analysis*. John Wiley & Sons. New York. 482 p.
- Eastman, R. 2006. *Idrisi Andes guide to GIS and image processing*. Worcester, USA. Clark University. 328 p.

ENAPROVE, 2004. http://www.agroancash.gob.pe/enaprove/tomo_1_caract_geo.htm. Disponible al 14 de agosto de 2007.

ERDAS Inc. 2001. ERDAS IMAGINE, Tour Guides. Atlanta, Georgia, EU

Felicísimo, M. A. 1994. Modelos Digitales del Terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. <http://www.etsimo.uniovi.es/~feliamfeli@unex.es>. Disponible al 10 de agosto del 2006.

Foody, G. and D. Boyd. 2005. Mapping tropical forest biophysical properties from coarse spatial resolution satellite sensor data: applications of neuronal networks and data fusion. http://divvom.otago.ac.nz/sirc/geocomp/geocomp98/45/gc_45-htm. Disponible al 06 de marzo del 2007.

Franklin, S. E. 1991. Image transformations in mountainous terrain and the relationship to surface patterns. *Computers & Geosciences*. 17 (8): 1137- 1149

Franklin, S. E. 2001. Remote Sensing for Sustainable Forest Management. Lewis Publishers. 407 p.

García, E. G. y H. A. López. 2003. Modelos digitales de elevación del terreno: uso en la geología estructural. *Notas. Revista de información y análisis* 22:77-87.

García, M. 2005. Respuesta de la vegetación a variaciones climáticas en praderas y sistemas adhesados Mediterráneos. Metodología de análisis utilizando datos hiperespectrales y multiespectrales. <http://www.aect.org/ecosistemas/articulo2.htm> Disponible al 12 de enero de 2007.

Geoeye. 2006. <http://www.spaceimaging.com/products/ikonos/index.htm>. Disponible al 02de noviembre de 2006

- Gónima, L. y V. Durango J. 2005. Aplicaciones ambientales de imágenes digitales de satélite. *GeoTropico*. 3(1):21-30. http://www.geotropico.org/3_1_Gonima.pdf. Disponible al 1 de febrero de 2007.
- González, A. F., S. López, S. y J. Cuevas G. 1990. Influencia de la información obtenida en imágenes de satélite sobre la exactitud de la estimación de la superficie cultivada de cereal en una zona piloto de la comunidad autónoma de Navarra. Madrid, España. Pp:1-10.
- González A. F. y J. Cuevas M. 1993. Estadísticas agraria y teledetección. Una nueva forma de aplicar el estimador de regresión. *Revista de Teledetección*. 1: 1-3.
- González, C., A Méndez-Moreno, M. García P., M. González R. y E. Sáez-García. 2001. Un método sencillo para la corrección topográfica de imágenes de satélite. *Mapping Interactivo*. Revista internacional de ciencias de la tierra. http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=103. Disponible al 8 de noviembre de 2006.
- Gupta, R. K. 1993. Comparative study of AVHRR ratio vegetation index and normalized difference vegetation index in district level agricultural monitoring. *Int. J. Remote Sens*. 14:53-73.
- Heuvelink, G. B. M. 1998. Error propagation in environmental modeling with GIS. *Research Monographs in Geographic Information Systems*. Taylor & Francis, Bristol. 127p.
- Hoffhine, E. and S. Sader. 2002. Detection of harvest type using dates of Landsat TM imagery. *Remote Sensing of environment*. 80: 385-396.
- Holmes, K. W., O. A. Chadwicka and P. C. Kyriakidisb. 2000. Error in a USGS 30-meter digital elevation model and its impact on terrain modelling. *Journal of Hydrology*. 233:154-173.
- Hopkins, P. F., A. L. Maclean and T. M. Lillesand. 1988. Assessment of Thematic Mapper imagery for forestry applications under lake states conditions. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 54: 61-68.

INEGI. 2000. http://www.inegi.gob.mx/prod_serv/contenidos/espanol/catalogo. Disponible al 28 de enero del 2008.

Itten, K. I. and P. Meyer, 1993. Geometric and Radiometric Correction of TM Data of Mountainous Forested Areas. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing. 31 (4): 764-770.

Iturrate, E. 1998. Curso básico de Teledetección con ENVI. Estudio Atlas S.L <http://www.innovanet.com.ar/gis/TELEDETE/TELEDETE/teledete.htm>. Disponible al 18 de abril del 2007.

Jensen, J. R. 1996. Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. Prentice Hall. New Jersey, USA. 318 p.

Lillesand, T. M., R.W. Kiefer and J.W. Chipman. 2004. Remote sensing and image interpretation. New York, USA. Wiley. 763 p.

Lira, J. 1995. La Percepción Remota: nuestros ojos desde el espacio. <http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/33/htm/percep.htm>. Disponible al 7 de febrero de 2006.

Liu, X., M. Kafatos, R. Gomez B., H. Wolf. 2005. Multi_angular Satellite Remote Sensing and forest inventory data for carbon stock and sink capacity in the eastern United States forest ecosystems. www.isprs.org/istanbul2004/comm1/papers/101.pdf. Disponible al 17 de Julio de 2007.

Liu, W. T. H., O Massambani and C.A. Nobre. 1994. Satellite recorded vegetation response to drought in Brazil. Int. J. of Climatology 14: 343-354.

López-Rodríguez, R., N. Sánchez-Martín, S. Martín-Alfageme, F. Santos-Francés y R. Morales-Cortes. (2004). Utilización de un SIG para la evaluación de la potencialidad agrológica en la comarca de Tierra de Alba (Salamanca). GeoFocus. 4: 25-43.

Malacara, D. 1997. Óptica Tradicional y Moderna.
<http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/084/htm/optica.htm>.

Disponible al 07 de febrero de 2007.

Méndez M. A, G. Recondo C., M. González M. R., M. García P., Sáez G. E. 2001. Un método sencillo para la corrección topográfica de imágenes de satélite: Aplicación a imágenes Landsat-TM de los Concejos de Mieres y San Martín del Rey Aurelio (Asturias) para obtener mapas de vegetación. *Mapping Interactivo*. 67: 24-34.

Metternicht, G. 2001. Assessing temporal and spatial changes of salinity using fuzzy logic, remote sensing and GIS. *Foundations of an expert system. Ecological Modeling*. 144:163-179.

Meyer, P., K. I. Itten, T. Kellenberger, S. Sandmeier. And R. Sandmeier. 1993. Radiometric corrections of topographically induced effects on Landsat TM data in an alpine environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 48 (4) : 17-28.

Mitri, G. H. and I. Z. Gitas. 2004. Performance evaluation of a burned area object-based classification model when applied to topographically and non-topographically corrected TM imagery. *Remote Sensing*. 25 (14):2863-2870.

Ozdogan, M. and C. E. Woodcock. 2006. Resolution dependent errors in remote sensing of cultivated areas. *Remote Sensing of Environment*. 103 (2): 203-217.

PCI Geomatics: “OrthoEngine”. Versión 8.2. 2001. West Wilmot Street, Richmond Hill, Canada.

Peña, A. M. A. 2007. Correcciones de una imagen satelital ASTER para estimar parámetros vegetacionales en la cuenca del río Mirta, Aisén. *BOSQUE*. 28(2): 162-172.

Peyrot, R. y R. de la Sierra. 2004. <http://www.siap.sagarpa.gob.mx/mexsai/presentacion/p49.pdf>. Disponible al 10 de octubre de 2006.

- Prados, M. 1995. Teledetección Agricultura y Medio Ambiente: el empleo de imágenes Landsat-% en el seguimiento y evaluación estadística de los regadíos en la cuenca baja de Guadaquivir. Madrid . Ministerio de Agricultura , Pesca y Alimentación. 250 p.
- Quarmby, N. A., M. Milnes, T. L. Hindle and N. Silleos. 1993. The use of multi-temporal NDVI measurements from AVHRR data for crop yield estimation and prediction. *Int. J. Remote Sens.* 14(2): 199-210.
- Reyes, H. H., R. Aguilar M., J. R. Aguirre R. y V. Trejo I. 2006. Cambios en la cubierta vegetal y uso del suelo en el área del proyecto Pujal-Coy, San Luis Potosí, México, 1973-2000. *Investigaciones Geográficas.* 59: 26-42.
- Riaño, D., J. Chuvieco S. e I. Aguado 2003. Assessment of different topographic corrections in Landsat-TM data for mapping vegetation types. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41(5): 1056-1061.
- Rogan, J., J. Franklin and D. Roberts. 2001. A comparison of methods for monitoring multitemporal vegetation change using Thematic Mapper imagery. *Remote Sensing of Environment.* 79: 1-14
- Salamanca, M. J. 2005. Enciclopedia de los Municipios de México. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, Gobierno del Estado de México. <http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/mexico/mpios/15089a.htm>. Disponible al 10 de octubre de 2006.
- Salvador, R., X. Pons, y F. Diego. 1996. Validación de un método de corrección radiométrica sobre diferentes áreas montañosas. *Revista de teledetección.* 7:1-5
- Sánchez, N. y G. Santos. 2004. Obtención de productos cartográficos a gran escala mediante imágenes de alta resolución espacial. En *Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales.*

Análisis mediante Tecnología SIG y teledetección. Conesa, C., Álvarez, Y., Martínez, J.B., eds. Universidad de Murcia. 1: 287-299.

Sandoval, M. Y. 2003. Monitoreo de quemas de pastizales y cuantificación de superficies devastadas por incendios forestales mediante imágenes NOAA-AVHRR y LANDSAT ETM 7+. <http://gis.esri.com/library/userconf/latinproc03/ponencias/P21.pdf>. Disponible al 05 de junio de 2006.

Shanahan, J. F., J. S. Schepers, D. D. Francis, G. E. Varvel, W. W. Wilhelm, J. M., Tringe, M. R. Schlemmer and D. J. Major. 2001. Use of Remote-Sensing Imagery to Estimate Corn Grain Yield. *Agronomy Journal*. 93:583-589.

Shepherd, J. D. and J. R. Dymond. 2003. Correcting satellite imagery for the analyses of reflectance and illumination with topography. *Analyses of National Journal of Remote Sensing*. 24: 3503-3514.

SIAP. 2007. <http://www.siap.gob.mx/>. Disponible al 10 de enero de 2008.

Slater, P. N. 1980. Remote sensing. Optics and optical systems. p. 591

Soil Survey Manual. 2006. <http://soils.usda.gov/technical/manual/>. Disponible al 22 de marzo de 2007.

Soria-Ruiz, J., C. A. Ortiz S., F. Islas y V. Volke H. 2000. Sitios de ocurrencia y predicción de rendimientos de maíz a través de índices de vegetación de Imágenes de satélite. *Terra*. 18:1.

Soria-Ruiz, J., Y. Fernández-Ordóñez and R. Granados-Ramírez. 2004. Methodology for prediction of corn yield using remote sensing satellite data in Central Mexico. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 55: 61-78

- Soria-Ruiz, J., C. A. Ortiz S., F. Islas. y V. Volke H. 1998. "Sensores remotos, principios y aplicaciones en la evaluación de los recursos naturales: experiencias en México", Publicación Especial 7, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, Chapingo, México.
- Stocks, A.M. and D. I. Heywood. 1994. Terrain modeling for mountains. In Mountain Environments and Geographic Information Systems, edited by Price M.F. and Heywood D.I. London: Taylor & Francis. pp. 25–40.
- Stroppiana, D., S. Pinnock, M. C. Pereira J. and J. M. Grégorie. 2002. "Radiometric analysis of Spot-vegetation images for burnt area detection in northern Australia", Remote Sensing of Environment, 82: 21-37.
- Thenkabail, P. S., A. D. Ward, J. G Lyon, and P. Van De Venter. 1992. Landsat Thematic Mapper indices for evaluating management and growth characteristics of soybeans and corn. *Transac. ASAE* 35:1441-1448.
- Toutin, T. and P. Cheng. (2000). Demystification of IKONOS. *Earth Observation Magazine*. 9 (7): 17-21.
- Valdez, L. J. R., M. de J. González G. y H. M. Posadas de los S. 2006. Estimación de cobertura arborea mediante imágenes satelitales multiespectrales de alta resolución. *Agrociencia*. 40: 383-394.
- Van de Griend, A. and M. Owe, 1993. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *Int. J. of Remote Sens.* 14:1119-1131.
- Wiegand, C. L., S. J. Maas, J. K. Aase, J. L Hatfield, P. J. Pinter, R. D. jr Jackson, E. T Kanemasu and R. L. Lapitan. 1992. Multisite analyses of spectral-biophysical data for wheat. *Remote Sens. Environ.* 42:1, 1-21.

Wu, X., S. Furby and J. Wallace. 2004. An approach for terrain illumination correction.
http://www.cmis.csiro.au/RSM/research/pdf/wu_x_12ARSPC_TerrainIllumination.pdf

Disponible al 04 de Diciembre de 2007.

Yang C., Everitt, J. H. and Bradford J. M. 2004. Using High Resolution QuickBird Satellite Imagery for Cotton Yield Estimation. ASAE, Annual Meeting. 041119.