

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO



CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

**“EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN DE
IMÁGENES SATELITALES DE MODERADA Y ALTA
RESOLUCIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE MAPAS DE USO Y
COBERTURA DEL SUELO BASADOS EN PÍXELES Y
ORIENTADOS A OBJETOS: ESTUDIO DE CASO EN SUB
ESCENA DE LA PARROQUIA SHUSHUFINDI, PROVINCIA DE
SUCUMBÍOS, UTILIZANDO IMÁGENES ASTER E IKONOS.”**

**Previa a la obtención del Título de: INGENIEROS GEÓGRAFOS Y DEL
MEDIO AMBIENTE**

ELABORADO POR:

XAVIER ADRIÁN MEJÍA RAMOS

PABLO JAVIER MONCAYO SILVA

SANGOLQUÍ - ECUADOR

JUNIO DE 2012

RESUMEN

En la actualidad el surgimiento de imágenes satelitales con mayor resolución espacial, ha permitido observar objetos a mayor detalle, esto a su vez ha generado la investigación de nuevas formas de procesamiento de las mismas, como es el método orientado a objetos.

Este trabajo de investigación busca encontrar el mejor tipo de clasificador en imágenes de moderada y alta resolución espacial para la obtención de mapas de uso y cobertura del suelo, mediante los métodos de clasificación por píxeles y orientado a objetos.

En primer lugar se aseguró la calidad cartográfica del producto, para esto se utilizó equipos GPS de precisión, una adecuada georreferenciación de las imágenes y un riguroso control posicional.

Posteriormente se generó la cartografía temática, se estableció la leyenda de trabajo y se aplicaron diferentes algoritmos de clasificación para las imágenes, utilizando un programa comercial para los métodos por píxeles, el no supervisado algoritmo Isodata y el supervisado algoritmo de Máxima Probabilidad; y un programa libre para el método orientado a objetos, el no supervisado algoritmo Isoseg y el supervisado algoritmo de Bhattacharya, además de exponer su base matemática.

Finalmente se validó la cartografía temática de las clasificaciones, calculando un tamaño de la muestra estadísticamente robusto y se aplicaron matrices de confusión para obtener un índice Kappa por cada algoritmo utilizado, para conocer cuál es el que da mejores resultados dependiendo del tipo de imagen.

SUMMARY

Nowadays, the emergence of satellite images with better spatial resolution, has allowed observing objects in a greater detail, this has generated the investigation of new ways of processing them, such as the method orientated to objects.

This work research seeks finding the best type of classifier images of high and moderated spatial resolution to obtain use and coverage soil maps through pixels and object orientated classification methods.

In the first place, we assured the cartographic quality of the final product, with accuracy GPS equipment, an adequate georeferencing of the images and a very careful positional control.

Later on we generated the thematic cartography, established the work legend and apply different algorithms of images classification, using a commercial program for pixel methods, the unsupervised Isodata algorithm and the supervised algorithm of maximum-likelihood; and finally a free program for the method orientated to objects, the unsupervised algorithm Isoseg and the supervised algorithm of Bhattacharya, in addition of exposing its mathematics basis.

Finally we validated the thematic cartography of the classifications, calculating a sample size statistically strong, applying confusion matrix to obtain a Kappa index for each used algorithm; therefore we were able to acknowledge which is the one that brought the best results depending on the type of image.

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

CERTIFICADO

Nosotros: ING. FRANCISCO LEÓN E ING. EDUARDO KIRBY

CERTIFICAN:

Que el proyecto de grado titulado “EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES DE MODERADA Y ALTA RESOLUCIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE MAPAS DE USO Y COBERTURA DEL SUELO BASADOS EN PÍXELES Y ORIENTADOS A OBJETOS: ESTUDIO DE CASO EN SUB ESCENA DE LA PARROQUIA SHUSHUFINDI, PROVINCIA DE SUCUMBÍOS, UTILIZANDO IMÁGENES ASTER E IKONOS.” realizados por los SEÑORES XAVIER ADRIÁN MEJÍA RAMOS y PABLO JAVIER MONCAYO SILVA, ha sido revisado prolijamente y cumple con los requerimientos: teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la ESPE, por lo que nos permitimos acreditarlo y autorizar su entrega al Sr. Ing. Francisco León L., en su calidad de Director de la Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente.

El trabajo en mención consta de dos empastados y dos discos compactos el cual contienen el documento en formato portátil de Acrobat (pdf).

Sangolquí, Junio de 2012

ING. FRANCISCO LEÓN

DIRECTOR

ING. EDUARDO KIRBY

CODIRECTOR

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Nosotros: Xavier Adrián Mejía Ramos y Pablo Javier Moncayo Silva

DECLARAMOS QUE:

El proyecto de grado titulado "EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES DE MODERADA Y ALTA RESOLUCIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE MAPAS DE USO Y COBERTURA DEL SUELO BASADOS EN PÍXELES Y ORIENTADOS A OBJETOS: ESTUDIO DE CASO EN SUB ESCENA DE LA PARROQUIA SHUSHUFINDI, PROVINCIA DE SUCUMBÍOS, UTILIZANDO IMÁGENES ASTER E IKONOS." Ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme a las citas que se encuentran en el documento y cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, Junio de 2012.

Xavier Adrián Mejía Ramos

Pablo Javier Moncayo Silva

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORIZACIÓN

Nosotros, Xavier Adrián Mejía Ramos y Pablo Javier Moncayo Silva.

Autorizamos a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación, en la biblioteca virtual de la institución del trabajo “EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES DE MODERADA Y ALTA RESOLUCIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE MAPAS DE USO Y COBERTURA DEL SUELO BASADOS EN PÍXELES Y ORIENTADOS A OBJETOS: ESTUDIO DE CASO EN SUB ESCENA DE LA PARROQUIA SHUSHUFINDI, PROVINCIA DE SUCUMBÍOS, UTILIZANDO IMÁGENES ASTER E IKONOS.” Cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, Junio de 2012.

Xavier Adrián Mejía Ramos

Pablo Javier Moncayo Silva

DEDICATORIA:

Dedico este proyecto de Grado a mis padres, Miriam Ramos y Rafael Mejía, que han forjado día a día con su ejemplo de honradez y tenacidad lo que hoy soy, gracias por toda la paciencia y apoyo a lo largo de mi vida.

A mis hermanas, con infinito amor: Esthefy y Dianita, que espero con ansias sus graduaciones profesionales y también dedico este logro a mi tierna sobrinita Abigail.

A todas las personas que forman mi extensa familia de sangre y política, sin olvidar a nadie, pasando desde mi abuelito Carlitos que ya está en el cielo, a la Lilita por su invaluable ejemplo de unidad y alegría en la vida, a mi abuelita Delia, cuñados, a todos mis tíos sobre todo a Calín que ha sabido ser el apoyo de todas mis emergencias, a todos mis primos y nuevos primitos.

También a las personas que amo y quiero, a veces a esas personas que pasan enseñándote y aportando algo a la vida.

Dedico también mi esfuerzo a ti... que aún no sé dónde estás... que aún no tengo tu rostro en mi retina, pero que estoy seguro que compartirás con amor días felices junto a nuestra familia.

Xavier Adrián Mejía Ramos.

DEDICATORIA:

A mi amada esposa, compañera y amiga Pao, que con mucho apoyo, amor y paciencia me ayudo a terminar una etapa tan importante, así como compartiremos los demás momentos de nuestras vidas.

A mi amada familia, mis queridos padres que con mucho esfuerzo y cariño me apoyaron durante todos los años de mi vida, tanto en mi formación personal, así como en mis años de estudio. También a mis queridas hermanas Patricia y Gabriela por preocuparse y ayudarme en todo momento.

A mis amigos que han estado conmigo en momentos buenos y malos, además siempre me han brindado su ayuda y apoyo, muchas gracias a todos ellos.

Pablo Javier Moncayo Silva.

AGRADECIMIENTO:

A Dios por brindarme la oportunidad de cada día ver uno nuevo, dándome fe y esperanza en un futuro. Enseñándome a diario, que cada día se vive del esfuerzo, con intensidad y valentía.

Agradezco a mis padres Miriam Ramos, y Rafael Mejía, aquellos seres protectores que siempre respaldaron hasta el último de mis caprichos y aprobaron con su ejemplo los días en que hoy vivo.

Sin Duda agradezco a mi compañero y amigo Pablo Moncayo por su tenacidad, perseverancia y tiempo para la elaboración de este proyecto de grado.

Aprovecho para agradecer de sobremanera al Ing Francisco León, por sus enseñanzas, consejos y amistad. Al Ing Eduardo Kirby por su seguimiento técnico, su paciencia y transmisión desinteresada de sus conocimientos, ahora un colega y un gran amigo.

Debo reconocer a las personas que brindaron su experticia técnica para la elaboración de este proyecto: A mis socios y amigos: Phd. Manuel Peralvo, Phd. Carlos Mena, Ing Julio Novoa, Ing Francis Baquero y Esthefany Mejía de Seearth Consulting Group, Ing. Medina, Ing. Marco Luna (ESPE), Phd. Holger Capa, (EPN), Ing Cesar Leiva, así como al auspicio económico y logístico de Seearth Consulting Group y Ministerio del Ambiente.

Debo hacer un listado Gigantesco de personas a quien nombrar, para la consecución exitosa de este documento, pero debo resumir diciendo que gracias a todas las personas a las que quite su tiempo me han ayudado a compartir el día a día.

Estoy seguro que este proyecto, será un puntal, que abre puertas a otra etapa de mi vida.

Xavier Adrián Mejía Ramos.

AGRADECIMIENTO:

Agradezco a mi familia que siempre estuvo apoyándome en este trabajo de investigación, a mi esposa, mis padres y hermanas.

A mi director, Ing. Francisco León que nos ayudo en todo el proceso del proyecto de grado, gracias por su calidad personal y profesional, a mi codirector y amigo, Ing. Eduardo Kirby por su ayuda, además de una rigurosa revisión, para obtener un documento de excelente calidad en todas sus etapas.

Al Ministerio del Ambiente por facilitar las imágenes satélite y a Seearth Consulting Group, al Ing. Julio Novoa por el auspicio al proyecto de grado.

A mi amigo, Phd. Manuel Peralvo por su ayuda desinteresada, tanto en el planteamiento del proyecto, así como en aclarar cualquier inquietud en el transcurso del mismo. También agradezco al Ing. Iván Medina por su tiempo en la revisión del perfil del proyecto.

Al Ing. Marco Luna docente de la facultad por guiarnos en la difícil parte estadística y al Phd. Holger Capa por aclararnos la parte matemática de los algoritmos de clasificación.

Agradezco a mi amigo Pedro Guevarra y al Ing, Jorge Cajas por ayudarnos desinteresadamente en el trabajo de campo en Shushufindi fueron un gran apoyo. Además al Ing. Galo Paredes por prestarnos sus equipos GPS.

Al Ing. Cesar Leiva por aclararnos las dudas en los equipos GPS, así como a mi amigo José Carrión por ayudarme a revisar la teoría de GPS.

A mi compañero de proyecto de grado por recorrer este largo camino y obtener la gran satisfacción de haber culminado este proyecto.

Gracias a todos mis amigos que siempre han estado para apoyarme.

A todos mis colegas y amigos del Ministerio del Ambiente que siempre me dieron su apoyo, especialmente a Jeaneth Delgado y Danilo Granja que me permitieron tomarme un poco de tiempo del trabajo para hacer trámites requeridos. Pido disculpas si se me ha pasado el nombre de algún colega o amigo que me ayudo, muchas gracias a todos ellos.

Pablo Javier Moncayo Silva.

HOJA DE LEGALIZACIÓN DE FIRMAS

ELABORADO POR

Xavier Adrián Mejía Ramos.

Pablo Javier Moncayo Silva.

DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

Ing. Francisco León

DELEGADO UNIDAD DE ADMISIÓN Y REGISTRO

Dr. Mario Lozada

Sangolquí, Junio de 2012

PROLOGO:

En la práctica profesional, para la obtención de mapas de uso y cobertura del suelo se utilizan diferentes métodos de clasificación, como son los métodos por píxeles y en los últimos años el método orientado a objetos, esto se vuelve un tema complicado ya que en la actualidad han aparecido imágenes satelitales de alta resolución espacial y por lo tanto que poseen mayor detalle. Para esto, se requiere conocer qué tipo de metodología da mejores resultados al trabajar con imágenes de alta y moderada resolución espacial.

Los autores del presente proyecto de grado pretenden con este estudio hacer una guía metodológica para la obtención de mapas de uso y cobertura del suelo mediante los métodos por píxeles, así como el método orientado a objetos y concluir cuales son los que funcionan mejor en imágenes de alta y moderada resolución espacial. Además se pretende dar a conocer su fundamento teórico - matemático y su aplicación práctica, desde su adquisición, siguiendo por los procesos de tratamiento de mismas, hasta obtener su resultado final.

ÍNDICE

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 ANTECEDENTES.....	2
1.3 OBJETIVO GENERAL.....	4
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.5 METAS DEL PROYECTO	5
1.6 DESCRIPCIÓN BIOFÍSICA Y POLÍTICA DE LA ZONA	6
1.7 CLIMA.....	7
1.8 ZONAS DE VIDA.....	7
1.9 FORMACIONES VEGETALES	7
1.10 FLORA.....	8
1.11 DESCRIPCIÓN PRODUCTIVA Y SU RELACIÓN CON EL USO DEL SUELO	8
1.12 SOCIO ECONOMÍA Y DEMOGRAFÍA	9
1.13 DATOS ANTRÓPICOS	10
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	11
2.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE TELEDETECCIÓN	11
2.1.1 DEFINICIÓN	11
2.1.2 COMPONENTES DE UN SISTEMA DE TELEDETECCIÓN.....	11
2.2 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.....	12
2.2.1 LOS ESPECTROS MÁS USADOS EN LOS SENSORES REMOTOS	13
2.2.2 RESOLUCIÓN DE UN SISTEMA SENSOR.....	15
2.3 TIPOS DE SENSORES	16
2.4 SENSOR ASTER	16
2.4.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL SENSOR ASTER	17
2.4.2 APLICACIONES.....	17
2.5 SATÉLITE IKONOS	19
2.5.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL SATÉLITE IKONOS	19
2.5.2 APLICACIONES.....	20
2.6 COMPARACIÓN ENTRE ASTER E IKONOS.....	21
2.7 CORRECCIONES A LAS IMÁGENES SATÉLITES.....	22
2.8 GEORREFERENCIACIÓN.....	22
2.8.1 LOCALIZACIÓN DE PUNTOS COMUNES A LA IMAGEN CON FUENTES DE MAYOR PRECISIÓN (PUNTOS DE GEORREFERENCIACIÓN)	23
2.8.2 CÁLCULO DE LAS FUNCIONES DE TRANSFORMACIÓN ENTRE LAS COORDENADAS DE LA IMAGEN OBJETIVO Y LAS DE REFERENCIA.....	24
2.8.3 TRANSFERENCIA DE LOS NIVELES DIGITALES ORIGINALES A LA NUEVA POSICIÓN, DEFINIDA POR LA TRANSFORMACIÓN PREVIA.....	28
2.9 CONTROL POSICIONAL	30
2.9.1 PRECISIÓN HORIZONTAL.....	31
2.9.2 COMPROBACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL	31
2.9.3 NIVEL DE CONFIANZA	33
2.10 TEORÍA DEL SISTEMA DE NAVEGACIÓN GLOBAL POR SATÉLITE (GNSS).....	33
2.10.1 ESTRUCTURA DE LOS SISTEMAS DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE	34

2.10.1.1	EL SEGMENTO ESPACIAL	35
2.10.1.2	EL SEGMENTO DE CONTROL.....	36
2.10.1.3	EL SEGMENTO DE USUARIO:	36
2.10.2	FUNDAMENTO PARA EL CÁLCULO DE LA POSICIÓN DE UN PUNTO GNSS.....	36
2.10.2.1	TRILATERACIÓN SATELITAL.....	36
2.10.2.2	SEÑALES DE NAVEGACIÓN, EFEMÉRIDES Y ALMANAQUE.....	37
2.10.2.3	ERRORES EN LA POSICIONAMIENTO SATELITAL.....	38
2.10.3	POSICIONAMIENTO GPS DIFERENCIAL.....	39
2.10.4	MÉTODOS DE OPERACIÓN	40
2.10.4.1	MÉTODO ESTÁTICO	41
2.10.4.2	MÉTODO MÓVIL.....	42
2.10.5	POST-PROCESAMIENTO O CORRECCIÓN DIFERENCIAL	42
2.10.6	ESTACIONES DE MONITOREO CONTINUO	42
2.10.7	RED GNSS DE MONITOREO CONTINUO DEL ECUADOR (REGME)	43
2.11	ESCALA DE TRABAJO.....	44
2.12	CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES.....	44
2.12.1	ENMASCARAMIENTO DE NUBES.....	45
2.13	TEORÍA DE CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES.....	47
2.13.1	FASE DE ANÁLISIS VISUAL.....	48
2.13.2	FASE DE ENTRENAMIENTO.....	48
2.13.2.1	DEFINICIÓN Y DEPURACIÓN DE LA LEYENDA TEMÁTICA.....	48
2.13.2.2	PUNTOS DE CALIBRACIÓN	56
2.13.3	FASE DE ASIGNACIÓN Y CLASIFICACIÓN.....	56
2.13.3.1	MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES.....	56
2.13.3.2	CLASIFICACIÓN SUPERVISADA.....	57
2.13.3.3	CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA.....	58
2.13.4	MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN BASADOS EN PÍXELES	58
2.13.4.1	ALGORITMO DE MÁXIMA PROBABILIDAD.....	59
2.13.4.2	DEFINICIÓN MATEMÁTICA DE DISTANCIA.....	66
2.13.4.3	EL ALGORITMO ISODATA.....	67
2.13.5	MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN BASADOS EN OBJETOS	70
2.13.5.1	SEGMENTACIÓN DE IMÁGENES	70
2.13.5.1.1	SEGMENTACIÓN DE IMÁGENES POR CRECIMIENTO DE REGIONES.....	72
2.13.5.1.2	UNIDAD MÍNIMA DE MAPEO (UMM).....	73
2.13.5.1.3	EL ALGORITMO DE BHATTACHARYA	79
2.13.5.2	EL ALGORITMO ISOSEG	82
2.13.5.2.1	DEFINICIÓN DEL UMBRAL	84
2.13.5.2.2	DETECCIÓN DE LAS CLASES	84
2.13.5.2.3	COMPETENCIA ENTRE CLASES	85
2.14	FASE DE VALIDACIÓN	85
2.14.1	TAMAÑO DE LA MUESTRA	85
2.14.2	CÁLCULO DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA	86
2.14.2.1	CÁLCULO DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA PARA UNA POBLACIÓN INFINITA.....	86
2.14.2.2	CÁLCULO DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA PARA UNA POBLACIÓN FINITA	87
2.14.3	DISEÑO DEL MUESTREO	87
2.14.4	PUNTOS DE VALIDACIÓN.....	89
2.14.5	MATRICES DE CONFUSIÓN	89
2.14.6	FIABILIDAD TOTAL, ERROR DE MUESTREO E INTERVALO DE CONFIANZA.....	91
2.14.7	EL ESTADÍSTICO KAPPA (k).....	92
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA		94
3.1	DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	94

3.2	RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN	94
3.3	VALIDACIÓN DE LA CALIDAD DE LA INFORMACIÓN (PRE PROCESAMIENTO).	95
3.4	PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO.....	96
3.4.1	RECOLECCIÓN DE PUNTOS GPS PARA LA GEORREFERENCIACIÓN.	98
3.4.2	POST - PROCESAMIENTO DE PUNTOS GPS PARA LA GEORREFERENCIACIÓN	99
3.5	GEORREFERENCIACIÓN DE LA IMAGEN IKONOS.	100
3.5.1	CONTROL POSICIONAL DE LA IMAGEN IKONOS.	101
3.6	GEORREFERENCIACIÓN DE LA IMAGEN ASTER.....	102
3.6.1.-	CONTROL POSICIONAL DE LA IMAGEN ASTER.	103
3.7	CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES.....	104
3.7.1	EXTRACCIÓN DE LA INFORMACIÓN NO ÚTIL (ENMASCARAMIENTO DE LA IMAGEN ASTER). 104	
3.7.2	GENERACIÓN DE LA LEYENDA TEMÁTICA.....	106
3.7.3	MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN POR PÍXELES.	106
3.7.3.1	CLASIFICACIÓN SUPERVISADA POR PÍXELES, ALGORITMO DE MÁXIMA PROBABILIDAD PARA LA IMAGEN IKONOS.....	106
3.7.3.2	CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA POR PÍXELES, ALGORITMO ISODATA PARA LA IMAGEN IKONOS. 107	
3.7.3.3	CLASIFICACIÓN SUPERVISADA POR PÍXELES, ALGORITMO DE MÁXIMA PROBABILIDAD PARA LA IMAGEN ASTER.	108
3.7.3.4	CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA POR PÍXELES, ALGORITMO ISODATA PARA LA IMAGEN ASTER. 108	
3.7.4	CLASIFICACIÓN POR MÉTODO DE OBJETOS.	109
3.7.4.1	CONFIGURACIÓN OPERATIVA DEL PROGRAMA SPRING PARA CARGA Y VISUALIZACIÓN DE IMÁGENES. 109	
3.7.4.2	SEGMENTACIÓN DE IMÁGENES POR CRECIMIENTO DE REGIONES PARA LA IMAGEN IKONOS. 110	
3.7.4.3	SEGMENTACIÓN DE IMÁGENES POR CRECIMIENTO DE REGIONES PARA LA IMAGEN ASTER.. 114	
3.7.4.4	CLASIFICACIÓN SUPERVISADA POR MÉTODO DE OBJETOS, ALGORITMOS DE BHATTACHARYA PARA LA IMAGEN IKONOS.	116
3.7.4.5	CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA POR MÉTODO DE OBJETOS, ALGORITMO ISOSEG PARA LA IMAGEN IKONOS.....	119
3.7.4.6	CLASIFICACIÓN SUPERVISADA POR MÉTODO DE OBJETOS, ALGORITMOS DE BHATTACHARYA PARA LA IMAGEN ASTER.....	120
3.7.5	CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA POR MÉTODO DE OBJETOS, ISOSEG PARA LA IMAGEN ASTER. 121	
3.7.6	RECOLECCIÓN DE PUNTOS GPS PARA LA VALIDACIÓN DE LA IMAGEN IKONOS Y ASTER..122	
3.7.7	MATRIZ DE CONFUSIÓN PARA LA EVALUACIÓN DE LAS CLASIFICACIONES.....	122
3.7.7.1	EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN DE LOS PUNTOS DE VALIDACIÓN PARA LAS MATRICES DE CONFUSIÓN	123
3.7.7.2	INGRESO DE DATOS DE LOS PARÁMETROS PARA LA EVALUACIÓN DE LAS MATRICES DE CONFUSIÓN	123
CAPÍTULO IV. RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN		129
4.1	GEORREFERENCIACIÓN Y CONTROL POSICIONAL	129
4.1.1	PUNTOS GPS POST PROCESADOS.	129
4.2	GEORREFERENCIACIÓN DE LA IMAGEN IKONOS	131
4.2.1	RESULTADOS DEL TEST NATIONAL MAP ACCURACY STANDARD PARA LA IMAGEN IKONOS. 132	
4.2.2	NIVEL DE CONFIANZA DEL CONTROL POSICIONAL DE LA IMAGEN IKONOS.....	133
4.3	GEORREFERENCIACIÓN DE LA IMAGEN ASTER.....	134
4.3.1	EVALUACIÓN POSICIONAL DE LA IMAGEN ASTER.	136

4.3.2	NIVEL DE CONFIANZA DEL CONTROL POSICIONAL PARA LA IMAGEN ASTER.....	137
4.4	PUNTOS DE CALIBRACIÓN.....	138
4.5	RESULTADOS DE LOS MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN.....	140
4.5.1	RESULTADOS DE LAS CLASIFICACIONES SUPERVISADAS BASADAS EN PÍXELES Y ORIENTADA A OBJETOS DE LA IMAGEN IKONOS.....	141
4.5.2	RESULTADOS DE LAS CLASIFICACIONES SUPERVISADAS BASADAS EN PÍXELES Y ORIENTADA A OBJETOS DE LA IMAGEN ASTER.....	142
4.5.3	RESULTADOS DE LAS CLASIFICACIONES NO SUPERVISADAS BASADAS EN PÍXELES Y ORIENTADA A OBJETOS DE LA IMAGEN IKONOS.....	144
4.5.4	RESULTADOS DE LA CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA BASADA EN PÍXELES Y ORIENTADA A OBJETOS DE LA IMAGEN ASTER.....	146
4.6	RESULTADO DEL CÁLCULO DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA PARA PUNTOS DE VALIDACIÓN DE MAPAS DE USO DEL SUELO Y COBERTURA VEGETAL EN CAMPO, USANDO LA FÓRMULA DE MUESTREO ESTRATIFICADO.....	149
4.7	PUNTOS DE VALIDACIÓN PARA LA IMAGEN IKONOS Y ASTER.....	150
4.8	MATRIZ DE CONFUSIÓN INDICE KAPPA.....	153
4.9	DISCUSIÓN, BONDADDES Y LIMITANTES.....	154
4.9.1	DISCUSIÓN, BONDADDES Y LIMITANTES EN LA IMAGEN IKONOS.....	154
4.9.2	DISCUSIÓN, BONDADDES Y LIMITANTES, IMAGEN ASTER.....	161
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		168
5.1	CONCLUSIONES.....	168
5.2	RECOMENDACIONES.....	169
BIBLIOGRAFÍA.....		173
ANEXOS.....		182

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I.1. COORDENADAS DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	6
TABLA I.2. ESPECIES DE LA ZONA DE ESTUDIO	8
TABLA II.1. ESPECTROS MÁS UTILIZADOS EN SENSORES REMOTOS	14
TABLA II.2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL SENSOR ASTER.	17
TABLA II.3. APLICACIONES IMÁGENES ASTER	18
TABLA II.4. CARACTERÍSTICA TÉCNICAS DEL SATÉLITE IKONOS.....	19
TABLA II.5. APLICACIONES DE LAS IMÁGENES IKONOS.	20
TABLA II.6. COMPARACIÓN ENTRE ASTER E IKONOS.....	21
TABLA II.7. CARACTERÍSTICA DE LOS POLINOMIOS DE TRANSFORMACIÓN.....	26
TABLA II.8. TIPOS DE ERRORES EN EL POSICIONAMIENTO SATELITAL.	38
TABLA II.9. ESCALA Y SENSORES.	44
TABLA II.10. LEYENDA TEMÁTICA.....	49
TABLA II.11. DEFINICIONES PARA EL NIVEL I.....	50
TABLA II.12. DEFINICIONES PARA EL NIVEL II.....	51
TABLA II.13. DEFINICIONES PARA EL NIVEL III.....	52
TABLA II.14. RESPALDO FOTOGRÁFICO DE LAS DIFERENTES CLASES DE USO Y COBERTURA.....	53
TABLA II.15. POSIBLES COMBINACIONES EN LOS DADOS NORMALES Y AUMENTADOS.	59
TABLA II.16. ÁREA MÍNIMA CARTOGRAFIABLE PARA DIFERENTES ESCALAS.....	75
TABLA II.17. CARACTERÍSTICAS DE LOS DISEÑOS DE MUESTREO.....	88
TABLA II.18. ESTRUCTURA DE UNA MATRIZ DE CONFUSIÓN.	90
TABLA II.19. INTERVALO DE ACEPTACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ÍNDICE KAPPA..	93
TABLA III.1. PASOS, GRÁFICO Y PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE LA IMAGEN ASTER ENMASCARADA.....	105
TABLA IV.1. PUNTOS PARA LA GEORREFERENCIACIÓN.....	129
TABLA IV.2. PUNTOS DE CONTROL POSICIONAL.....	130
TABLA IV.3. TABLA DE PUNTOS UTILIZADOS PARA GEORREFERENCIACIÓN DE LA IMAGEN IKONOS CON SU RESPECTIVO ERROR CUADRÁTICO MEDIO.....	131
TABLA IV.4. TABLA DE PUNTOS UTILIZADOS PARA CONTROL POSICIONAL DE LA IMAGEN IKONOS EMPLEANDO EL TEST NMAS.	132
TABLA IV.5. PUNTOS UTILIZADOS PARA GEORREFERENCIACIÓN DE LA IMAGEN ASTER CON SU RESPECTIVO ERROR CUADRÁTICO MEDIO.	134
TABLA IV.6. PUNTOS UTILIZADOS PARA CONTROL POSICIONAL DE LA IMAGEN ASTER EMPLEANDO EL TEST NMAS.....	136
TABLA IV.7. PUNTOS DE CALIBRACIÓN (OBSERVACIÓN).....	138
TABLA IV.8. RESULTADOS DE LAS CLASIFICACIONES SUPERVISADAS BASADAS EN PÍXELES Y ORIENTADA A OBJETOS DE LA IMAGEN IKONOS.....	141
TABLA IV.9. RESULTADOS DE LA CLASIFICACIÓN SUPERVISADA BASADA EN PÍXELES Y ORIENTADA A OBJETOS DE LA IMAGEN ASTER.....	143
TABLA IV.10. ÁREAS OBTENIDAS DE LA CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA POR PÍXELES DE LA IMAGEN IKONOS.....	145
TABLA IV.11. CÁLCULO DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA PARA PUNTOS DE VALIDACIÓN DE MAPAS DE USO DEL SUELO Y COBERTURA VEGETAL EN CAMPO.....	150
TABLA IV.12. RESUMEN DE PUNTOS DE VALIDACIÓN PARA EL NIVEL III DE LA LEYENDA TEMÁTICA (IMAGEN IKONOS).....	151
TABLA IV.13. RESUMEN DE PUNTOS DE VALIDACIÓN PARA EL NIVEL II DE LA LEYENDA TEMÁTICA (IMAGEN ASTER).....	151
TABLA IV.14. PUNTOS DE VALIDACIÓN PARA EL NIVEL II Y III DE LA LEYENDA TEMÁTICA	152
TABLA IV.15.- RESULTADO COMPARATIVO DE LAS MATRICES DE CONFUSIÓN.	153

TABLA IV.16. DISCUSIONES, BONDADES Y LIMITANTES DEL ALGORITMO DE MÁXIMA PROBABILIDAD, PARA LA IMAGEN IKONOS.	154
TABLA IV.17. DISCUSIONES, BONDADES Y LIMITANTES DEL ALGORITMO ISODATA, CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA POR PÍXELES EN LA IMAGEN IKONOS.	156
TABLA IV.18. DISCUSIONES, BONDADES Y LIMITANTES DEL ALGORITMO DE BHATTACHARYA, CLASIFICACIÓN SUPERVISADA POR OBJETOS EN LA IMAGEN IKONOS.	157
TABLA IV.19. DISCUSIONES, BONDADES Y LIMITANTES DEL ALGORITMO ISOSEG, CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA POR OBJETOS EN LA IMAGEN IKONOS.	159
TABLA IV.20. DISCUSIONES, BONDADES Y LIMITANTES DEL ALGORITMO DE MÁXIMA PROBABILIDAD, CLASIFICACIÓN SUPERVISADA POR PÍXELES EN LA IMAGEN ASTER.	161
TABLA IV.21. DISCUSIONES, BONDADES Y LIMITANTES DEL ALGORITMO ISODATA, CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA POR PÍXELES EN LA IMAGEN ASTER.	163
TABLA IV.22. DISCUSIONES, BONDADES Y LIMITANTES DEL ALGORITMO DE BHATTACHARYA, CLASIFICACIÓN SUPERVISADA POR OBJETOS EN LA IMAGEN ASTER.	165
TABLA IV.23. DISCUSIONES, BONDADES Y LIMITANTES DEL ALGORITMO DE BHATTACHARYA, CLASIFICACIÓN SUPERVISADA POR OBJETOS EN LA IMAGEN ASTER.	166

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA I.1. LISTADO DE IMÁGENES UTILIZADAS POR PROFESIONALES EN SENSORES REMOTOS EN EL ECUADOR.....	3
FIGURA I.2. LISTADO DE PROGRAMAS PARA TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES.....	3
FIGURA I.3. LISTADO DE MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN UTILIZADOS PARA TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES.	4
FIGURA I.4. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	6
FIGURA I.5. FOTOS DEL ÁREA DE ESTUDIO	10
FIGURA II.1. COMPONENTES DE UN SISTEMA DE TELEDETECCIÓN.....	12
FIGURA II.2. ESQUEMA DE LA LONGITUD ELECTROMAGNÉTICA.....	12
FIGURA II.3. RANGO DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.....	13
FIGURA II.4. ESQUEMA DEL SENSOR ASTER DENTRO DEL SATÉLITE TERRA.....	16
FIGURA II.5. GRAFICO DE LAS CURVAS DE RESPUESTA ESPECTRAL.....	18
FIGURA II.6. IMAGEN DEL SATÉLITE IKONOS.....	19
FIGURA II.7. COMPARACIÓN DE LOS SENSORES ASTER E IKONOS.....	22
FIGURA II.8. CARACTERÍSTICAS IDEALES PARA LA DISTRIBUCIÓN DE LOS PUNTOS DE CONTROL. A LA IZQUIERDA, DISTRIBUCIÓN ESPACIAL. A LA DERECHA, SEPARACIÓN ENTRE PUNTOS.....	24
FIGURA II.9. EXPLICACIÓN GRÁFICA DEL ERROR CUADRÁTICO MEDIO.....	27
FIGURA II.10. VECINO MÁS CERCANO.....	29
FIGURA II.11. INTERPOLACIÓN BILINEAL.....	29
FIGURA II.12. CONVOLUCIÓN CÚBICA.....	30
FIGURA II.13. SISTEMAS DE AUMENTO EXISTENTES EN LA ACTUALIDAD.....	35
FIGURA II.14. SEGMENTOS ESPACIAL DE NAVEGACIÓN DE LOS SISTEMAS: GPS (CONSTELACIÓN NAVSTAR), GLONASS Y GALILEO RESPECTIVAMENTE.....	35
FIGURA II.15. PUNTOS RESULTANTES DE LA INTERSECCIÓN DE CUATRO ESFERAS. .	37
FIGURA II.16. DIBUJADOS A ESCALA UNIFORME EL RADIO TERRESTRE, LA SEPARACIÓN ENTRE ESTACIONES Y LA DISTANCIA A LOS SATÉLITES.....	40
FIGURA II.17. RED GNSS DE MONITOREO CONTINUO DEL ECUADOR.....	43
FIGURA II.18. ORGANIZACIÓN JERÁRQUICA DE LOS CRITERIOS DE INTERPRETACIÓN VISUAL.....	46
FIGURA II.19. PASOS DE LAS CLASIFICACIONES SUPERVISADA Y NO SUPERVISADA DE UNA IMAGEN SATELITAL.....	47
FIGURA II.20. EJEMPLO DE ANÁLISIS VISUAL, FRAGMENTO DE LA IMAGEN IKONOS DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	48
FIGURA II.21. ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA DE CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES.....	57
FIGURA II.22. FUNDAMENTO DEL ALGORITMO DE MÁXIMA PROBABILIDAD CON LOS DATOS NORMALES Y AUMENTADOS.....	61
FIGURA II.23. FUNDAMENTO DEL ALGORITMO DE MÁXIMA PROBABILIDAD CON LOS DATOS NORMALES MODIFICADOS Y AUMENTADOS.....	62
FIGURA II.24. PROBABILIDAD DE PERTENENCIA DE UN PÍXEL X, EN DOS CLASES.....	63
FIGURA II.25. EJEMPLO DE EXTENSIÓN A DOS BANDAS DEL ALGORITMO DE MÁXIMA PROBABILIDAD.....	64
FIGURA II.26. UMBRALES DE PROBABILIDAD PARA CADA CATEGORÍA.....	65
FIGURA II.27. DESIGUALDAD TRIANGULAR.....	67
FIGURA II.28. ILUSTRACIÓN DEL MÉTODO ISODATA.....	69
FIGURA II.29. EJEMPLO DE SEGMENTACIÓN DE IMÁGENES EN REGIONES	71

FIGURA II.30. PROCESO DE SEGMENTACIÓN DE IMÁGENES POR CRECIMIENTO DE REGIONES: UMBRAL DE SIMILARIDAD IGUAL A 2 ND.....	72
FIGURA II.31. SELECCIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS DE SATÉLITE Y SU RELACIÓN CON LA UMM.....	77
FIGURA II.32. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA DISTANCIA DE BHATTACHARYA.....	80
FIGURA II.33. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE TRES CATEGORÍAS DE USO DEL SUELO CON 3 BANDAS Y SUS RESPECTIVOS NIVELES DIGITALES.....	80
FIGURA II.34. CÁLCULO DE LA DISTANCIA MAHALANOBIS.....	83
FIGURA II.35. ESQUEMAS DISPONIBLES PARA MUESTREO.....	88
FIGURA III.1. ESQUEMA DE TRABAJO DE DATOS CON GPS.....	99
FIGURA III.2. UBICACIÓN DE LA ESTACIÓN DE MONITOREO CONTINUO AUCA CON RELACIÓN AL ÁREA DE ESTUDIO.....	100
FIGURA III.3. GEORREFERENCIACIÓN DE LA IMAGEN ASTER TOMANDO COMO REFERENCIA LA IMAGEN IKONOS GEORREFERENCIADA.....	103
FIGURA III.4. SIGNATURE EDITOR. CREACIÓN DE ÁREAS DE ENTRENAMIENTO.....	106
FIGURA III.5. PARÁMETROS PARA LA GENERACIÓN DE LA CLASIFICACIÓN SUPERVISADA.....	107
FIGURA III.6. PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA.....	107
FIGURA III.7. MÓDULO DE CONTRASTE EN EL PROGRAMA SPRING.....	110
FIGURA III.8. MÓDULO SEGMENTACIÓN EN EL PROGRAMA SPRING.....	111
FIGURA III.9. PRUEBAS DE SIMILITUD PARA LA IMAGEN IKONOS.....	113
FIGURA III.10. PRUEBAS DE SIMILITUD PARA LA IMAGEN ASTER.....	115
FIGURA III.11. SEGMENTACIÓN DE IMÁGENES POR CRECIMIENTO DE REGIONES, RANGO DE SIMILITUD UNIFORME Y ÁREA VARIABLE.....	116
FIGURA III.12. PROGRAMA SPRING, CLASIFICACIÓN Y CREACIÓN DE CONTEXTOS...	117
FIGURA III.13. PROGRAMA SPRING, ASIGNACIÓN DE LA LEYENDA TEMÁTICA.....	118
FIGURA III.14. PROGRAMA SPRING, CLASIFICACIÓN SUPERVISADA MEDIANTE EL ALGORITMO DE BHATTACHARYA.....	118
FIGURA III.15. PROGRAMA SPRING, CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA MEDIANTE EL ALGORITMO DE ISOSEG.....	119
FIGURA III.16. PROGRAMA SPRING, CREACIÓN DE CONTEXTO.....	120
FIGURA III.17.- PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE LA MATRIZ DE CONFUSIÓN.....	122
FIGURA III.18. EXTRACCIÓN DE LOS VALORES DE LA CLASIFICACIÓN PARA PUNTOS DE VALIDACIÓN.....	123
FIGURA III.19. EJEMPLO DE LLENADO DE VALORES DE UNA MATRIZ DE CONFUSIÓN.....	124
FIGURA IV.1. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS RESULTADOS DE LAS CLASIFICACIONES SUPERVISADAS BASADAS EN PÍXELES Y ORIENTADA A OBJETOS DE LA IMAGEN IKONOS.....	141
FIGURA IV.2. RESULTADOS DE LAS CLASIFICACIONES SUPERVISADAS BASADAS EN PÍXELES Y ORIENTADA A OBJETOS DE LA IMAGEN IKONOS.....	142
FIGURA IV.3. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS RESULTADOS DE LA CLASIFICACIÓN SUPERVISADA BASADA EN PÍXELES Y ORIENTADA A OBJETOS DE LA IMAGEN ASTER.....	143
FIGURA IV.4. RESULTADOS DE LAS CLASIFICACIONES SUPERVISADAS BASADAS EN PÍXELES Y ORIENTADA A OBJETOS DE LA IMAGEN ASTER.....	144
FIGURA IV.5. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE ÁREAS OBTENIDAS DE LA CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA POR PÍXELES DE LA IMAGEN IKONOS.....	145
FIGURA IV.6. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ÁREAS OBTENIDAS DE LA CLASIFICACIÓN SUPERVISADA POR PÍXELES DE LA IMAGEN IKONOS.....	146
FIGURA IV.7. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE ÁREAS OBTENIDAS DE LA CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA POR PÍXELES DE LA IMAGEN ASTER.....	147

FIGURA IV.8. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ÁREAS OBTENIDAS DE LA CLASIFICACIÓN SUPERVISADA POR PÍXELES DE LA IMAGEN ASTER.	148
FIGURA IV.9. OBSERVACIONES ENCONTRADAS DEL ALGORITMO DE MÁXIMA PROBABILIDAD, EN LA IMAGEN IKONOS.	155
FIGURA IV.10. OBSERVACIONES DEL ALGORITMO ISODATA, CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA POR PÍXELES EN LA IMAGEN IKONOS.	157
FIGURA IV.11. OBSERVACIONES DEL ALGORITMO DE BHATTACHARYA, CLASIFICACIÓN SUPERVISADA POR OBJETOS EN LA IMAGEN IKONOS.	159
FIGURA IV.12. OBSERVACIONES ENCONTRADAS DEL ALGORITMO ISOSEG, EN LA IMAGEN IKONOS.	161
FIGURA IV.13. OBSERVACIONES DEL ALGORITMO DE MÁXIMA PROBABILIDAD, CLASIFICACIÓN SUPERVISADA POR PÍXELES EN LA IMAGEN ASTER.	162
FIGURA IV.14. OBSERVACIONES DEL ALGORITMO ISODATA, CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA POR PÍXELES EN LA IMAGEN ASTER.	164
FIGURA IV.15. OBSERVACIONES DEL ALGORITMO DE BHATTACHARYA, CLASIFICACIÓN SUPERVISADA POR OBJETOS EN LA IMAGEN ASTER.	166
FIGURA IV.16. OBSERVACIONES DEL ALGORITMO ISOSEG, CLASIFICACIÓN SUPERVISADA POR OBJETOS EN LA IMAGEN ASTER.	167

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

1.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la necesidad de información que se requiere para gestionar el territorio y sus interrelaciones con el hombre, ha sufrido un giro con el apareamiento de imágenes satelitales con altas resoluciones espaciales y características mejoradas.

Con el uso de las geotecnologías se puede obtener la cobertura del suelo, para construir herramientas que ayuden a la toma de decisiones, que permitan llegar a gestionar diferentes procesos, como: ordenamiento territorial, gestión de riesgos, estudios ecológicos, ambientales, establecimiento de tasas de deforestación, entre muchos otros. A disposición de la comunidad científica y técnica existe una serie de métodos de clasificación para procesar imágenes satelitales de moderada y alta resolución espacial, con la utilización de programas pagados o gratuitos.

Inicialmente se realizaron encuestas para determinar que metodologías eran las más utilizadas para la clasificación de imágenes satelitales, obteniendo que la basada en píxeles con programa comercial y con imágenes de moderada resolución, era la más difundida; sin embargo existe una nueva forma de clasificación que es la orientada a objetos.

De esta manera, tratando de difundir las nuevas tendencias tecnológicas se procedió a contrastar y evaluar imágenes de alta y moderada resolución con metodologías de clasificación orientadas a objetos con un programa no

comercial (Spring) y uno comercial, mediante la clasificación por píxeles (Erdas).

Lo novedoso de la clasificación de imágenes satelitales basadas en objetos es que pasan por un proceso previo de segmentación para poder trabajar con la imagen a nivel de conjunto o regiones, lo que amplía notablemente la cantidad de información que se puede extraer de la misma y el nivel de generalización de detalles complejos que no se podrían abordar a nivel de píxel como un elemento individual.

Con los antecedentes expuestos, esta investigación plasmada en el presente proyecto de grado pretende contrastar diferentes métodos de clasificación (métodos basados en píxeles versus métodos orientados a objetos) a través del uso de imágenes satelitales de moderada y alta resolución espacial, respectivamente para los sensores Aster e Ikonos, para la obtención de mapas de uso y cobertura del suelo.

1.2 ANTECEDENTES

Para poder plantear el tema del proyecto de grado y seleccionar los algoritmos a ser comparados, se realizaron encuestas a diecisiete profesionales que trabajan en diferentes instituciones del País relacionados a la temática. Tabuladas las respuestas dadas, se determinó que los métodos más utilizados por los profesionales en el Ecuador, en el área de sensores remotos para clasificación del uso del suelo y subproductos son: método Supervisado y no Supervisado por píxeles, con desconocimiento del algoritmo o del fundamento matemático que requieren los diversos métodos de clasificación, por lo se puede determinar que se basan en el uso mecánico del programa utilizado.

En la Figura I.1 , se indican las imágenes satélite que han sido usadas en el Ecuador por diferentes profesionales.

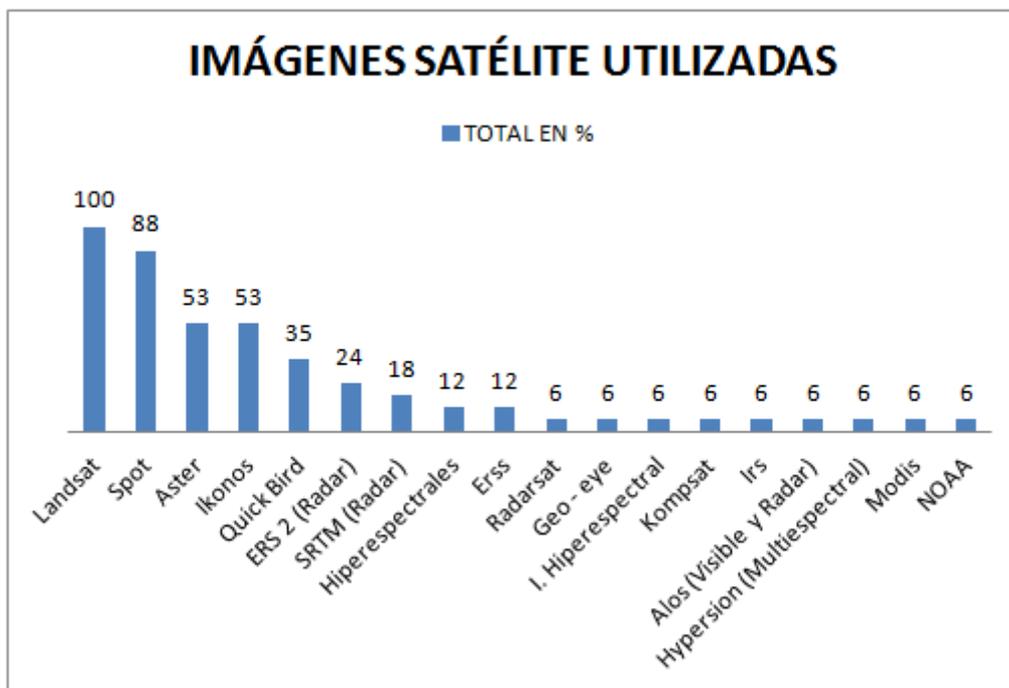


Figura I.1. Listado de imágenes utilizadas por profesionales en sensores remotos en el Ecuador.

En la Figura I.2, se presentan los programas utilizados para tratamiento digital de imágenes en el Ecuador por diferentes profesionales.

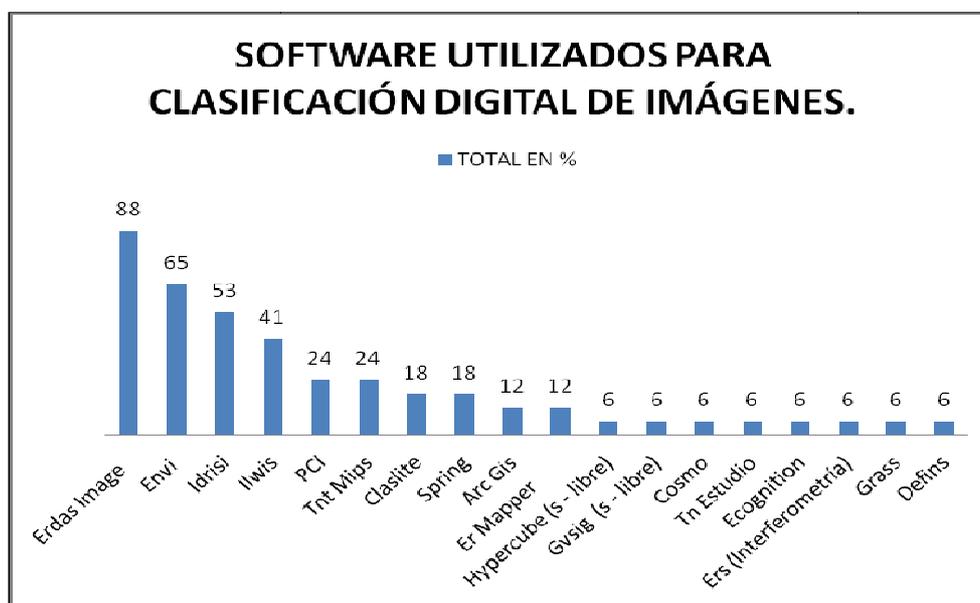


Figura I.2. Listado de programas para tratamiento digital de imágenes.

En la siguiente Figura se nombran los algoritmos o métodos utilizados para tratamiento digital de imágenes.

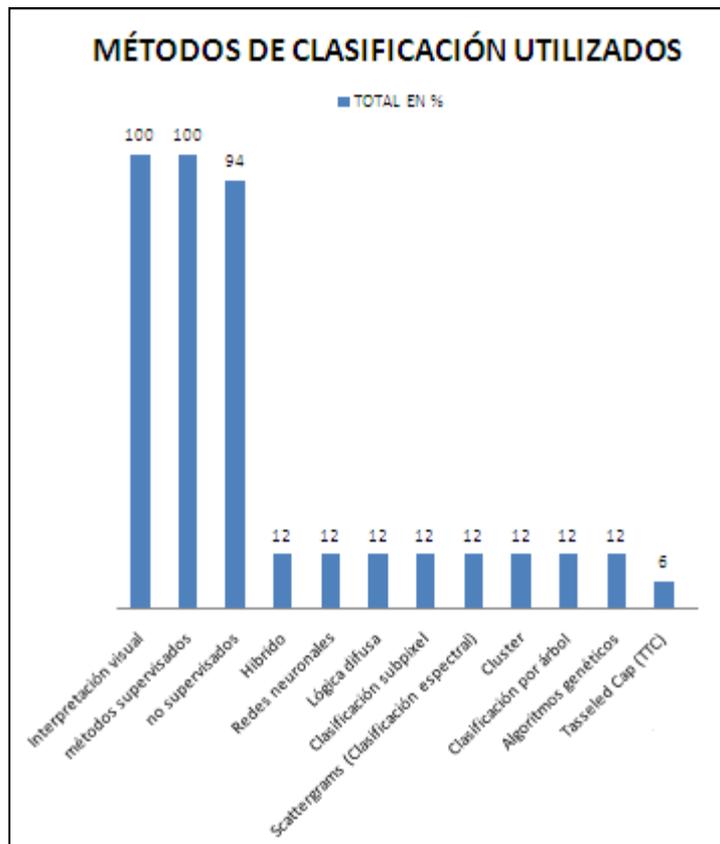


Figura I.3. Listado de métodos de clasificación utilizados para tratamiento digital de imágenes.

1.3 OBJETIVO GENERAL

Evaluar y contrastar los métodos de clasificación basados en píxeles con aquellos métodos orientados a objetos, con el objetivo de buscar el método más apropiado para interpretar cobertura y uso del suelo, en imágenes de moderada y alta resolución.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Evaluar y Contrastar los siguientes métodos de clasificación de imágenes satelitales y exponer su base matemática:

- a. Clasificación No Supervisada basada en píxeles.
 - b. Clasificación Supervisada basada en píxeles.
 - c. Clasificación No Supervisada orientada a objetos.
 - d. Clasificación Supervisada orientada a objetos.
2. Aplicar los cuatro métodos indicados para la clasificación de imágenes satelitales.
 3. Evaluar los resultados obtenidos de la clasificación.

1.5 METAS DEL PROYECTO

Para cubrir los objetivos específicos, las metas son:

1. Exponer la teoría matemática que fundamenta los métodos de clasificación:
 - a. Clasificación No Supervisada basada en píxeles (Isodata).
 - b. Clasificación Supervisada basada en píxeles (Máxima Probabilidad).
 - c. Clasificación No Supervisada orientada a objetos (Isoseg).
 - d. Clasificación Supervisada orientada a objetos (Bhattacharya).
2. Obtener cuatro mapas de uso del suelo y cobertura vegetal del área de estudio por medio de la aplicación de las cuatro metodologías propuestas a la imagen Aster.
3. Obtener cuatro mapas de uso del suelo y cobertura vegetal del área de estudio por medio de la aplicación de las cuatro metodologías propuestas a la imagen Ikonos.
4. Contrastar los resultados obtenidos de las clasificaciones con datos de campo, mediante una tabla.
5. Obtener un cuadro comparativo y descriptivo de las metodologías utilizadas en un formato A1, como material didáctico y de apoyo para la cátedra de Teledetección.

1.7 CLIMA.

La precipitación media anual es de 2000 a 4000 mm³, las lluvias torrenciales y continuas se concentran entre los meses de marzo a noviembre y los meses de menor precipitación son de diciembre a febrero; posee una temperatura media de 28 grados centígrados y está dentro del Bosque Húmedo Tropical (B.H.T); el régimen de vientos es de calma con velocidades entre 0,4 m/s a 10 m/s; los meses con mayor presencia de horas (hs.) de sol son de julio a enero; y los meses deficitarios de evapotranspiración son desde junio hasta agosto.

1.8 ZONAS DE VIDA.

Según Cañadas (1983), quien siguió las zonas de vida de Holdrige, indica que el área de estudio se encuentra en el (B.H.T) la cual se ubica en latitudes tropicales (entre los 10° de latitud norte y sur) y altitudes bajas, en zonas donde la precipitación es alta (mayor a 2000 mm³/año y por lo menos 120 mm³/año en el mes más seco).

1.9 FORMACIONES VEGETALES

De acuerdo al Sistema de Clasificación de Vegetación para el Ecuador, en la zona de estudio se distingue la formación vegetal Bosque Siempreverde de Tierras Bajas; esta formación incluye áreas boscosas asentadas sobre planicies y colinas medianamente disectadas y bosques sobre tierras planas con buen drenaje. Estos son los llamados Bosques de Tierra Firme que cubren la mayor parte de las tierras bajas amazónicas, además se incluyen los bosques sobre suelos relativamente planos de origen aluvial o coluvial, contiguos a los ríos.

Así mismo a pesar de las diferencias anotadas, los bosques de suelos aluviales y coluviales de la Amazonía conforman fisonómicamente una sola unidad, diferenciándose en la composición florística y estructura (Sierra et al.1999).

1.10 FLORA

Por mencionar dentro del territorio del Cantón Shushufindi está la reserva faunística Limoncocha, declarada área protegida el 23 de septiembre de 1985, la cual es un ecosistémica frágil, su flora está constituida por especies de la Cuenca del Amazonas; aquí se encuentra el Bosque Secundario que tiene árboles emergentes, que alcanzan fácilmente los 30 m de alto. En la Tabla I.2, se indican algunas especies de la zona.

Tabla I.2. Especies de la zona de estudio

Familia	Especie	Nombre Nativo
Mimosaceae	Inga ruiziana	Guabilla
	Acacia glomerosa	Dormilón
Euphortbiaceae	Drypetes amazonica	
Cecropiaceae	Cecropia ficifolia	
	Cecropia sciadophylla	Guarumo
Caricaceae	Jacaratia digitata	Papayuelo
Arecaceae	Attalea butyracea	Mocora
	Iriartea deltoidea	
Mimosaceae	Inga oerstediana	
Bombacaceae	Ochroma pyramidale	Balsa
Euphorbiaceae	Sapium marmieri	
Boraginaceae	Cordia alliodora	Laurel
Clusiaceae	Vismia floribunda	

Fuente: Cinge Cia. Ltda & Petroproducción, 2007.

1.11 DESCRIPCIÓN PRODUCTIVA Y SU RELACIÓN CON EL USO DEL SUELO

Productivamente el oriente ecuatoriano y consecuentemente el área de estudio de este proyecto, tiene tres épocas marcadas por varios acontecimientos históricos que se pueden relacionar con el uso del suelo.

La primera, responde a las culturas indígenas asentadas ancestralmente en grandes extensiones del B.H.T, en la cual todas éstas consideraban al territorio

como un espacio de subsistencia para la comunidad, los mismos que se vieron afectados en su modus vivendi por la conquista española.

En la segunda, en donde se marco el Boom Petrolero con la entrada de las compañías Shell en 1921, la Texaco y la Gulf en 1972, en donde ya comienza a alterarse el paisaje debido a la deforestación por exploración, vialidad y producción petrolera.

Finalmente, en la tercera se produce la colonización del oriente y la reforma a la Ley de Agraria, la misma que se dió en el año 1973 a través de su organismo ejecutor el Instituto Ecuatoriano de Reforma Agraria y Colonización (IERAC) y posteriormente con el Instituto Nacional de Desarrollo Agrario (INDA) para el año de 1994; hechos que definitivamente propulsarán el cambio del uso del suelo, de bosque puro a zonas agrícolas y ganaderas; y se comenzarán a producir algunos productos tales como: caucho, cacao, café, palma africana y palmito.

1.12 SOCIO ECONOMÍA Y DEMOGRAFÍA

El cantón Shushufindi, es uno de los puntales de la actividad petrolera de la nación, según el INEC para el censo de población y vivienda del 2010, se registró una población de 44328 habitantes.

Tiene un crecimiento aproximado de 4,8 % promedio anual, el 67,2% de su población reside en el área rural; se caracteriza por ser una población joven, ya que el 47,1 % son menores de 20 años, el 24.52% de la población económicamente activa son agricultores o trabajan en la tierra.

Las principales actividades que se cumplen en su población son: empleados directos e indirectos de petroleras (operarios de maquinarias y trabajos no calificados), la agricultura, comercio, caza, pesca, silvicultura u otros en menor porcentaje.

Las áreas agrícolas están pobladas principalmente por extranjeros e inmigrantes (que comenzaron a aparecer a principios de 1970), descendientes que vinieron desde la costa y provincias de la sierra del Ecuador.

1.13 DATOS ANTRÓPICOS

El área urbana goza de servicios básicos de mediana calidad, el área rural tiene un buen servicio eléctrico, llegando con su red a algunos lugares carrozables remotos, mas no a comunidades muy lejanas.

La transportación, es escasa y no frecuente, sus vías principales son muy buenas y asfaltadas, sus vías secundarias por lo general son lastradas y mantenidas por las petroleras.

La infraestructura rural aun se encuentra en desarrollo, se ha notado un crecimiento muy acelerado al declararse la emergencia vial del oriente en el 2007, sin embargo las infraestructuras hoteleras y turísticas tienen gran auge principalmente por las empresas petroleras y el ecoturismo interprovincial como ejemplo: La Laguna de Limoncocha, Bosque Protector Pañacocha, Sacha Lodge, Poza Honda, San Pablo, entre otros.

Como ejemplo en la Figura I.5 se puede observar lo siguiente: en la foto I.2a Cultivos Permanentes, en la I.2b Plantaciones Agrícolas, en la I.2c Bosque y en la I.2d Pasto Plantado atravesado por Infraestructura Petrolera.

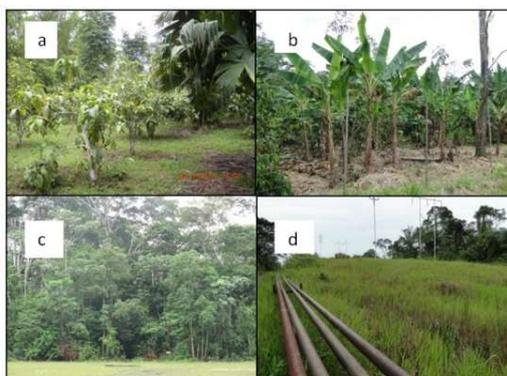


Figura I.5. Fotos del área de estudio

Fuente: Mejía y Moncayo, 2010.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE TELEDETECCIÓN

2.1.1 DEFINICIÓN

Para entender el concepto de teledetección, se incluyen algunas definiciones:

- Según Schowengerdt (1983), Swain y Davis (1978), es “la ciencia de derivar información con respecto a un objeto, a partir de medidas hechas a distancia sin entrar en contacto con el mismo”.
- Según Lillesand y Kiefer (1994), es “la ciencia y arte de obtener información con respecto de un objeto, área o fenómeno por el análisis de datos adquiridos por un sistema que no se encuentra en contacto con el objeto, área o fenómeno de la investigación”.
- Entonces, de acuerdo a lo indicado, la Teledetección es la ciencia que permite obtener información de un objeto sin estar en contacto directo con el mismo, esto se realiza mediante una plataforma espacial o aérea, detectando y grabando la energía emitida o reflejada de la superficie terrestre.

2.1.2 COMPONENTES DE UN SISTEMA DE TELEDETECCIÓN

Existe una fuente emisora de luz que por lo general es el sol que emite energía como radiación electro-magnética (Chuvieco 2007), (ver capítulo 2.2) que interactúa con la superficie terrestre en forma de refracción, emisión o reflexión-emisión y esta energía es captada por satélites que los convierten en datos y

éstos son transmitidos a tierra para su procesamiento y análisis (ver Figura II.1).

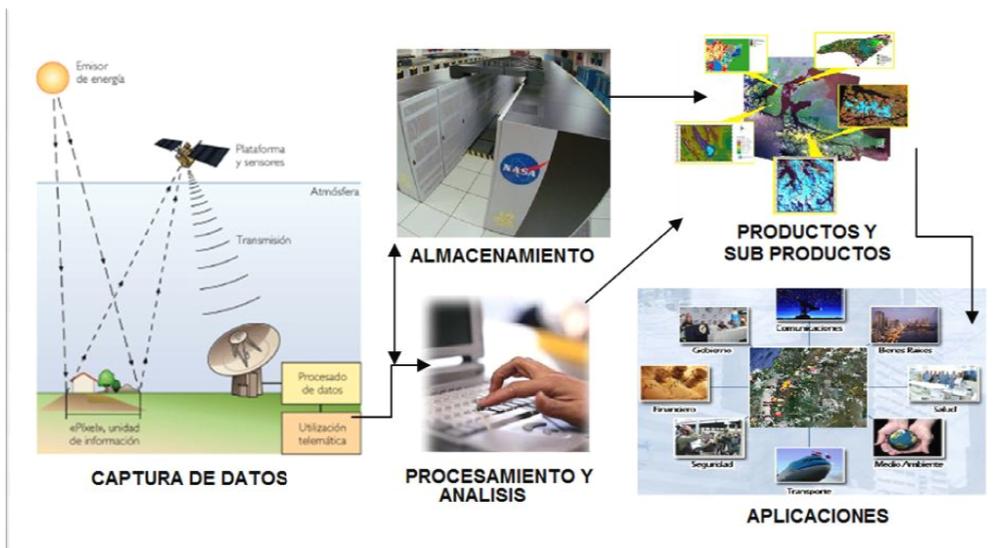


Figura II.1. Componentes de un sistema de teledetección.

Elaborado por: Mejía y Moncayo, 2011.

2.2 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.

Según la teoría ondulatoria, la energía electromagnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre sí: eléctrico y magnético.

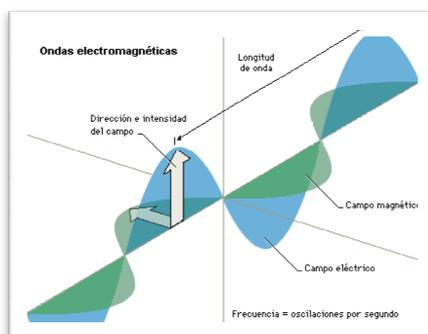


Figura II.2. Esquema de la longitud Electromagnética.

Fuente: http://q-organicauce.wikispaces.com/spectro+electromagnetico_LRAC_Espectroscopia, 2011.

Ésta energía se puede describir por dos elementos: F (frecuencia) y l (longitud de onda). Expresados en la Ecuación.II.1 ([Ec. II.1]).

[Ec. II.1]

$$C = F * l$$

Donde:

C = Velocidad de la luz = 300.000 km/s

Por sus características, el espectro electromagnético puede definir cualquier tipo de energía según su longitud de onda y frecuencia, comprende desde muy pequeñas como rayos gama, x, pasando por el espectro visible e infrarrojo hasta las muy grandes (kilométricas) de frecuencia muy alta como enlaces de radio de gran distancia, con variados esquemas de aplicaciones y utilidades, como se puede ver en la Figura II.3.

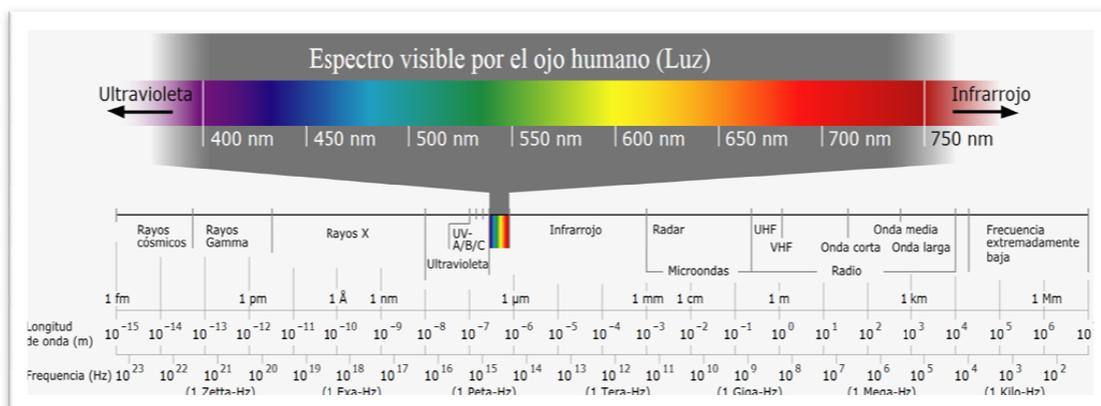


Figura II.3. Rango del Espectro Electromagnético

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Electromagnetic_spectrum-es.svg, 2011

2.2.1 LOS ESPECTROS MÁS USADOS EN LOS SENSORES REMOTOS

Los espectros más utilizados en sistemas y plataformas de teledetección se explican en la Tabla II.1.

Tabla II.1. Espectros más utilizados en Sensores Remotos

ESPECTRO		APLICACIÓN	RANGO DE LONGITUD DE ONDA
Visible		Es la única radiación que pueden captar el ojo humano	0.4 - 0.7 micrómetros (μm)
	Azul	En combinación de estos tres rangos del espectro visible se puede discriminar principalmente: suelo, agua, vegetación, nieve.	0.4 - 0.5 μm
	Verde		0.5 - 0.6 μm
	Rojo		0.6 - 0.7 μm
Infrarrojo Cercano		Puede detectarse mediante películas o sensores especiales y ayuda a discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.	0.7 - 1.3 μm
Infrarrojo medio		En este espectro se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.	1.3 - 8 μm
	Infrarrojo de Onda Corta (SWIR)	Discrimina de manera efectiva humedad en la vegetación y en los suelos.	1.3 - 2.5 μm
	Infrarrojo Medio (IRM)	Discrimina focos de alta temperatura como quemados y volcanes activos.	Alrededor de 3.7 μm
Infrarrojo Lejano o Térmico		Incluye la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.	8 a 14 μm
Micro-ondas		Con gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa. (radar)	Por encima de 1 mm

Fuente: Chuvieco, 2007

2.2.2 RESOLUCIÓN DE UN SISTEMA SENSOR

Según Estes y Simonett (1975), se define como la habilidad para discriminar información de detalle. Según Chuvieco (2007), el concepto de resolución implica diversas manifestaciones que se detallan a continuación:

RESOLUCIÓN ESPACIAL

Es la identificación por dimensión del objeto más pequeño que es posible distinguir en una imagen. Viene definida por la mínima unidad espacial para la que el sensor registra los datos, es decir lo que se denomina "píxel"¹ (Chuvieco 2007).

RESOLUCIÓN ESPECTRAL

Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor.

RESOLUCIÓN TEMPORAL

También conocido como frecuencia de cobertura o periodo de revisita, es el espacio de tiempo o recurrencia de tiempo para capturar imágenes de una zona en concreto de la superficie terrestre.

RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA

Esta mide el grado de susceptibilidad del sensor, es decir su capacidad para detectar las variaciones en la intensidad de la energía que llega hasta él, la misma se expresa en bits ("bit" es el acrónimo de dígito binario, que se expresa en valores de 0 y 1).

RESOLUCIÓN ANGULAR

Es la capacidad de un sistema de observar el mismo objeto desde distintos ángulos.

¹ Conocido como elemento de imagen y es el mínimo elemento que constituye la imagen digital.

2.3 TIPOS DE SENSORES

Según Chuvieco (2007), sensor es el equipo que es capaz de recibir la energía procedente de distintas cubiertas. Existen dos tipos de sensores:

- Sensores activos: Son los capaces de emitir y recibir su propio haz de energía.
- Sensores pasivos: Son los que reciben la energía proveniente de un foco exterior a ellos, por ejemplo la energía solar.

2.4 SENSOR ASTER

El Sensor multiespectral Aster (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), ver Figura II.4, construido por el Ministerio de Economía, Transporte e Industria de Japón (Meti) y lanzado en el satélite TERRA en diciembre de 1999, cumple la función de un satélite de observación terrestre multi objetivo.

La misión del proyecto consistió en la apoyo del gobierno de Estados Unidos (EE.UU) mediante su programa NASA y el Meti de Japón, para la colaboración científica en lanzar un instrumento de nueva generación que cumpla las funciones del Landsat Thematic Mapper y el japonés JERS-1 OPS scanner, proveyendo no solo de imágenes multitemáticas, sino también de modelos tridimensionales del terreno. En la siguiente figura se puede observar al sensor Aster dentro del satélite Terra.

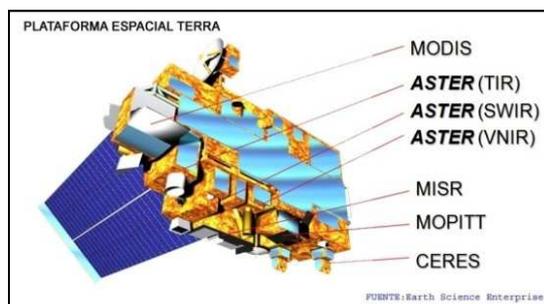


Figura II.4. Esquema del sensor Aster dentro del Satélite Terra.

Fuente: Review of NASA's Solid-Earth Science Strategy – ESE, 2010

2.4.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL SENSOR ASTER

Las características del sensor Aster se muestran en la siguiente tabla:

Tabla II.2. Características técnicas del Sensor Aster.

Altitud	705 km				
Tipo de órbita	Sincrónica con el sol				
Capacidad de adquisición de imágenes	Franjas de 60 x 60 km				
Subsistema	Banda No.	Longitud de onda (µm)	Resolución espacial (m x m)	Rango Dinámico	Período de Revisita
VNIR (Visible e infrarojo cercano)	1	0.52-0.60	15	8 bits	16 días
	2	0.63-0.69			
	3N	0.78-0.86			
	3B	0.78-0.86			
SWIR (Infrarojo de onda corta)	4	1.60-1.70	30	8 bits	
	5	2.145-2.185			
	6	2.185-2.225			
	7	2.235-2.285			
	8	2.295-2.365			
	9	2.360-2.430			
TIR (Infrarojo Termal)	10	8.125-8.475	90	12 bits	
	11	8.475-8.825			
	12	8.925-9.275			
	13	10.25-10.95			
	14	10.95-11.65			

Fuente: https://lpdaac.usgs.gov/products/aster_products_table, 2011

2.4.2 APLICACIONES.

Existen múltiples aplicaciones de las imágenes Aster, gracias a su amplitud en su resolución multiespectral (ver Figura II.5), en la Tabla II.3 se pueden observar algunas de sus aplicaciones.

Tabla II.3. Aplicaciones imágenes Aster

CAPACIDADES	APLICACIONES
Capacidad de estereoscopía en la propia orbita.	Generación de Modelos Digitales de Elevación y curvas de nivel de la zona, la calidad de estos modelos depende directamente de los puntos de control tomados en campo, además con esto se pueden visualizar las imágenes en tres dimensiones.
Bandas espectrales de 15 m, 30 m y 90 m	Prospección minera, vulcanología, litología, geología, uso del suelo y cobertura vegetal, agricultura de precisión, planificación de volúmenes de producción y productividad del agro, estudios sobre erosión y desertificación, recursos naturales, impactos ambientales y zonificación.
Análisis multitemporal	En el caso de que se requiera puede dar seguimiento de fenómenos naturales cada dos días. Con la variación del ángulo de captura. (lo cual no implica un periodo de revisita).

Elaborado por: Mejía y Moncayo, 2011.

En la siguiente figura, se puede observar gráficamente las bandas y sus correspondientes valores en el espectro electromagnético, que utiliza el sensor Aster.

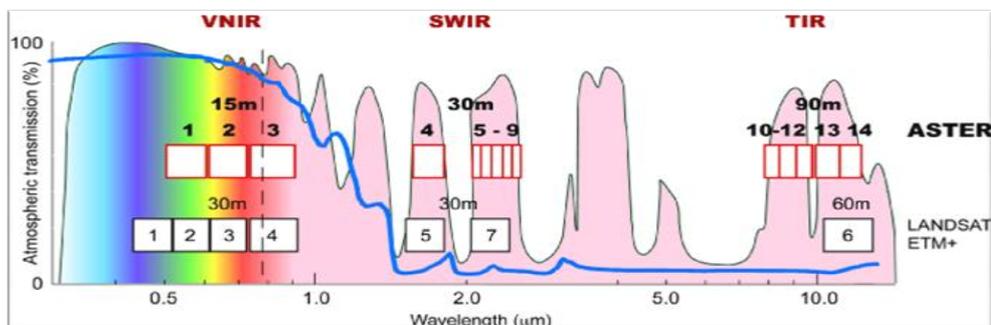


Figura II.5. Grafico de las curvas de respuesta espectral².

Fuente: <http://asterweb.jpl>, 2010

Las imágenes Aster se pueden adquirir muy fácilmente mediante la plataforma de internet en “Earth Resources Observation and Science (EROS Data Center)” o en su buscador GLOVIS³ con un costo de 60 USD por imagen; para uso

² VNIR (Visible e infrarrojo cercano), SWIR (Infrarrojo de onda corta), TIR (Infrarrojo Termal)

³ <http://glovis.usgs.gov/>

académico las imágenes son gratuitas (terralook en jpg), estas se las puede descargar de la dirección <http://glovis.usgs.gov/>.

2.5 SATÉLITE IKONOS

Ikonos (procede del idioma griego y significa *imagen*) es un satélite comercial de teledetección. Fue el primero en recoger imágenes con disponibilidad pública de alta resolución con un rango entre 1 y 4 metros de resolución espacial. Las imágenes del satélite Ikonos (ver Figura II.6) empezaron a ponerse a la venta el primero de enero de 2000. La empresa norteamericana Space Imaging es la propietaria del satélite.

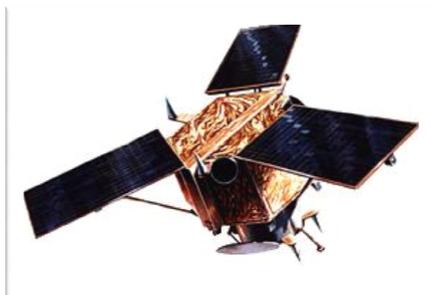


Figura II.6. Imagen del Satélite Ikonos.

Fuente: Chuvieco, 2007.

2.5.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL SATÉLITE IKONOS

Tabla II.4. Característica técnicas del Satélite Ikonos.

Altitud	680 km
Inclinación	98.1°
Velocidad	7 km / s
Sentido de la órbita	Descendente
Tipo de órbita	Sincrónica con el sol
Resolución espacial	Pancromática: 1 metro / Multiespectral: 4 m
Bandas espectrales	Pancromática 0,45 – 0,90 μm Azul 0,45 – 0,52 μm

	Verde 0,52 – 0,60 μm Rojo 0,63 – 0,69 μm Infrarrojo próximo 0,76 – 0,90 μm			
Capacidad de adquisición de imágenes y compra	Franjas de 11 km x 100 km hasta de 11 km x 1000 km Mosaicos de hasta 12.000 km ² 20.000 km ² de área de imágenes captadas en una pasada Área mínima para pedidos de imágenes de archivo (si están disponibles) = 49 Km ² . Área mínima para asignación de captura de imágenes nuevas = 100 km ²			
Frecuencia de revisita	2,9 días en el modo Pancromático 1,5 día en el modo Multiespectral Observación: Esos valores valen para latitudes de +/- 40°. La frecuencia de revisita para latitudes mayores será menor, y mayor para las latitudes cerca de la línea ecuatorial.			
Banda Multi espectral	Longitud de Onda (μm)	Región del espectro electromagnético	Resolución (m x m)	Tamaño de la escena (km)
1	0,45 a 0,52	Azul	4	11 x 11
2	0,52 a 0,60	Verde	4	11 x 11
3	0,63 a 0,69	Rojo	4	11 x 11
4	0,76 a 0,90	Infrarrojo	4	11 x 11
5	0,45 a 0,90	Visible e Infrarrojo	1	11 x 11

Fuente: Ribeiro, 2006.

2.5.2 APLICACIONES.

Existen varias aplicaciones de las imágenes Ikonos, en la Tabla II.5 se pueden observar algunas de ellas.

Tabla II.5. Aplicaciones de las imágenes Ikonos.

CAPACIDADES	APLICACIONES
Capacidad de estereoscopía en la propia órbita	Generación de Modelos Digitales de Elevación y derivado de este, curvas de nivel. La calidad de estos modelos depende directamente de los puntos de control tomados en campo, además con esto se pueden visualizar las imágenes en tres dimensiones. Se puede proveer de visión estereoscópica por la compra de pares estereoscópicos.

Banda espectral de 1 m	Aplicaciones fotogramétricas, generación de orto imágenes y procesos de planificación urbana.
Bandas espectrales de 4 m	Agricultura de precisión, volúmenes de producción y productividad del agro, ordenamiento territorial, catastros, turismo y planificación urbana y rural, estudios de impacto ambiental, planificación urbanística, desastres naturales, geología a detalle, inventario de infraestructura.
Análisis multitemporal	Puede dar seguimiento de fenómenos naturales con un tiempo menor a tres días

Elaborado por: Mejía y Moncayo, 2011.

2.6 COMPARACIÓN ENTRE ASTER E IKONOS

En la Tabla II.6, se puede observar un análisis comparativo entre los dos sensores.

Tabla II.6. Comparación entre Aster e Ikonos.

ASTER	IKONOS
Es un sensor para aplicaciones regionales (resolución 15 m a 90 m.)	Es un sensor para dar soluciones locales (resolución 1 y 4 m.)
Posee 14 bandas. (ver Figura II.7)	Posee 5 bandas. (ver Figura II.7)
Posee bandas termales.	No posee bandas termales.
No posee banda pancromática.	Posee una banda pancromática.
Tiene un periodo de revisita de 16 días.	Tiene un período de revisita de 1.5 días para multiespectral y de 2.9 días para pancromático.
Tiene un tamaño de escena de 60 x 60 km ² .	Tiene un tamaño de escena de 11 x 11 km ² .
Tiene capacidad de obtener modelos digitales de elevación, con una resolución espacial de 15 m	Tiene capacidad de obtener modelos digitales de elevación con una resolución espacial de 1 m
Está a una altura de 705 km.	Está a una altura de 680 km.
Poseen el mismo tipo de órbita, sincrónica con el sol.	

Elaborado por: Mejía y Moncayo, 2011

En la siguiente figura se muestra, gráficamente la comparación entre los sensores estudiados.

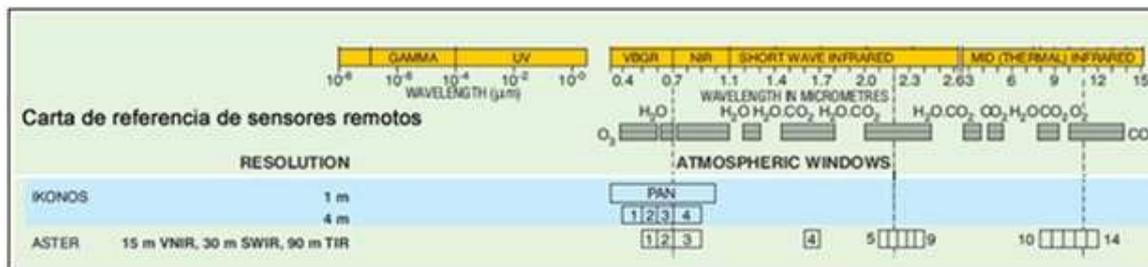


Figura II.7. Comparación de los sensores Aster e Ikonos.

Fuente: Mauger, 2003.

2.7 CORRECCIONES A LAS IMÁGENES SATÉLITES.

Los procesos que tienden a eliminar cualquier anomalía en una captura idónea de una imagen satélite, puede ser clasificados en:

- **Corrección geométrica**, referida a una nueva georreferenciación cartográfica (ver capítulo 2.8)
- **Corrección radiométrica**, son técnicas que tienden a minimizar píxeles perdidos (ruido), corrección de líneas de píxeles (bandeado), correcciones atmosféricas (cuando el espesor de la atmosfera es distinto), variando sus números digitales (ND) originales.
- **Métodos visuales**, cuando existen coberturas de nubes o bruma, las cuales se excluyen visualmente del proceso de análisis. (ver capítulo 2.12).

2.8 GEORREFERENCIACIÓN

Según Sarría (2008), es el cambio en la posición que ocupan los píxeles que forman una imagen. Al tratarse de un formato digital, esta transformación puede basarse en funciones numéricas, que permiten modificar muy flexiblemente la geometría de la imagen. La expresión general de este tipo de funciones sería:

$$f(\mathbf{c}') = f_1(c, l); f(x, y)$$

$$f(l')=f_2(c,l); f(x,y)$$

Esto es, las coordenadas columna y línea (c' y l') de la imagen corregida son función de las coordenadas columna y línea de la imagen de entrada (c y l) o de las coordenadas del mapa al que se pretende superponer la imagen (x , y). Por tanto, esta transformación puede emplearse tanto para corregir cartográficamente una imagen, como para superponer dos o más imágenes entre sí. En el primer caso se pretende encontrar una relación que transfiera los ND de la imagen a su posición cartográfica, en la proyección requerida (para este proyecto de grado, la Universal Transversal de Mercator, UTM). Esto permite que la imagen resultante pueda integrarse a un Sistema de información geográfica (Sarría 2008).

Según Chuvieco (2007), la georreferenciación de una imagen, se realiza en tres fases las cuales se explican a continuación:

2.8.1 LOCALIZACIÓN DE PUNTOS COMUNES A LA IMAGEN CON FUENTES DE MAYOR PRECISIÓN (PUNTOS DE GEORREFERENCIACIÓN)

Para calcular cualquier función entre dos o más variables es necesario contar previamente con una serie de observaciones comunes a todas ellas. De la misma forma, las funciones que permiten transformar coordenadas entre la imagen y una fuente de mayor precisión requieren localizar una serie de puntos comunes a ambos, que se conocen como puntos de control (Chuvieco 2007).

De esos puntos se calculan las funciones de ajuste y la calidad del mismo dependerá del cuidado con que se localicen. Para esto, se requiere atender a tres aspectos en la selección de dichos puntos de control como son: el número, la localización y la distribución (Chuvieco 2007).

- **El número** idóneo de puntos de control depende de la complejidad geométrica de la imagen.
- En **la localización** se busca una serie de puntos que se encuentren en lugares discernibles e identificables, así como objetos perfectamente

reconocibles (como por ejemplo intersección de caminos o cruce de ríos.)

- En **la distribución** deben estar adecuadamente repartidos y de forma homogénea por toda la imagen.

Una buena distribución y separación de los puntos se puede observar en la siguiente figura.

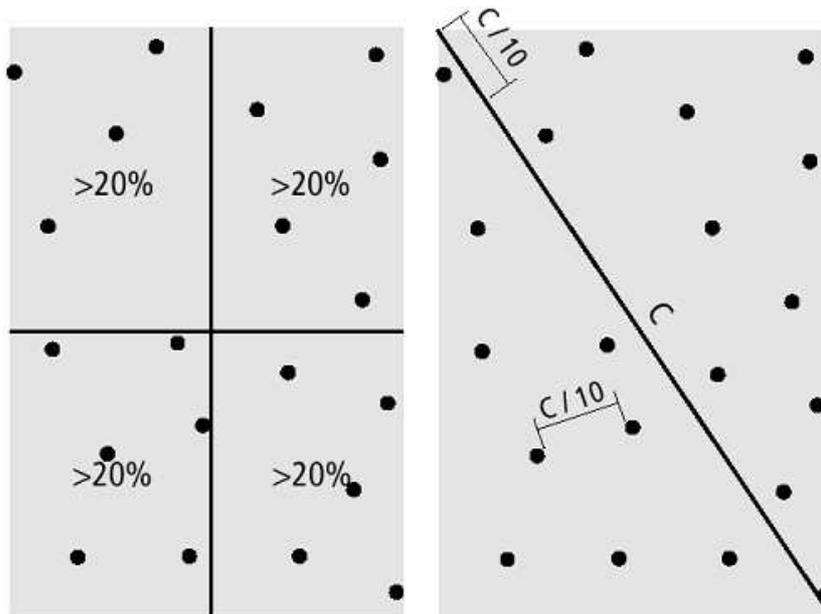


Figura II.8. Características ideales para la distribución de los Puntos de Control. A la izquierda, distribución espacial. A la derecha, separación entre puntos.

Fuente: Tomado de Cialek et al., 1999.

2.8.2 CÁLCULO DE LAS FUNCIONES DE TRANSFORMACIÓN ENTRE LAS COORDENADAS DE LA IMAGEN OBJETIVO Y LAS DE REFERENCIA

Según Sarría (2008), lo primero que hay que decidir es el tipo de ecuación que se va a utilizar (Ver Tabla II.7). El orden del polinomio determina la flexibilidad del ajuste y de la transformación, normalmente se emplean transformaciones de tipo:

Lineal (polinomio de grado 1)**[Ec. II.2]**

$$X = Ac + Bf + C$$

[Ec. II.3]

$$Y = Dc + Ef + F$$

Cuadrático (polinomio de grado 2)**[Ec. II.4]**

$$X = Ac + Bf + Cc^2 + Df^2 + Ecf + F$$

[Ec. II.5]

$$Y = Gc + Hf + I c^2 + J c^2 + Kcf + L$$

Cúbico (polinomio de grado 3).**[Ec. II.6]**

$$X = Ac + Bf + Cc^2 + Df^2 + Ecf + Fc^2 f + Gf^2 c + Hf^3 + I c^3$$

[Ec. II.7]

$$Y = Jc + Kf + Lc^2 + Mf^2 + Ncf + Oc^2 f + Pf^2 c + Qf^3 + Rc^3$$

Empleando el procedimiento de los mínimos cuadrados, se pueden calcular los valores de los coeficientes (A, B,...,etcétera), a partir de las coordenadas de un conjunto de puntos de control. Se trata de puntos en los que se conoce tanto la fila y la columna como las coordenadas reales. El número mínimo de puntos de control necesario para georreferenciar una imagen se puede obtener con la siguiente ecuación:

[Ec. II.8]

$$Np = \frac{(o+1)(o+2)}{2}$$

Donde:

o : Es el orden de los polinomios de transformación.

En una publicación realizada por Villa (2004), indica que normalmente se necesita unos 3 puntos de control sobre el terreno (PCT) por el número de

coeficientes del polinomio, distribuidos de forma consistente.

Es importante determinar cuál es el tipo de transformación más adecuada en función del tipo de distorsiones que se supone que aparecen en la imagen y la cantidad y calidad de los puntos de control. Es necesario tener en cuenta que cuanto mayor sea el grado de los polinomios implicados, más sensible será la transformación a errores en la selección de los puntos de control. En la Tabla II.7 se da una descripción de las características de los polinomios de transformación.

Tabla II.7. Característica de los polinomios de transformación.

ORDEN DEL POLINOMIO	CARACTERÍSTICAS
Primer Orden	Las transformaciones de primer orden se pueden usar para proyectar imágenes crudas en una proyección cartográfica, convertir una proyección cartográfica a otra proyección cartográfica y en la rectificación de imágenes de áreas relativamente pequeñas.
Segundo Orden	Pueden usarse para convertir datos de longitud y latitud a una proyección plana, para datos que cubran un área grande (Para tener en cuenta la curvatura de la Tierra).
Tercer Orden	Se utilizan con fotografías aéreas distorsionadas, en escaneo de mapas deformados y con imágenes de radar.
Cuarto Orden	Pueden usarse en fotografías aéreas muy distorsionadas.

Fuente: Erdas Image, 2005.

En el proceso también una estimación del error cuadrático medio (*ECM*), expresado en la [Ec. II.9], que resulta muy útil para determinar si es necesario ampliar el número de puntos de control.

[Ec. II.9]

$$ECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X' - X)^2 + (Y' - Y)^2}{n}}$$

Donde:

X' e Y' : Son las coordenadas estimadas por la transformación para cada punto de control.

X e Y : Son las coordenadas reales.

n : Número de puntos de control.

Según Chuvieco (2007), indica que como norma general el ECM debería ser inferior al tamaño del píxel. Lógicamente, cada punto de control va a tener su propio error cuadrático y su cálculo se puede observar en la siguiente ecuación.

[Ec. II.10]

$$ECM = \sqrt{(X' - X)^2 + (Y' - Y)^2}$$

Donde:

X' e Y' : Son las coordenadas estimadas por la transformación para cada punto de control.

X e Y : Son las coordenadas reales.

La [Ec. II.10], permite determinar si existe algún punto erróneo que sea necesario eliminar.

Se aplican las ecuaciones anteriores, con los valores calculados de los coeficientes, a todas las coordenadas iniciales para obtener así sus nuevos valores en el sistema de referencia final. En la siguiente figura se puede observar la explicación gráfica del ECM , donde se observan en azul los puntos observados y en rojo los puntos calculados de la transformación.

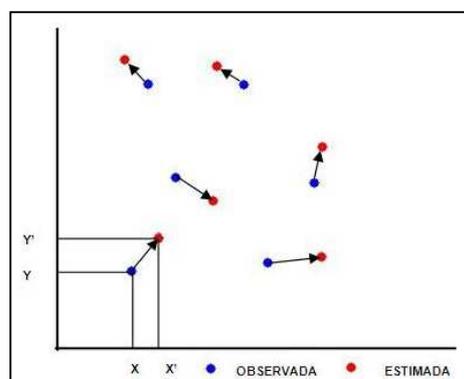


Figura II.9. Explicación gráfica del Error Cuadrático Medio.

Fuente: Elaborado por Mejía y Moncayo, 2011.

2.8.3 TRANSFERENCIA DE LOS NIVELES DIGITALES ORIGINALES A LA NUEVA POSICIÓN, DEFINIDA POR LA TRANSFORMACIÓN PREVIA.

Las funciones antes analizadas permiten traducir coordenadas del mapa a la imagen, pero si se pretende crear una imagen que corresponda adecuadamente con esas coordenadas resulta necesario trasladar, de alguna forma los ND de la imagen original a esta nueva posición. Dicho de otro modo, con estas funciones de transformación se puede crear una nueva matriz, correctamente posicionada, pero vacía; el llenado de esta matriz es precisamente, el objetivo de la última fase de la georreferenciación.

El problema resulta más complejo de lo que pudiera pensarse a primera vista; lo ideal es que cada píxel de la imagen corregida debería corresponder a un solo píxel en la original, lo normal es que no sea así, sino que el píxel de la nueva imagen se sitúe entre varios de la original (ver Figura II.10, Figura II.11 y Figura II.12), ya que este proceso supone una alteración considerable de la geometría original de la escena. Por otra parte, puede variarse también el tamaño del píxel en la imagen corregida, haciendo aún más complejo encontrar el ND que mejor exprese el valor radiométrico detectado por el sensor para esa posición.

Según Chuvieco (2007), el trasvase de los ND a las coordenadas cartográficas de interés puede abordarse por tres métodos:

1) Vecino más próximo (Nearest neighbour): Se basa en situar en cada celdilla de la imagen corregida el ND del píxel más cercano en la imagen original. Ésta es la solución más rápida y la que supone menor transformación de los ND originales (Ver Figura II.10). Su principal inconveniente radica en la distorsión que introduce en rasgos lineales de la imagen (fallas, carreteras o caminos, que pueden aparecer en la imagen corregida como líneas quebradas.)

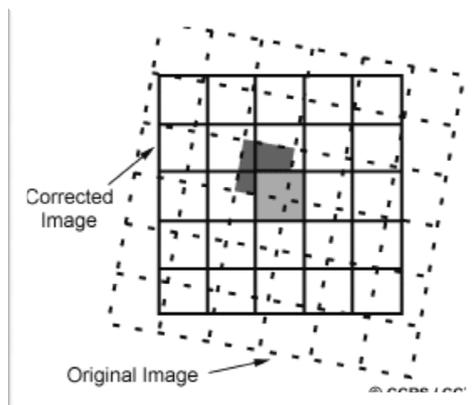


Figura II.10. Vecino más cercano.

Fuente: <http://www.ccrs.nrcan>, 2010.

2) **Interpolación bilineal (Bilinear interpolation):** Supone promediar los ND de los cuatro píxeles más cercanos en la imagen original. Este promedio se pondera según la distancia del píxel original al corregido, tiene una mayor influencia aquellos píxeles que se encuentran más cercanos en la imagen inicial, lo cual reduce el efecto de distorsión en rasgos lineales, pero tiende a difuminar un tanto los contrastes espaciales de la imagen original (ver Figura II.11).

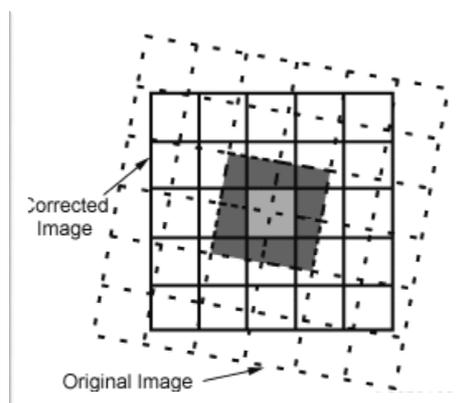


Figura II.11. Interpolación bilineal.

Fuente: <http://www.ccrs.nrcan.gc>, 2010.

3) **Convolución cúbica (Cubic convolution):** Considera los ND de los 16 píxeles más próximos. El efecto visual es más correcto, pero supone un volumen de cálculo mucho más elevado (ver Figura II.12).

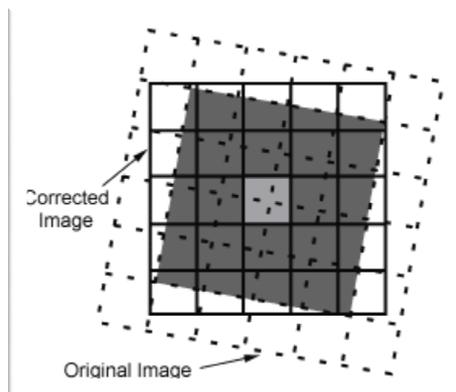


Figura II.12. Convolución Cúbica.

Fuente: <http://marswiki>, 2010.

Según Chuvieco (2007), la elección entre uno de los tres métodos depende de la finalidad del proceso. Si pretende corregirse una imagen clasificada, el método del vecino más próximo es la elección obligada, pues es el único que preserva los valores originales al no introducir promedios (que por otra parte, no tendrían sentido en una clasificación temática). Si, por el contrario, se pretende facilitar el análisis visual, habrá de optarse por algoritmos de interpolación más elaborados, concretamente por el de convolución cúbica.

2.9 CONTROL POSICIONAL

Según Atkinson (2007), en su publicación “Estudio Teórico para el Control Posicional en Imágenes de Teledetección Georreferenciadas”, indica que a la hora de trabajar con imágenes de teledetección, resulta de vital importancia el comprobar el hecho de que la georreferenciación ha sido efectuada correctamente. Según Morrison (1995), indica que la calidad posicional es una de las componentes de la calidad del dato geográfico y viene determinada por la exactitud posicional. Según Jakobson y Vauglin (2002), la exactitud posicional es el elemento de la calidad de los datos geográficos (ISO 19113) controlado y evaluado más comúnmente por parte de los institutos cartográficos. Según McGwire (1996), Carnel y Col (2001, 2006), indican que una distorsión posicional no sólo afecta a los aspectos posicionales y geométricos, sino también a los aspectos temáticos y temporales.

2.9.1 PRECISIÓN HORIZONTAL

En el caso de la precisión horizontal cartográfica, el resultado de todos los procesos necesarios para generar una cartografía no ha de superar el límite de percepción visual del ojo humano, Ariza (2009), en el Ecuador el Instituto Geográfico Militar (IGM) utiliza el factor de 0.3 mm (Ruano 2008), cuyo cálculo se lo ilustra en la [Ec. II.11].

[Ec. II.11]

$$T = +/- 0.3 \text{ mm} \times M$$

Donde:

T = Tolerancia de error del mapa.

M = Factor de escala.

En el documento Geospatial Positioning Accuracy Standards del National Standard for Spatial Data Accuracy. En su Apéndice 3 – C del FGDC – STD – 007.3, se recomienda que la fuente de mayor precisión sea unas tres veces más exacta que el conjunto de datos espaciales con que se compara, por ende las precisiones obtenidas con los puntos GPS deberán ser 3 veces más exacta (ver [Ec. II.12]) que lo esperado en la desviación típica aceptable, obtenido de la ecuación [Ec. II.11].

[Ec. II.12]

$$PGPS = +/- (T \times \frac{1}{3})$$

Donde:

$PGPS$ = Precisión GPS requerida para Georreferenciación de imágenes.

T = Tolerancia de error del mapa.

2.9.2 COMPROBACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL

En el caso del Ecuador, estudios realizados por el IGM sobre Control de la Exactitud Posicional en Cartografía (Ruano 2008), indica que se utiliza la normativa nacional del Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH) y

también internacional ISO/TC 211 (19913), que definen del cómo se obtendrá la exactitud posicional (EP), de un conjunto de datos geográficos, esta metodología está basada en el Test National Map Accuracy Standard (NMAS) que es el empleado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) desde 1947.

Según la norma NMAS, se sigue el siguiente procedimiento:

- Seleccionar una muestra sobre la imagen de al menos 20 puntos y determinar sus coordenadas. Estos puntos deben ser de fácil ubicación, localización y distribución en la imagen. En la localización se busca una serie de puntos que se encuentren en lugares muy discernibles y perfectamente identificables (como por ejemplo intersección de caminos o cruce de ríos.) y en la distribución deben estar adecuadamente repartidos y de forma homogénea por toda la imagen.
- Obtener las coordenadas de los mismos puntos sobre una fuente de mayor exactitud.
- Determinar si se ha alcanzado el estándar de exactitud horizontal predefinido. En el caso del USGS, el estándar indica que, como máximo el 10% de los puntos de la muestra pueden tener un error horizontal que sobrepase el valor umbral del resultado de la ecuación [Ec. II.12].

Para saber si la imagen georreferenciada se encuentra con un correcto control posicional con respecto a la realidad. Se aplicaran las siguientes fórmulas:

Para las **coordenadas en Norte**:

[Ec. II.13]

$$\Delta N = Nd - Nc$$

Donde:

ΔN = Diferencia de la posición al Norte, entre la imagen georreferenciada y los puntos de control GPS.

Nd = Posición del punto en la imagen georreferenciada.

Nc = Posición del punto GPS en el terreno.

Para las **coordenadas en Este**:

[Ec. II.14]

$$\Delta E = Ed - Ec$$

Donde:

ΔE = Diferencia de la posición al Este, entre la imagen georreferenciada y los puntos de control GPS.

Ed = Posición del punto en la imagen georreferenciada.

Ec = Posición del punto GPS en el terreno.

2.9.3 NIVEL DE CONFIANZA

Kirby (2007), indica que para calcular el nivel de confianza de una muestra, se puede utilizar la siguiente ecuación:

[Ec. II.15]

$$n = \frac{\delta^2 t^{\alpha/2^2}}{\tau^2}$$

En donde:

n = tamaño de la muestra.

δ = la desviación estándar.

$t^{\alpha/2}$ = es el valor que representa el área bajo la curva de la t de student y que sirve para el cálculo del nivel de confianza.

τ = es el error permitido o tolerado en el proceso.

2.10 TEORÍA DEL SISTEMA DE NAVEGACIÓN GLOBAL POR SATÉLITE (GNSS).

Se conoce como GNSS⁴ a los sistemas de navegación por satélite, los cuales son capaces de proporcionar una posición espacial y temporal en cualquier lugar e instante (García 2008).

⁴ Por sus siglas en ingles Global Navigation Satellite System

El más conocido y utilizado en América es el Sistema de Posicionamiento Global Navstar, denominado como GP5, es un sistema de radionavegación espacial propiedad del Gobierno de Estados Unidos y operado por la United States Air Force (USAF). Los GPS han proporcionado la posición, navegación y servicios de sincronización para los usuarios civiles y militares de forma continua en todo el mundo desde su lanzamiento en 1978. Un número ilimitado de usuarios con un receptor GPS puede determinar la hora y el lugar exactos, en cualquier momento de día o de noche y en cualquier parte del mundo. (Global positioning 2008).

Entre los sistemas de navegación por satélite actuales se puede mencionar el sistema ruso GLONASS, el europeo GALILEO y chino COMPASS que se encuentra aún en período de pruebas e implementación.

A través de una red de satélites, un receptor de GNSS es capaz de determinar su posición en cuatro dimensiones (longitud, latitud, altitud, y tiempo), lo que ha dado lugar a multitud de aplicaciones.

2.10.1 ESTRUCTURA DE LOS SISTEMAS DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE

Los sistemas de navegación por satélite tienen una estructura claramente definida, que se divide en tres segmentos distintos: espacial, de control y de usuarios (García 2008).

Además se puede encontrar los llamados sistemas Geoestacionarios⁶ de aumento de la precisión específicos para distintos sectores geográficos como se puede observar en la siguiente figura.

⁵ Por sus siglas en Inglés Global Positioning System

⁶ Satélite que permanece inmóvil sobre un determinado punto de la Tierra. (<http://www.astromia.com/glosario/geoestacionario.htm>, 2011)

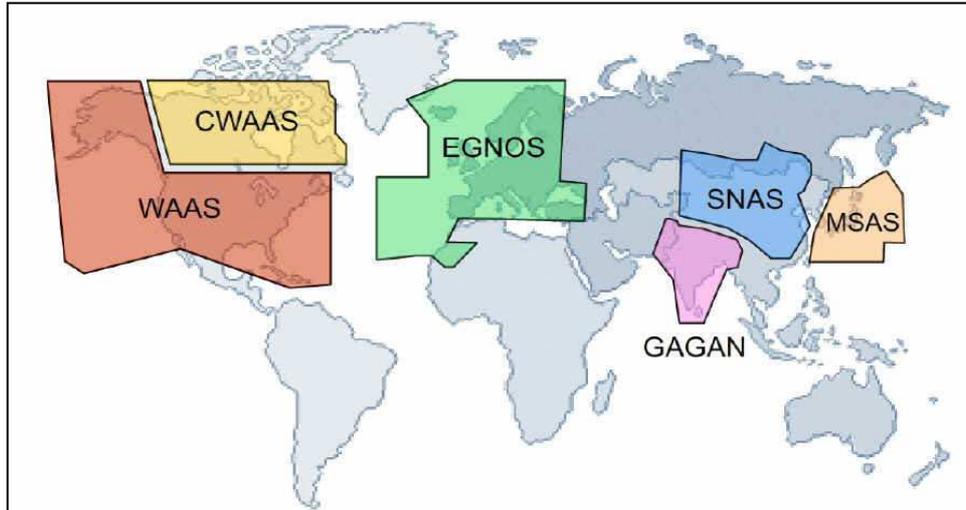


Figura II.13. Sistemas de aumento existentes en la actualidad.

Fuente: <http://jean-paul>, 2010.

2.10.1.1 EL SEGMENTO ESPACIAL

Es el compuesto por los satélites que forman el sistema, tanto de navegación como de comunicación. Mientras que los primeros orbitan alrededor de la Tierra, repartiéndose en distintos planos orbitales (ver Figura II.14), los segundos son los que forman los llamados sistemas de aumento que sirven para la corrección de errores de posicionamiento.

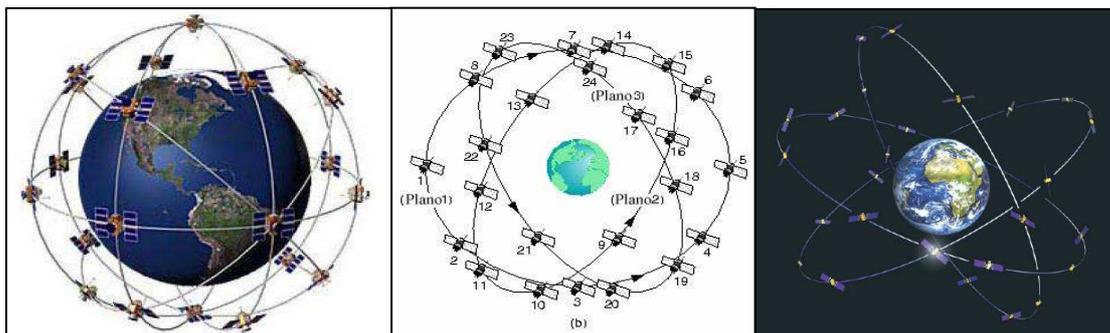


Figura II.14. Segmentos Espacial de navegación de los Sistemas: GPS (Constelación Navstar), GLONASS y Galileo respectivamente.

Fuente: García, 2008.

2.10.1.2 **EL SEGMENTO DE CONTROL**

Está formado por el conjunto de estaciones en tierra que recogen los datos de los satélites. Sus funciones son garantizar las prestaciones del sistema mediante monitoreo del segmento espacial y aplicar correcciones de posición orbital y temporal a los satélites, enviando información de sincronización de relojes atómicos y correcciones de posicionamiento de órbitas a los distintos satélites.

2.10.1.3 **EL SEGMENTO DE USUARIO:**

Diferentes fabricantes producen una gran variedad de equipos y productos para los usuarios de GNSS (como son los receptores). Debido al permanente desarrollo tecnológico, estos equipos son constantemente mejorados en calidad y precisión haciendo cada vez más común su aplicación en diferentes disciplinas.

2.10.2 **FUNDAMENTO PARA EL CÁLCULO DE LA POSICIÓN DE UN PUNTO GNSS.**

El GNSS se basa en la medición de distancias a partir de señales de radio transmitidas por un grupo de satélites cuya órbita se conoce con precisión, son captadas y decodificadas por receptores ubicados en los puntos cuya posición se desea determinar (Casanova 2002).

Si se mide las distancias de al menos cuatro diferentes satélites a un punto sobre la tierra (ver Figura II.15), es posible determinar la posición de dicho punto por trilateración satelital.

2.10.2.1 **TRILATERACIÓN SATELITAL**

Los satélites del sistema de navegación global se encuentran girando alrededor de la Tierra en órbitas predefinidas, siendo posible conocer con

exactitud la ubicación de un satélite en un instante de tiempo dado, convirtiéndose por lo tanto los satélites en puntos de referencia en el espacio.

Un receptor en la Tierra capta la señal de un satélite determinando la distancia entre ambos, matemáticamente es necesario determinar cuatro satélites a fin de poder calcular las cuatro incógnitas x , y , z y tiempo (ver Figura II.15).

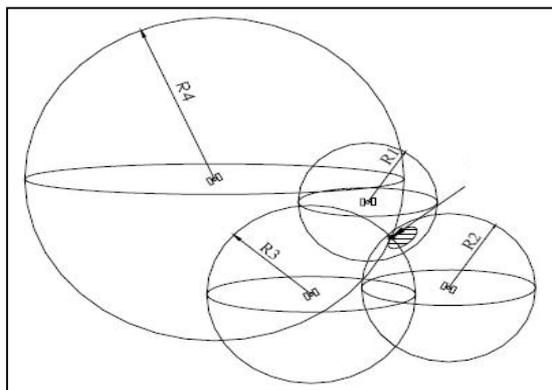


Figura II.15. Puntos resultantes de la intersección de cuatro esferas.

Fuente: Casanova, 2002.

2.10.2.2 SEÑALES DE NAVEGACIÓN, EFEMÉRIDES Y ALMANAQUE.

Según Carrillo (2008), se explican los siguientes conceptos.

- **SEÑALES DE NAVEGACIÓN:** Cada satélite continuamente transmite un mensaje de navegación, donde envía la hora del día, el número de la semana GPS y la información del estado del satélite (todas transmitidas en la primera parte del mensaje), los mensajes son enviados en tramas, que toman 30 segundos en enviarse. Los primeros 6 segundos de cada trama contienen los datos que describen al reloj del satélite y su relación con el tiempo del sistema GPS.
- **EFEMÉRIDES:** Es la información proveniente del satélite que permite calcular su órbita en el instante de la medición, son transmitidas en la segunda parte del mensaje (enviados en los siguientes 12 segundos), es actualizada cada 2 hs. y generalmente es válida por 4 hs., además se prevé actualizaciones cada 6 hs.

- **ALMANAQUE:** Es transmitido en la última parte del mensaje, consiste en la información del estatus y de la órbita en curso de cada satélite en la constelación, un modelo ionosférico, y la información para relacionar el tiempo GPS con el Tiempo Universal Coordinado (UTC, por sus siglas en inglés, Universal Time Coordinated).

2.10.2.3 ERRORES EN LA POSICIONAMIENTO SATELITAL

Los errores que afectan las mediciones con GPS se pueden agrupar en tres diferentes tipos, como muestra la siguiente tabla. (Casanova 2002):

Tabla II.8. Tipos de errores en el posicionamiento satelital.

TIPOS DE ERRORES	ERRORES	DESCRIPCIÓN
ERRORES PROPIOS DEL SATÉLITE	Errores orbitales o de Efemérides	Afectan la ubicación de la posición del satélite en un instante determinado con respecto a un sistema de referencia.
	Errores del reloj	Los relojes originan un diferencial del tiempo entre el sistema del satélite y del sistema del GPS
	Errores de configuración geométrica	La geometría en la ubicación de los satélites utilizados en la determinación de un posicionamiento queda expresado por los parámetros de la dilación de precisión geométrica (DPG) como por ejemplo la dilación de precisión para la posición (PDOP), Es importante, trabajar con un PDOP bajo, entre 4 y 6 es aceptable y por debajo de 4 es muy bueno (http://ocw.upm, 2011).
ERRORES DE LOS MEDIOS DE PROPAGACIÓN	Errores Ionosféricos y Troposféricos.	El posicionamiento por satélite asume que la señal viaja a una velocidad constante igual a la velocidad de la luz. Sin embargo, esta velocidad se mantiene constante solamente en el vacío. La señal varía al penetrar la Ionosfera o la Troposfera, para corregir esto se realizan estudios de modelos regionales Ionosféricos y Troposféricos. (Silva 2009) y (Suárez 2009).
ERRORES DE RECEPCIÓN	Errores del sistema	En este tipo de errores se encuentran: El ruido de la señal, centro de fase de la antena,

		errores del reloj oscilador, el error de ruta múltiple (rebote de la señal).
	Errores por disponibilidad selectiva (S/A).	Es una degradación de la señal del satélite causada en forma intencional por el Departamento de Defensa de los EE.UU.

Elaborado por: Mejía y Moncayo, 2011.

2.10.3 POSICIONAMIENTO GPS DIFERENCIAL

Como principio básico para la corrección diferencial se tiene que hablar de posicionamiento absoluto, que se refiere al caso de un solo receptor operando en modo autónomo, es decir, la función típica de navegación, calculando las coordenadas del receptor sobre la superficie terrestre en base a las mediciones de distancia que realiza a los satélites visibles (en función del número de canales del receptor).

El posicionamiento diferencial consiste en hallar la posición de un punto, mediante las observaciones realizadas desde ese punto a unos determinados satélites, sumadas a las realizadas en ese mismo instante desde otro punto (referencia) a esos mismos satélites.

Los errores en la propagación de la señal (Ionósfera y Tropósfera) afectan de manera similar a dos estaciones no muy alejadas entre sí, que utilizan los mismos satélites debido a que la distancia entre los receptores sobre la superficie terrestre resulta muy pequeña comparada con la distancia a la que están los satélites (ver Figura II.16), inclusive si los receptores se encuentran exageradamente separados (500 km), la porción de atmósfera que atraviesan las señales del mismo satélite es prácticamente la misma. Los errores en cada satélite (reloj, órbita) son comunes para ambas estaciones.

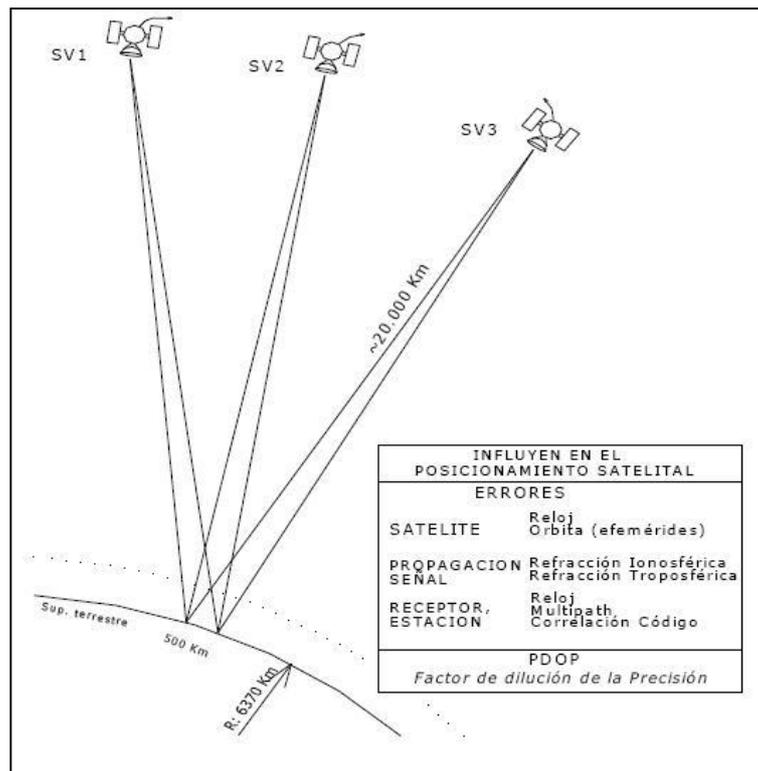


Figura II.16. Dibujados a escala uniforme el radio terrestre, la separación entre estaciones y la distancia a los satélites.

Fuente: Huerta et al., 2005.

Este posicionamiento hace uso de estas características para eliminar la influencia de estos errores en el cálculo de la posición de la segunda estación (remota), considerándolos comunes a una primera estación (base), de la que se conocen sus coordenadas (ver ANEXO 2). De modo que, si para cada posición calculada por la estación base, se asigna un vector error y luego se aplica, cambiado de signo, a la posición calculada en la estación remota, se obtendrá las posiciones corregidas (Huerta et al. 2005).

2.10.4 MÉTODOS DE OPERACIÓN

De acuerdo a Huerta et al. (2005), los métodos posicionamiento son: estático (utilizado en el presente proyecto de grado) y móvil.

2.10.4.1 MÉTODO ESTÁTICO

Según el documento del Department of Transportation (2007), el método estático es una técnica GPS, la cual proporciona mejor precisión que otros métodos, para lo cual se debe contar con un par de receptores GPS diferenciales; uno de estos receptores se coloca sobre un punto cuyas coordenadas son conocidas, o en la actualidad se puede tomar como receptor base a las Estaciones de Monitoreo Continuo y el segundo se coloca sobre otro punto cuyas coordenadas son las que se desea conocer; ambos receptores GPS deben recibir señales de los mismos satélites (por lo menos cuatro), en el mismo intervalo de tiempo, por un periodo que puede variar desde unos pocos minutos hasta varias horas, dependiendo de las condiciones de observación, el territorio y la precisión requerida.

Para esto es necesario seguir las siguientes recomendaciones:

- Vista despejada del cielo de por lo menos 15 grados o más por encima del horizonte durante la "ventana de observación."⁷
- Tiempo de ocupación: Depende de algunos aspectos tales como la longitud de la línea base⁸, número de satélites observados, y el equipo GPS utilizado.
- Según el Comité Nacional de la Unión Geodésica de Argentina (1996), indica que:
 - ✓ Para receptores C/A⁹ con posibilidad de posicionamiento diferencial estos receptores pueden almacenar en memoria los datos observados de manera de facilitar el procesamiento ulterior de los mismos con alguno de los algoritmos de modo diferencial. De esta manera pueden alcanzar precisiones relativas de ± 1 a 5 metros.
 - ✓ Para receptores geodésicos de medición de fase L1: trabajan con la onda portadora L1 de la señal GPS, acumulando información

⁷ Una ventana de observación es el período de tiempo en satélites son observables en el cielo.

⁸ Distancia entra la estación base y el punto de coordenadas a conocer.

⁹ Coarse/Acquisition (C/A), que está disponible gratuitamente para el uso público. Cada satélite tiene su propio código C/A así que puede ser identificado y recibido por separado de otros satélites transmitiendo a la misma frecuencia, posee una longitud de onda de 300 m (Casanova 2002).

que, una vez procesada, permite obtener presiones relativas centimétricas para distancias de hasta 30 km y submétricas para distancias de 50 km.

2.10.4.2 MÉTODO MÓVIL

En este modo, el receptor remoto está en movimiento, calculando y almacenando distancias y/o posiciones en su memoria interna. Luego de terminado el trayecto a medir, se bajan los datos y se efectúa el post-procesamiento aplicando la corrección diferencial y se obtiene una posición instantánea corregida.

2.10.5 POST-PROCESAMIENTO O CORRECCIÓN DIFERENCIAL

Consiste en la utilización de un software desarrollado por el fabricante del equipo GPS, para mejorar la precisión de la ubicación de un punto terrestre, mediante combinar las mediciones del receptor base o de Estaciones de Monitoreo Continuo (ver capítulo 2.10.6), con el receptor móvil. (Huerta et al. 2005).

2.10.6 ESTACIONES DE MONITOREO CONTINUO.

Hacen referencia a la instalación de una Estación Permanente GNSS, esto es, un receptor GNSS sobre un punto de coordenadas conocidas. Esta estación almacena los datos de los satélites GNSS durante las 24 hs. y los pone a disposición de los usuarios en forma de archivos por el lapso que cada usuario estuvo realizando mediciones, de esta manera cada usuario utiliza los archivos del receptor base para aplicar la corrección diferencial a sus archivos tomados con su receptor remoto.

Como ventaja de este sistema se puede enunciar la independencia de la estación base, de su estacionamiento y cuidado. Así también que el usuario necesita un equipamiento mínimo compuesto por un solo receptor, y en el caso de contar con más receptores, todos actúan como remotos, aumentando la eficiencia del equipo de medición.

En este caso, de la utilización del sistema de Estación Permanente, debe tenerse en cuenta que se produce una pérdida de precisión, en función de la distancia que separa al receptor remoto de la estación base, cuando esta pasa a ser mayor de 100 km aproximadamente (Huerta et al. 2005).

2.10.7 RED GNSS DE MONITOREO CONTINUO DEL ECUADOR (REGME)

Según Cisneros (2010), con el apoyo del IGM e instituciones públicas y privadas del País, se estableció a partir del 2008 la REGME, que es un *conjunto de estaciones GNSS de monitoreo continuo*, como se muestra a continuación en la siguiente figura.

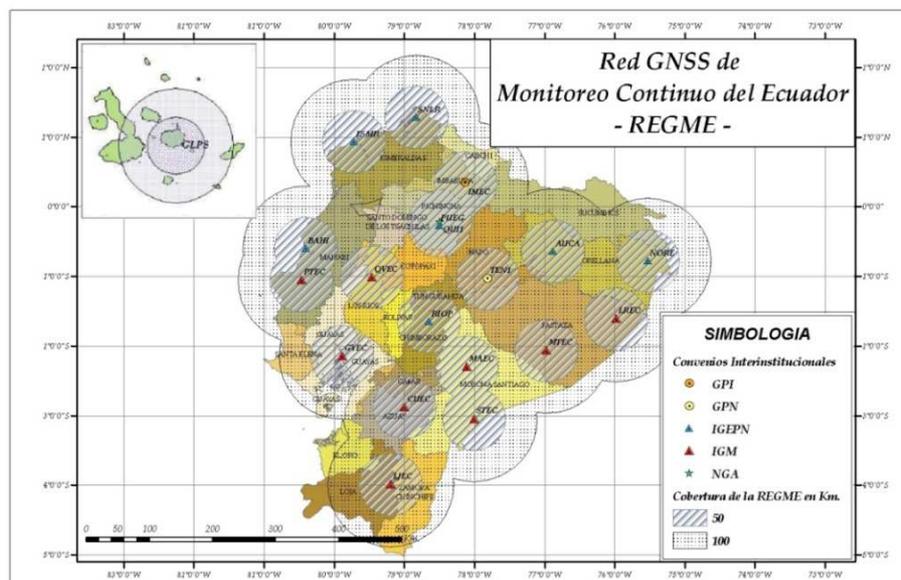


Figura II.17. Red GNSS de monitoreo continuo del Ecuador.

Fuente: http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/articulos-tecnicos/regme-cepge-1/copy_of_red-gnss-de-monitoreo-continuo-del-ecuador-regme-y, 2011.

Actualmente la REGME, está conformada por 18 estaciones de varias instituciones, distribuidas a lo largo del territorio nacional, las cuales captan datos GNSS las 24 hs. del día, los 365 días del año, con datos a 30 y a 1 segundo, proporcionando información necesaria para realizar el procesamiento diferencial en su área de cobertura. La misma entrega archivos en formato RINEX¹⁰ (Receiver Independent Exchange Format) en versión 2.11, disponibles a través del internet o contactándose con personas autorizadas a distribuir esta información.

2.11 ESCALA DE TRABAJO.

La escala representa la relación entre el tamaño de los objetos en el mundo real y su tamaño en un mapa analógico (Fallas 2002). Considerando las imágenes satelitales usadas en el proyecto, en la Tabla II.9, se observan las escalas sugeridas para las imágenes Aster e Ikonos, respectivamente.

Tabla II.9. Escala y Sensores.

Escala de Trabajo	Sensor	Fuente
50.000	Aster	Dirección de Geología Ambiental y Aplicada de Argentina (Pereyra 2007)
25.000	Ikonos	Asociación Cartográfica Internacional (López 1987)

2.12 CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES

Clasificar es la manera en la que se ordena el conocimiento, dentro de este concepto, en la clasificación de imágenes multibanda se pretende extraer

¹⁰ Es un formato de intercambio de datos GPS

de la imagen valores homogéneos llamadas categorías, las cuales forman otra nueva imagen del mismo tamaño y de características similares a la original, en donde se plasma el extracto de la cartografía temática y un inventario por clases del número de píxeles contenidos en él, la cual permite una tabulación de resultados (Chuvieco 2007).

Previamente para clasificar una imagen se debe separar la información no útil (cubierta de nubes y sombras de las mismas) y útil (diferentes coberturas del suelo). (GOFC-GOLD 2008).

2.12.1 ENMASCARAMIENTO DE NUBES.

La cubierta nubosa, supone el principal obstáculo para la obtención de información de una determinada parte de la superficie, cuando se está trabajando con sensores ópticos terrestres.

Una de las formas más frecuentes de discriminar las nubes se apoya en la interpretación visual (Cracknell 1997) ya que el intérprete puede incluir una serie de criterios espectrales y espaciales que son complicados de definir en términos digitales. Ahora bien; este método también presenta una serie de inconvenientes (Simpson y Gobat 1996) se trata de una labor tediosa, ya que hay que visualizar las imágenes para detectar las nubes; no es estadísticamente reproducible para otros lugares geográficos, y requiere de conocimiento y experiencia en fotointerpretación.

El análisis visual puede utilizar otros elementos como el brillo y color, que serían los criterios más elementales, pues caracterizan radiométricamente a una cubierta; la forma, tamaño y textura tienen que ver con las propiedades espaciales de los objetos; la sombra y asociación de la misma con su relación a objetos circundantes en su contexto espacial.

Estos criterios se esquematizan en la siguiente figura.

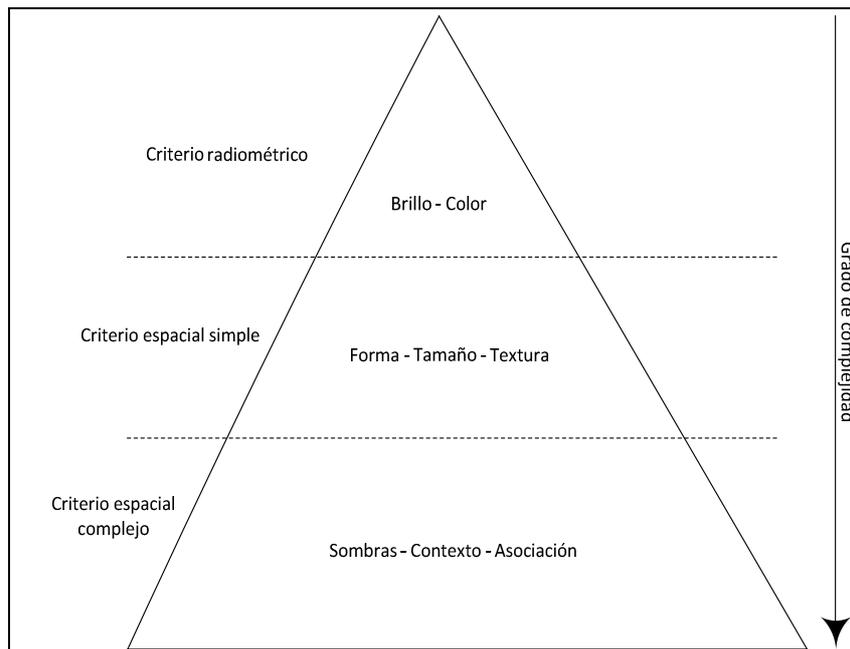


Figura II.18. Organización jerárquica de los criterios de interpretación visual.

Fuente: Chuvieco, 2007.

De acuerdo a Chuvieco (2007) los criterios utilizados en interpretación visual son:

- **El brillo:** Es la intensidad de energía recibida por el sensor para una determinada banda del espectro.
- **El color:** Son las variaciones cromáticas de la intensidad luminosa.
- **La forma:** Permiten reconocer el perfil específico de un objeto.
- **El tamaño:** En complemento con la forma, este criterio ayuda a la identificación de una cubierta.
- **La textura:** Hace referencia a la heterogeneidad espacial de una determinada cubierta. Visualmente se manifiesta como la rugosidad o suavidad de los tonos de gris.
- **Sombra:** Es la sombra producida por la iluminación que recibe un determinado objeto.
- **Contexto espacial y asociación:** Indica la localización de las cubiertas de interés en relación con elementos vecinos de la imagen.

2.13 TEORÍA DE CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES

Para llegar a una cartografía temática del uso del suelo es necesario aplicar los criterios explicados en la siguiente figura. (Ver ANEXO 21)

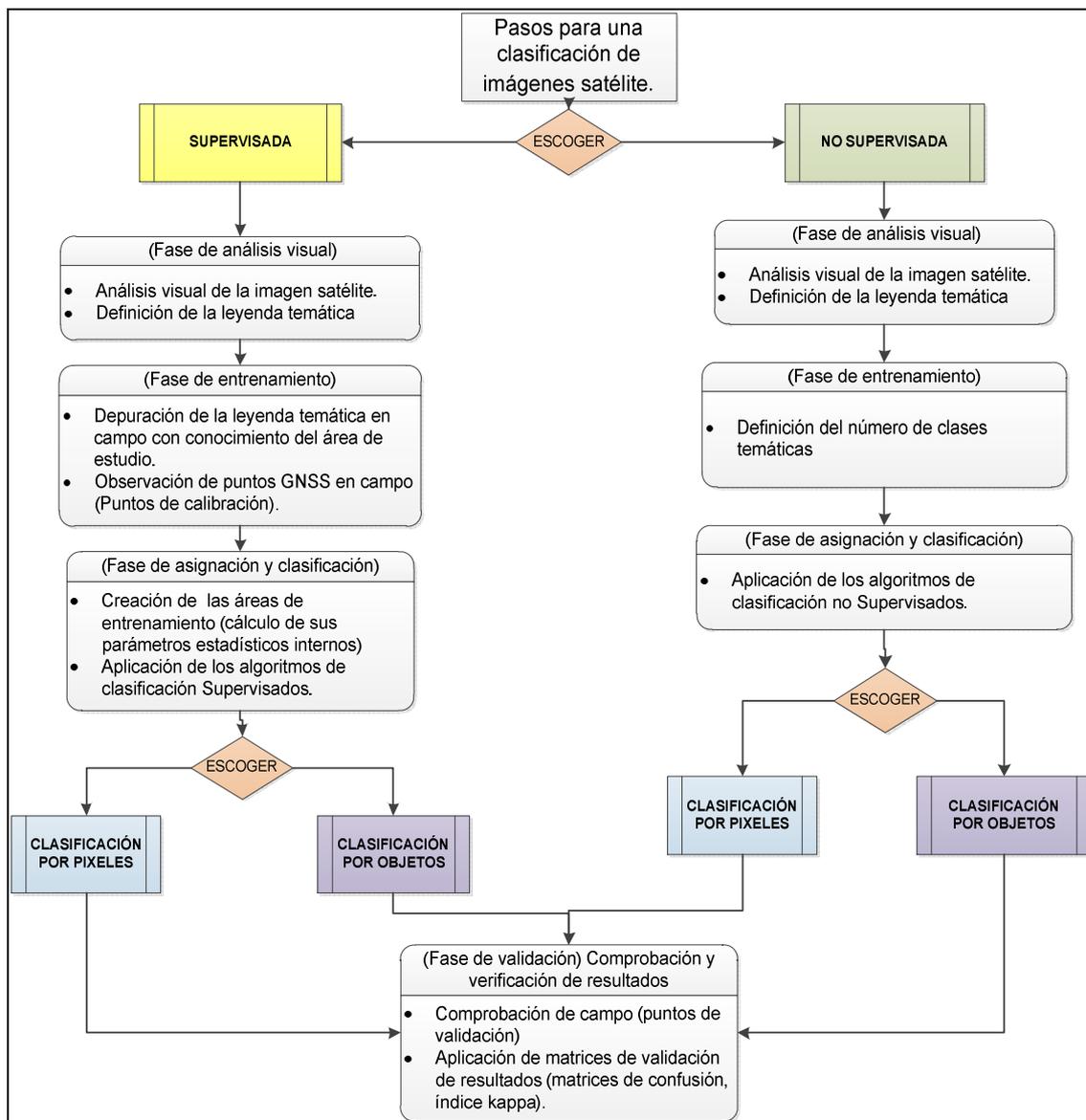


Figura II.19. Pasos de las clasificaciones Supervisada y No supervisada de una imagen satelital.

Fuente: Chuvieco, 2007. Modificada por Mejía y Moncayo, 2011

2.13.1 FASE DE ANÁLISIS VISUAL

Según García (2006), la interpretación visual, está basada en la habilidad que presentan los humanos para relacionar tonos, colores y patrones espaciales que aparecen en una imagen con elementos del mundo real.

En la siguiente figura, se puede ver un fragmento de la imagen Ikonos, donde se discriminan varias clases de uso y cobertura del suelo existentes; lo que ayuda a definir a priori la leyenda temática.

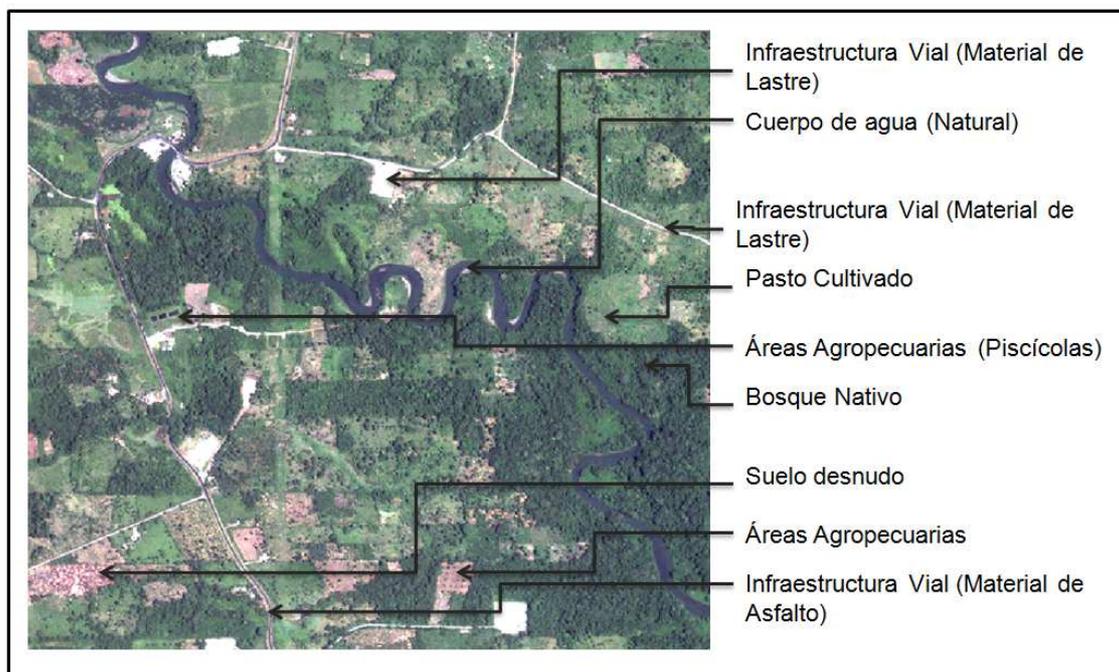


Figura II.20. Ejemplo de análisis visual, fragmento de la imagen Ikonos del área de estudio.

2.13.2 FASE DE ENTRENAMIENTO

2.13.2.1 DEFINICIÓN Y DEPURACIÓN DE LA LEYENDA TEMÁTICA

La leyenda temática permite realizar una clasificación de una manera ordenada y lógica de las clases de uso y cobertura obtenidas de una imagen

satelital (Peralvo 2010). La leyenda debe ser construida de forma jerárquica, con un nivel general que corresponde a las clases definidas, los niveles subsiguientes representan clases de uso y cobertura más detallados, que mantienen coherencia con las definiciones de las clases superiores.

La leyenda ha sido definida por varias instituciones del país como el Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE), el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP), el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), el Sistema de Información Geográfica y Agropecuaria (SIG-AGRO) y el Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos (CLIRSEN); especialistas en diferentes tipos de cobertura y uso del suelo. En la Tabla II.10 se presentan las clases de uso y cobertura del suelo de la leyenda, organizados en tres niveles jerárquicos; en la Tabla II.11, se explica las definiciones del Nivel I; en la Tabla II.12, las definiciones del Nivel II; en la Tabla II.13, las definiciones del Nivel III y en la Tabla II.14 se puede observar el registro fotográfico de cada una de las coberturas de uso del suelo.

Tabla II.10. Leyenda Temática.

Código Nivel I	Nivel I	Código Nivel II	Nivel II	Código Nivel III	Nivel III
1	Bosque	7	Bosque Nativo	21	Bosque Nativo
		8	Plantaciones Forestales ¹¹ (Bosque Plantado)	22	Plantaciones Forestales
2	Áreas Agropecuarias	9	Piscícolas	23	Piscícolas
		10	Cultivos Anuales	24	Maíz
				25	Malanga
				26	Palmito
		11	Cultivos Permanentes	27	Café
				28	Cacao
				29	Frutales
30	Palma Africana				
12	Pasto Cultivado	31	Pasto Cultivado		
13	Mosaico Agropecuario (Asociaciones)	32	Mosaico Agropecuario (Asociaciones)		
3	Vegetación Arbustiva y Herbácea	14	Vegetación Arbustiva	33	Vegetación Arbustiva
		15	Herbazales Inundables	34	Herbazales Inundables
4	Cuerpos de Agua	16	Cuerpos de Agua Natural	35	Cuerpos de Agua Natural

¹¹ En la zona de estudio no se encontró esta cobertura del suelo.

5	Zonas Antrópicas	17	Zonas Pobladas	36	Zonas Pobladas
		18	Suelo Desnudo	37	Suelo Desnudo
		19	Infraestructura	38	Infraestructura Metálica (Material Metálico)
				39	Infraestructura Vial (Material de Lastre)
40	Infraestructura Vial (Material de Asfalto)				
6	Sin Información	20	Sin Información	41	Sin Información

Fuente: Mapa de deforestación histórico del Ecuador Continental del Ministerio del Ambiente del Ecuador, Protocolo III, 2010. Modificado por Mejía y Moncayo, 2011.

Tabla II.11. Definiciones para el Nivel I.

Nivel I	Definición Operativa
Bosque	Ecosistema arbóreo primario, regenerado por sucesión natural, que se caracteriza por la presencia de árboles de diferentes especies nativas. Esta clase puede dividirse por tipo de manejo (bosques manejados y no manejados).
Áreas Agropecuarias	Esta categoría incluye áreas bajo cultivo incluyendo campos de arroz y sistemas agroforestales donde la estructura de la vegetación no cumple con la definición de bosque. Esta clase también incluye áreas de pastos plantados con usos mayormente pecuarios.
Vegetación Arbustiva y Herbácea	Esta categoría incluye áreas de vegetación arbustiva o herbácea que no se consideran como Áreas Agrícolas. Se incluyen áreas de vegetación no manejada y algunos tipos de vegetación resultado de uso extensivo del suelo.
Cuerpos de Agua	Incluye ríos y cuerpos de agua naturales.
Zonas Antrópicas	Pertenecen a esta categoría todas las áreas desarrolladas incluyendo infraestructura de transporte y áreas urbanas de cualquier tamaño que no hayan sido consideradas en otras categorías. Estas áreas deberán ser consistentes con las definiciones nacionales.
Sin Información	Corresponde a áreas cubiertas por nubes y sus sombras asociadas que no han podido ser mapeadas utilizando las fuentes de datos de sensores remotos disponibles.

Fuente: Mapa de deforestación histórico del Ecuador Continental del Ministerio del Ambiente del Ecuador, Protocolo III, 2010.

Tabla II.12. Definiciones para el Nivel II.

Nivel I	Nivel II	Definición Operativa	Fuente
Bosque	Bosque Nativo	Ecosistema arbóreo primario, regenerado por sucesión natural, que se caracteriza por la presencia de árboles de diferentes especies nativas, edades y portes variados, con uno o más estratos. Cumple con los siguientes criterios de estructura: 1) altura de dosel ¹² arbóreo o regiones superiores de los árboles \geq 5 metros. 2) Cobertura de dosel \geq 30%. 3) Área mínima de 1 hectárea	Acuerdo Ministerial 41 del MAE, registro oficial 401 del 18 de agosto de 2004
	Plantaciones Forestales	Es la masa arbórea establecida antrópicamente con una o más especies forestales, diferentes de las palmas	
Áreas Agropecuarias	Piscícolas	Piscina de agua de poca profundidad, construida por el hombre, para dedicarla a la producción acuícola	MAGAP - IICA-CLIRSEN (2002)
	Cultivos Anuales	Son aquellas tierras cuyo uso está dedicado principalmente a la explotación de cultivos cuyo ciclo vegetativo es estacional, pudiendo ser cumplido una o más veces al año	SIG-AGRO (2010)
	Cultivos Semipermanentes	Comprende aquellas tierras dedicadas a la explotación de cultivos agrícolas de mayor a un año, destinados en su gran mayoría, a la exportación y la agroindustria, como el caso del banano, plátano, abacá y caña de azúcar y que permanecen en el terreno por un período variable entre 2 a 10 años.	
	Cultivos Permanentes	Son aquellos cultivos agrícolas de una duración de más de 10 años, destinados principalmente a la exportación y la agroindustria, como el café, cacao, palma africana, frutales de costa y sierra, macadamia, entre otros.	
	Pasto Cultivado	Vegetación herbácea dominadas por especies de gramíneas introducidas, utilizadas con fines pecuarios, que para su establecimiento y conservación, requieren de labores de cultivo y manejo conducidos por el hombre.	
Mosaico Agropecuario (Asociaciones)	Área de uso agropecuario mixto que ocurre principalmente en la Amazonía y la Costa. Incluye áreas de deforestación temprana, vegetación herbácea (<10% de cobertura de dosel), sucesión temprana (10-30% de cobertura de dosel) y cultivos perennes y de ciclo corto. Ejemplo: Finca con	MAE - LBD ¹³	

¹² Dosel arbóreo. Parte superior del estrato arbóreo de un bosque formada por las copas de los árboles. (Ramírez 1995).

¹³ Línea Base de Deforestación del Ecuador Continental.

		varios cultivos de autoconsumo.	
Vegetación Arbustiva y Herbácea	Vegetación Arbustiva	Áreas con un componente substancial de especies leñosas nativas cuya estructura no cumple con la definición de bosque. Incluye áreas degradadas en transición a una cobertura densa del dosel (>30%).	MAE - LBD
	Herbazales Inundables	Vegetación herbácea cuyo substrato permanece inundada por todo o parte del año. Incluye herbazales inundables de tierras bajas y turberas altoandinas	MAE - LBD
Cuerpos de agua	Natural	Superficie y volumen asociado de agua estática o en movimiento. Incluye solo cuerpos de agua naturales	MAE - LBD
Zonas Antrópicas	Zonas Pobladas	Paisaje urbano, asentamiento de casas agrupadas en un determinado lugar geográfico. (>80%).	MAE - LBD
	Suelo Desnudo	Áreas sin cobertura vegetal, también puede ser terrenos arados o erosionados.	
	Infraestructura Vial	Vías e infraestructura de transporte y comunicación, agroindustrial y social.	MAE - LBD

Fuente: Mapa de deforestación histórico del Ecuador Continental del Ministerio del Ambiente del Ecuador, Protocolo III, 2010.

Tabla II.13. Definiciones para el Nivel III.

Nivel III	Definición Operativa	Fuente
Maíz	Es una gramínea anual caracterizada por tener tallos en forma de caña, con una mazorca donde se encuentra las semillas (granos de maíz).	http://www.botanical-online.com
Malanga	Es considerada una de las especies de raíces y tubérculos con gran potencial en las zonas tropicales.	Monografía de la malanga
Palmito	Producto alimentario obtenido del cogollo de varias especies de palmera	http://www.botanical-online.com
Café	Cobertura predominantemente compuesta por áreas dedicadas al cultivo de café. Son arbustos de las regiones tropicales	Definiciones Corin Land Cover
Cacao	Cobertura con el predominio del cultivo de cacao. Planta perenne arbustiva de tallo leñoso, que alcanza alturas de hasta 4.5 metros, capaz de producir varias cosechas al año.	Definiciones Corin Land Cover
Frutales	En esta unidad se incluyen plantas productoras de frutas.	Definiciones Corin Land Cover
Palma Africana	Planta perenne de tronco solitario y hojas pinnadas pertenecientes a la familia Palmae, que puede alcanzar alturas de hasta 12 metros. Su cultivo se desarrolla preferencialmente en terrenos planos a ligeramente ondulados, en tierras situadas por debajo de los 500 msnm, bajo climas cálidos.	Definiciones Corin Land Cover
Infraestructura Metálica (Material Metálico)	Son aquellos que están compuestos básicamente por metales y sus aleaciones. Por ejemplo: techos de zinc, coliseos, tanques, etc.	http://www.arqhys.com/construccion/metalicos-materiales.html
Infraestructura Vial (Material de Lastre)	Piedra de mala calidad y resquebrajada que se halla en la superficie de una cantera, se utiliza en la construcción de vías.	http://www.definition-of.net/definicion-de-lastre
Infraestructura	Es un material derivado del petróleo de color negro; es	http://catarina.udlap.mx/

Vial (Material de Asfalto)	sólido y semisólido y tiene propiedades cementantes a temperaturas ambientales normales.	u_dl_a/tales/documentos/lic/maxil_c_r/capitulo1.pdf
----------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------

Elaborado por: Mejía y Moncayo, 2011.

Tabla II.14. Respaldo fotográfico de las diferentes clases de uso y cobertura.

Nivel I	Nivel II	Nivel III	Fotografías
Bosque	Bosque Nativo	Bosque Nativo	
	Plantación Forestal	Plantación Forestal	No hay foto
Áreas Agropecuarias	Piscícolas	Piscícolas	
		Maíz	
	Cultivos Anuales	Malanga	
		Palmito	
	Cultivos Permanentes	Café	

		Cacao	
		Frutales	
		Palma Africana	
	Pasto Cultivado	Pasto Cultivado	
	Mosaico Agropecuario (Asociaciones)	Mosaico Agropecuario (Asociaciones)	
Vegetación Arbustiva y Herbácea	Vegetación Arbustiva	Vegetación Arbustiva	
	Herbazales Inundables	Herbazales Inundables	

Cuerpos de Agua	Cuerpos de Agua Natural	Cuerpos de Agua (Natural)		
Zonas Antrópicas	Zonas Pobladas	Zonas Pobladas		
	Suelo Desnudo	Suelo Desnudo		
	Infraestructura	Infraestructura Metálica (Material Metálico)		
		Infraestructura Vial (Material de Lastre)		
		Infraestructura Vial (Material de Asfalto)		
	Sin Información	Sin Información	Sin Información	
<p>Nivel I: Identificador de las clases de uso y cobertura del suelo del Nivel I de la leyenda temática.</p> <p>Nivel II: Identificador de las clases de uso y cobertura del suelo del Nivel II de la leyenda temática.</p> <p>Nivel II: Identificador de las clases de uso y cobertura del suelo del Nivel III de la leyenda temática.</p> <p>Fotografías: Fotografías tomadas en campo de las diferentes clases de uso y cobertura de suelo.</p>				

Elaborado por: Mejía y Moncayo, 2011.

2.13.2.2 PUNTOS DE CALIBRACIÓN

Después del análisis visual, existen coberturas que no se logran definir adecuadamente; para solucionar este problema es necesario familiarizarse en campo con el área de estudio; pero previamente a esto, en gabinete se ubican puntos de calibración sobre la imagen para ser colectados en campo mediante GPS, siguiendo los siguientes criterios:

- **Accesibilidad:** Se debe ubicar en lugares que se pueda llegar aprovechando la cobertura vial y fluvial.
- **Distribución:** Se debe cubrir todas las clases definidas en la leyenda temática. Sin embargo, debe existir suficiente flexibilidad para caracterizar las clases que pudieran haber sido omitidas en la leyenda.
- **Representabilidad:** Se debe ubicar áreas que sean superiores al Unidad Mínima de Mapeo (UMM, ver 2.13.5.1.2), establecidas en el proyecto, que garanticen la heterogeneidad interna de cada clase de uso y cobertura (Peralvo 2010).

2.13.3 FASE DE ASIGNACIÓN Y CLASIFICACIÓN

Estos procesos van orientados a realizar las clasificaciones tanto Supervisada, como No supervisada.

2.13.3.1 MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES

Existen dos métodos de clasificación de imágenes, la clasificación supervisada y la no supervisada. La metodología de clasificación¹⁴, se resume en la siguiente figura:

¹⁴ Se pueden escoger varios algoritmos de clasificación en diferentes programas; por citar algunos, en clasificación por píxeles en el método no supervisado se puede escoger Isodata o K-medias; en el método supervisado, se puede escoger Mínima distancia, Paralelepípedo o Máxima Probabilidad. Por otra parte en el método orientado por objetos, en el no supervisado se puede escoger Isoseg o Arq. SRN y en la clasificación supervisada se puede escoger Bhattacharya o Clatex.

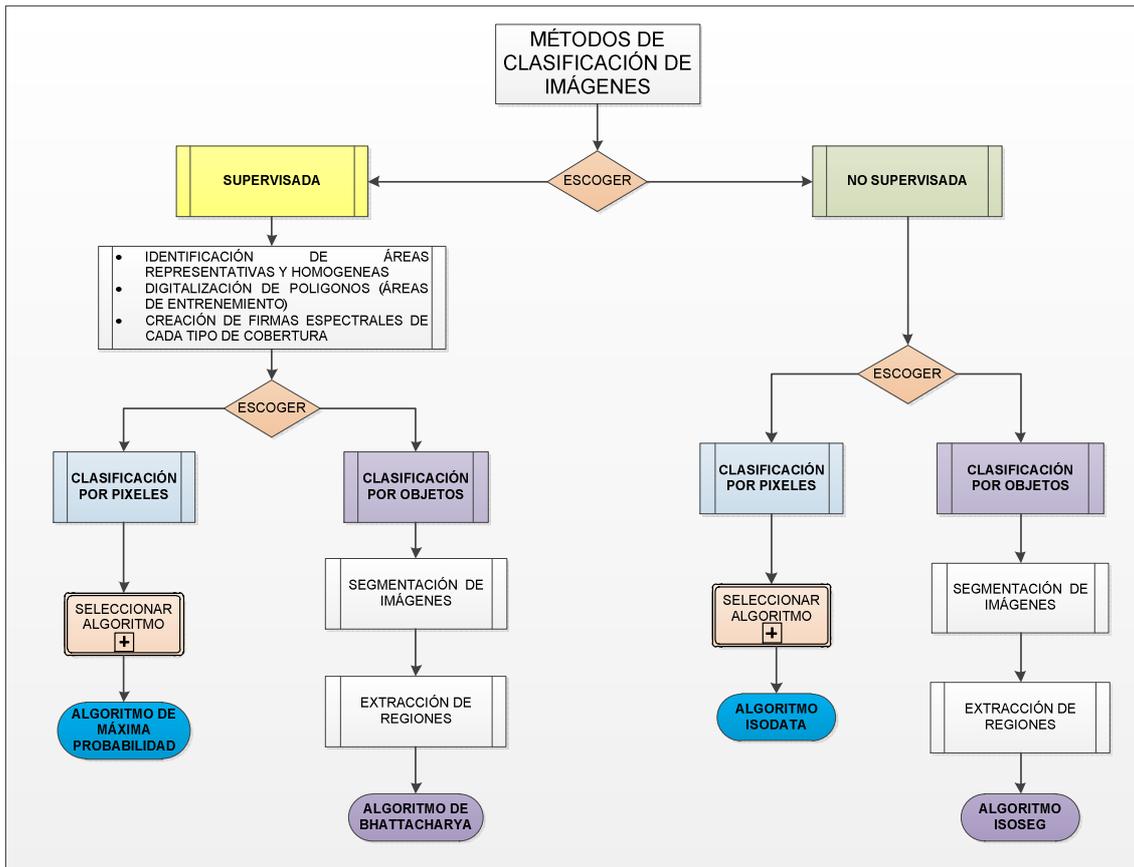


Figura II.21. Esquema de la metodología de clasificación de imágenes.

Fuente: Elaborado por Mejía y Moncayo, 2011.

2.13.3.2 CLASIFICACIÓN SUPERVISADA

En las clasificaciones supervisadas, el interprete está en constante interacción con el sistema de análisis de imágenes digitales; ya que maneja, manipula, gestiona y decide sobre la información de la escena, que sirve de entrenamiento para el sistema; esta información es conocida por el nombre de muestras de entrenamiento y deben ser representativas de las clases que deberán ser mapeadas (Novo 1992).

Según Lillesand et al. (2004), la clasificación supervisada se resume en tres pasos básicos:

1. **Fase de entrenamiento:** Consiste en proporcionar al sistema un conjunto de píxeles representativos de cada clase de uso del suelo, en la imagen a ser clasificada.
2. **Fase de clasificación:** Los píxeles seleccionados en esa fase, son categorizados dentro de una clase de uso del suelo, de acuerdo con parámetros estadísticos.
3. **Fase de presentación de los datos:** En esta fase se cuantifica y resume la forma como serán presentados los resultados de la clasificación.

2.13.3.3 CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA

En el caso de las clasificaciones no supervisadas, el interprete tiene poco control sobre la separación entre las clases, pues no tiene conocimiento previo de la escena de la imagen y después de esto él no precisa preocuparse con la homogeneidad de las muestras (Novo 1992).

La clasificación no supervisada, es aquella que no utiliza datos de entrenamiento como base para la clasificación, haciendo que los algoritmos examinen los píxeles desconocidos en la imagen, asociándolos para determinadas clases, basándose en los agrupamientos naturales presentes en los valores numéricos de la imagen. La premisa básica es que valores dentro de un determinado tipo de cobertura deben estar próximos en un mismo espacio de medida, considerando que datos en diferentes clases deben estar comparativamente bien separados (Lillesand et al. 2004).

2.13.4 MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN BASADOS EN PÍXELES

En la clasificación *píxel a píxel*, el algoritmo clasificador procura asociar un determinado píxel de la imagen a una de las clases contenidas en el paquete de entrenamiento, en ese sentido, se considera al píxel como una entidad aislada e independiente de los píxeles que componen el resto de la escena (Moreira 2005).

Se abordaran los siguientes algoritmos:

- Máxima Probabilidad, algoritmo de clasificación supervisada basada en píxeles.
- Isodata, algoritmo de clasificación no supervisada basada en píxeles.

2.13.4.1 ALGORITMO DE MÁXIMA PROBABILIDAD

Según Chuvieco (2007), en el interior de cada clase de uso y cobertura del suelo los niveles digitales (ND) se ajustan a una distribución normal, esto permite describir esa clase por una función de probabilidad, a partir de su vector de medias y matriz de varianza-covarianza. El cálculo se realiza para todos los píxeles que intervienen en la clasificación, asignando un píxel a aquella categoría que maximice la función de probabilidad.

Este algoritmo, es el más complejo y el que demanda mayor volumen de cálculo; sin embargo, es el más empleado en teledetección, por su robustez y por ajustarse con más rigor a la disposición original de los datos.

Para comprender mejor su funcionamiento basta poner un sencillo ejemplo ideado por Swain y Davis (1978). Supóngase que se cuenta con un par de dados normales A y B (caras numeradas de 1 a 6) y otro par aumentado A' y B' (numerados de 3 a 8).

A = 1, 2, 3, 4, 5, 6. y B = 1, 2, 3, 4, 5, 6. (Datos normales).
 A' = 3, 4, 5, 6, 7, 8 y B' = 3, 4, 5, 6, 7, 8. (Datos modificados).

En la Tabla II.15, se observan las posibles combinaciones de la suma de los dados normales y aumentados.

Tabla II.15. Posibles combinaciones en los dados normales y aumentados.

Datos Normales				Datos Aumentados			
A	B	Suma	Probabilidad	A'	B'	Suma	Probabilidad
1	1	2	1/36	3	3	6	1/36
1	2	3	2/36	3	4	7	2/36

2	1			4	3		
3	1	4	3/36	3	5	8	3/36
1	3			5	3		
2	2			4	4		
1	4	5	4/36	3	6	9	4/36
4	1			6	3		
2	3			4	5		
3	2			5	4		
1	5	6	5/36	3	7	10	5/36
5	1			7	3		
2	4			4	6		
4	2			6	4		
3	3			5	5		
1	6	7	6/36	3	8	11	6/36
6	1			8	3		
2	5			4	7		
5	2			7	4		
3	4			5	6		
4	3			6	5		
2	6	8	5/36	4	8	12	5/36
6	2			8	4		
3	5			5	7		
5	3			7	5		
4	4			6	6		
3	6	9	4/36	5	8	13	4/36
6	3			8	5		
4	5			6	7		
5	4			7	6		
4	6	10	3/36	6	8	14	3/36
6	4			8	6		
5	5			7	7		
5	6	11	2/36	7	8	15	2/36
6	5			8	7		
6	6	12	1/36	8	8	16	1/36
A y B = Dados Normales A' y B' = Dados Aumentados Suma = Valor resultante de la combinación de los dos dados.							

Elaborado por: Mejía y Moncayo, 2012.

Conociendo el valor de una tirada, el problema sería estimar de cuál de los dos pares de dados procede. Un criterio razonable de asignación sería calcular la probabilidad de que esa tirada se haya realizado con los dados normales o con los aumentados, asignando la tirada desconocida al par de dados más probable. Por ejemplo, si se obtiene una tirada de 7, la probabilidad de haber tirado con los dados normales es 6/36 (6 casos favorables, frente a los 36

posibles); para los dados aumentados la probabilidad es menor, $2/36$, por lo que la tirada se asigna al par de dados normal. En la siguiente figura se puede observar gráficamente la probabilidad de ocurrencia de los dados normales y aumentados.

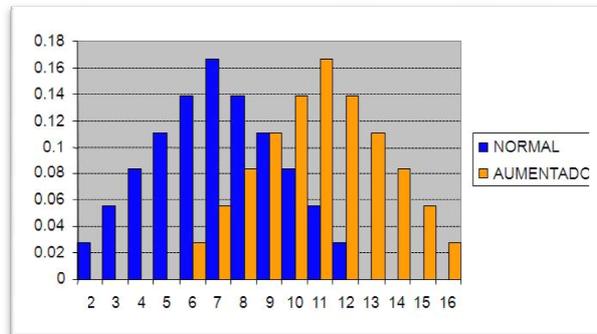


Figura II.22. Fundamento del algoritmo de máxima probabilidad con los dados normales y aumentados.

Fuente: Chuvieco, 2007

Si existe conflicto natural entre clases, no es posible separarlas con total fiabilidad. Los errores serán tanto mayor cuanto mayor sea el solape entre las funciones de probabilidad.

Extendiendo el ejemplo propuesto por Swain y Davis (1978), supóngase que al par de dados normal se modifica alguna cara, para que las puntuaciones vayan de 2 a 5, en lugar de 1 a 6, se repite las puntuaciones de 3 y 4; esto no implicaría modificar el valor central de la distribución, que seguiría siendo 7, sin embargo, sí cambia la anchura de la curva, las puntuaciones están más cercanas a la media por lo que hay mayor homogeneidad o si se prefiere menor varianza y la discriminación de categorías resulta más certera. Eso conlleva que las asignaciones que se hagan a partir de la distribución de probabilidad serán más seguras. En la siguiente figura, se puede observar gráficamente las combinaciones de los dados normales modificados y los dados aumentados.

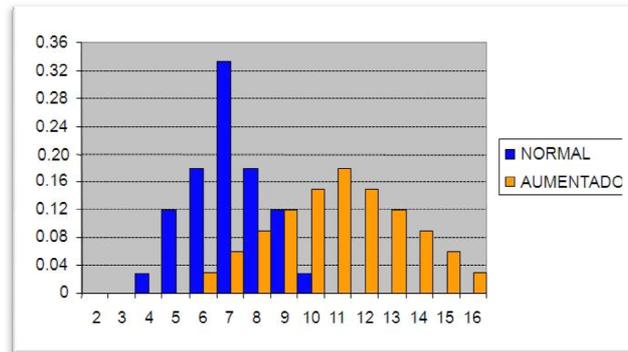


Figura II.23. Fundamento del algoritmo de máxima probabilidad con los datos normales modificados y aumentados.

Fuente: Chuvieco, 2007

El ejemplo puede aplicarse fácilmente al contexto de la clasificación digital. El par de datos a estimar puede sustituirse por las distintas clases de uso y cobertura que se quieren discriminar, y las combinaciones de los datos, por los ND de los píxeles a clasificar. En la clasificación de categorías temáticas es preciso estimar la distribución de probabilidad para cada categoría, a partir de las medidas realizadas sobre las áreas de entrenamiento.

Con este fin se considera que los ND en el interior de cada clase, se distribuyen normalmente, por lo que basta conocer la media y la desviación estándar de cada categoría, para calcular la probabilidad asociada con un determinado ND.

En el caso de trabajar con una sola banda se podría calcular la probabilidad de acuerdo a la ecuación II.16:

[Ec. II.16]

$$p(x/A) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_A^2}} \exp -\{(ND_x - \overline{ND_A})^2 / 2\sigma_A^2\}$$

Dónde:

$p(x/A)$ = Probabilidad de que un píxel x pertenezca a la clase A .

ND_x , = Número digital de un píxel x .

(\overline{ND}_A) = Media dentro de la clase A.

(σ_A^2) = Varianza de la clase A.

Una vez determinada la probabilidad de pertenencia al resto de las categorías que intervienen en la clasificación, ese píxel será asignado a la clase A, sólo si:

[Ec. II.17]

$$p(x/A) \geq p(x/B)$$

Para todo $A \neq B$, variando B desde 1 hasta c, siendo c el número de categorías.

En la Figura II.24, se puede observar la mayor probabilidad de pertenencia de un píxel x, a la clase A que a la clase B.

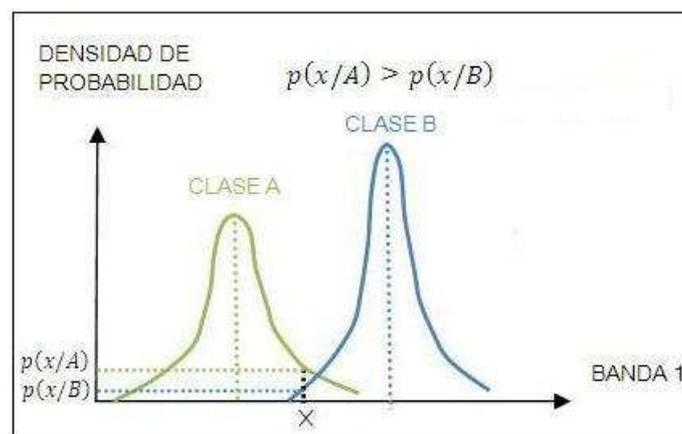


Figura II.24. Probabilidad de pertenencia de un píxel x, en dos clases.

Elaborado por: Mejía y Moncayo, 2012.

Con el propósito de agilizar el cálculo, habitualmente se transforma la fórmula anterior en una función lineal, mediante el empleo de logaritmos (Schowengerdt 1983):

[Ec. II.18]

$$\ln p(x/A) = -0.5 \ln(2\pi) - 0.5 \ln \sigma_A^2 - \{(ND_x - \overline{ND}_A)^2 / 2\sigma_A^2\}$$

Hasta el momento se ha analizado el criterio de máxima probabilidad para el caso de una sola banda. Lo habitual será, no obstante, que se empleen varias

bandas para la clasificación, por lo que resulta preciso extender a varias dimensiones lo hasta aquí comentado. Para el caso de dos bandas, los límites de las categorías tienen una forma elipsoidal (ver Figura II.25).

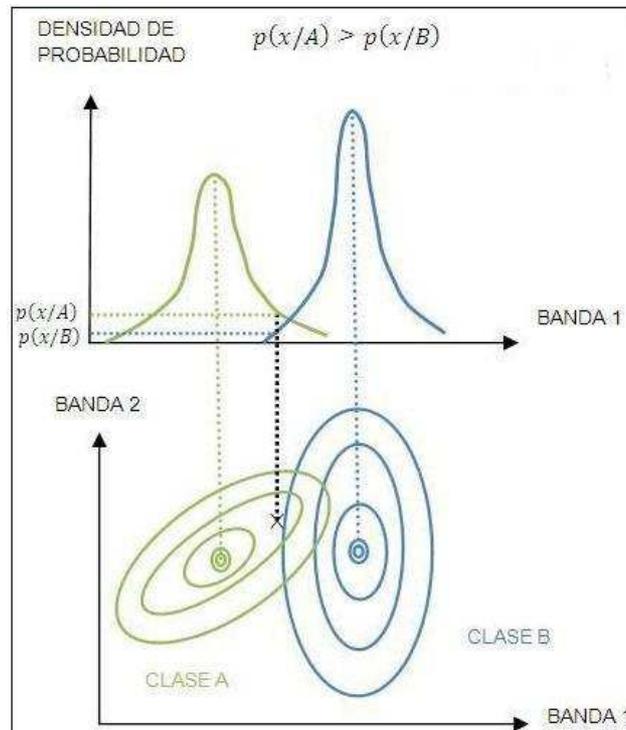


Figura II.25. Ejemplo de extensión a dos bandas del algoritmo de máxima probabilidad.

Elaborado por: Mejía y Moncayo, 2012.

Cada una de estas elipses define un determinado nivel de probabilidad asociado a una categoría; cuanto mayores sean las zonas de solape entre ellas, tanto mayor el riesgo de confusión mutua.

Con más de dos dimensiones no es posible representar gráficamente este criterio de clasificación. Basta extender la fórmula de la probabilidad normal arriba apuntada.

[Ec. II.19]

$$p(x/A) = (2\pi)^{-\frac{m}{2}} |V_A|^{-0.5} \exp\{-0.5(M_x - M_A)^T V_A^{-1} (M_x - M_A)\}$$

Donde:

m : Número de bandas.

V_A : Matriz de varianza – covarianza para la clase A.

$|V_A|$: Determinante de la matriz de varianza – covarianza para la clase A.

M_x : Vector de ND asociado con el píxel x.

M_A : Vector de ND medios de la categoría A.

T : Transpuesta de la matriz.

-1: Inversa de la matriz.

Esta fórmula también puede simplificarse mediante el uso de logaritmos (Schowengerdt 1983):

[Ec. II.20]

$$\ln p(x/A) = (-0.5 \ln V_A) - (0.5 (M_x - M_A)^T V_A^{-1} (M_x - M_A))$$

Una vez suprimidos los términos constantes de la fórmula anterior. Pese a estas simplificaciones, este método de asignación exige un gran volumen de operaciones, pero gracias a la mayor potencia de cálculo que facilitan los ordenadores ahora disponibles, este tipo de clasificación ya no implica una inversión de tiempo considerable.

Una vez que se culmine la asignación de los píxeles de la imagen es posible establecer unos umbrales de probabilidad para cada categoría, de tal forma que se rechacen aquellos píxeles con una probabilidad de pertenencia muy baja (ver Figura II.26).

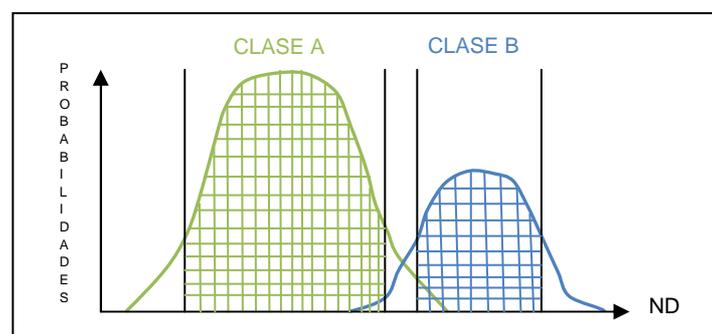


Figura II.26. Umbrales de probabilidad para cada categoría.

Fuente: Chuvieco, 2007. Modificado por Mejía y Moncayo, 2011.

Este proceso, posterior a la clasificación propiamente dicha, pretende evitar aquellos píxeles con un grado de asociación muy bajo, reduciendo así los errores de comisión¹⁵, debidos a una mala definición espectral de algunas categorías.

Esto llevará consigo la aparición de píxeles no clasificados. Si su número es considerable, convendrá retornar a la fase de entrenamiento, con objeto de clasificar nuevas categorías o perfeccionar la definición de las ya existentes.

2.13.4.2 DEFINICIÓN MATEMÁTICA DE DISTANCIA

Según Rivero (2010), la distancia es la cercanía o proximidad entre dos objetos, definida como:

Sea M un conjunto cualquiera de puntos. Una métrica sobre M es una función en el conjunto R de los números reales.

$$d: M \times M \rightarrow R.$$

Que asocia a cada par de elementos (x, y) , con x e y en M , un número real $d(x, y)$, llamado la distancia desde x hasta y , el cual satisface las siguientes propiedades:

- $d(x, y) \geq 0$, para x e y en M . La distancia es siempre un número real mayor o igual a cero. Cuando los puntos x e y en M son distintos, entonces la distancia será un número estrictamente positivo.
- $d(x, y) = 0$, sí y sólo si $x = y$. Si los puntos son iguales, la distancia entre los mismos es cero.
- $d(x, y) = d(y, x)$, para todo par de elementos x e y en M . La distancia no depende del sentido con que se mida, es decir la distancia desde x hasta y es igual a la distancia desde y hasta x .
- $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$, para x, y, z ; elementos en M . Esta última propiedad es conocida como la desigualdad triangular y establece que si

¹⁵ Delimitación excesivamente amplia de la categoría

los tres puntos x , y , z ; forman los vértices de un triángulo, entonces la suma de dos lados es siempre mayor o igual que el tercer lado, como se observa en el gráfico a continuación.

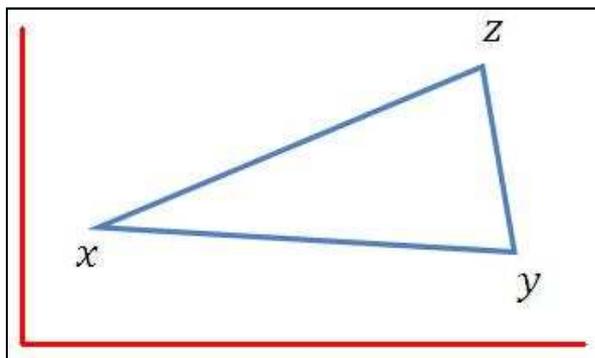


Figura II.27. Desigualdad triangular.

Fuente: Elaborado por Mejía y Moncayo, 2012.

2.13.4.3 EL ALGORITMO ISODATA

Según Ardizzone (1998), ISODATA son las iniciales de las palabras: Iterative Self – Organizing Data Analysis Technique (Técnica Iterativa Auto organizada de Análisis de Datos). Esta técnica es iterativa porque, como se verá consiste en la repetición de un mismo proceso varias veces y auto organizada, porque requiere la mínima intervención por parte del usuario en la formación de agrupaciones o conglomerados (grupos de píxeles que poseen comportamientos espectrales semejantes y por tanto deberían definir clases temáticas de interés). A continuación se describe la técnica en su esencia:

Se define una medida de distancia entre dos píxeles X e Y en el espacio espectral. Aunque pueden emplearse varios tipos de distancia, generalmente se utiliza la distancia euclidiana. Definida en la siguiente ecuación.

[Ec. II.21]

$$d(X, Y) = \sqrt{(X_1 - Y_1)^2 + (X_2 - Y_2)^2 + \dots + (X_N - Y_N)^2}$$

Habiéndose elegido un determinado número de clases (c) en dicho espacio:

1. Se selecciona c puntos en el espacio espectral.

$$m_i \quad (i=1,2,3,\dots,c)$$

Los cuales sirven como candidatos a centros de cada clase (puntos de arranque)

2. Se localiza el píxel X que desee clasificarse y se asigna al centro más próximo.
3. Como resultado de la agrupación producida en el paso 2, surgen nuevos centros de clases m'_i ($i = 1, 2, 3, \dots, c$).
4. Si $m_i = m'_i$ para todo i , se termina el proceso. De otra manera, se regresa al paso 2 usando como centro de las clases de los vectores m_i .

El proceso continúa hasta que se alcance un número máximo de iteraciones o hasta que se cumpla una condición adicional que varía según el programa utilizado. En ocasiones, la condición exige que la suma de los cuadrados de las desviaciones a la media de cada agrupamiento (SSE), sea menor que un valor dado, (ver la Ec.II.22.).

[Ec. II.22]

$$SSE = \sum_{C_i} \sum_{X \in C_i} d^2(X, m_i)$$

Otra forma de establecer la condición adicional, consiste en fijar el porcentaje máximo de píxeles cuya asignación no ha cambiado desde la iteración anterior. Si se superara este valor antes de alcanzarse el número máximo de iteraciones, el proceso finaliza.

Durante la ejecución del mismo, pueden desaparecer clases que posean muy pocos píxeles o unirse otras cuyos centros estén muy próximos.

En la Figura II.28, se puede observar el algoritmo explicado gráficamente.

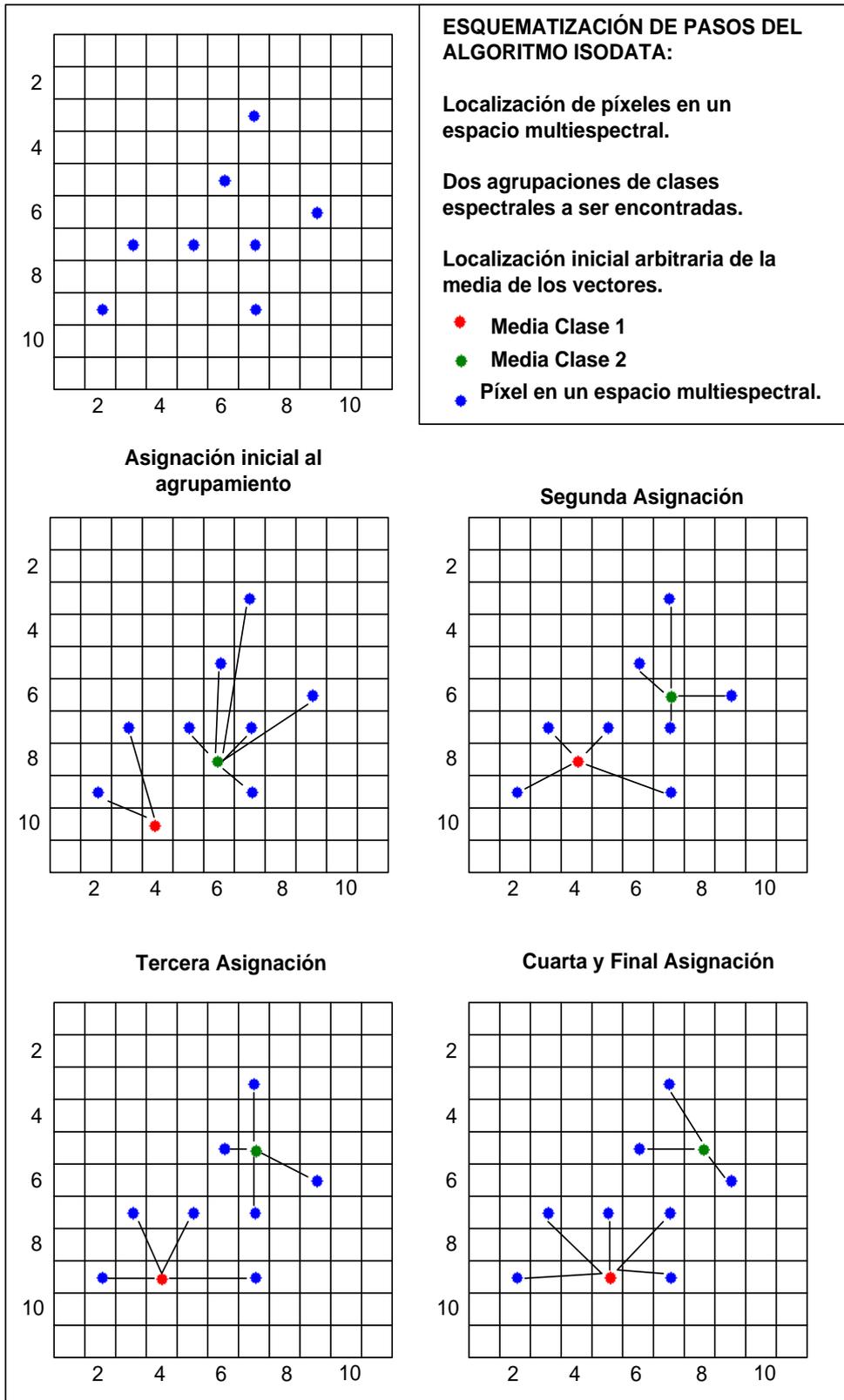


Figura II.28. Ilustración del método isodata.

Fuente: Ardizzone, 1998. Modificado por Mejía y Moncayo, 2011.

2.13.5 MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN BASADOS EN OBJETOS

Los métodos de clasificación, basados en objetos utilizan como criterio de decisión el nivel digital de cada píxel y su relación espacial con sus píxeles vecinos dentro de la imagen; estos clasificadores procuran simular el comportamiento de un fotointérprete, para reconocer áreas homogéneas en la imagen (Moreira 2005); esta clasificación es dividida en las siguientes fases:

- La segmentación de imágenes y extracción de regiones.
- Aplicación de algoritmos: Dentro de esto se abordaran los siguientes: Bhattacharya, algoritmo de clasificación supervisada orientado a objetos e Isoleg, algoritmo de clasificación no supervisada orientado a objetos.

2.13.5.1 SEGMENTACIÓN DE IMÁGENES

De acuerdo a Rezende (1997), Gonzalez y Wintz (1987), indican que la segmentación es un proceso que permite subdividir una imagen en diversas partes o regiones significativas.

Woodcock y Harward (1992), afirman que en sensores remotos, el objetivo de la segmentación es delimitar las regiones en la imagen que corresponden a diversos objetos de la superficie terrestre.

De acuerdo Borsotti et al. (1998) y Xu et al. (1998), afirman que el proceso de segmentación consiste en la subdivisión de una imagen en regiones homogéneas, considerando alguna de sus características intrínsecas, por ejemplo el ND de los píxeles, la textura.

En este contexto, diferentes técnicas de segmentación de imágenes han sido propuestas, tales como: detección de bordes, umbralización, crecimiento de regiones¹⁶, separación y fusión de regiones (Moik 1980, Halarick y Shapiro 1985).

¹⁶ Es la técnica de segmentación utilizada en el presente proyecto.

Zucker (1976), describe al método de segmentación como la división de una imagen X en regiones homogéneas X_1, X_2, \dots, X_N , donde se mide la homogeneidad de una región siguiendo las siguientes condiciones:

1. Las regiones X_1, X_2, \dots, X_N deben ser compuestas por una secuencia de puntos contiguos;
2. La segmentación debe ser completa;
3. Todas las regiones deben ser distintas y separadas;
4. El atributo de similaridad debe ser satisfecho para cada región.
5. Las regiones X_i y X_j son adyacentes, o sea, regiones vecinas poseen atributos diferentes.

Las condiciones descritas por Zucker (1976), deben ser satisfechas por todos los algoritmos de segmentación y son válidas para una infinidad de diferentes algoritmos.

Ballar y Brown (1992), indican que a medida que cada objeto es adquirido, estos son rotulados y sus atributos son extraídos; algunos de estos atributos son: media, varianza, área, perímetro, excentricidad y linealidad media de los bordes.

En la Figura II.29 se observa un ejemplo de segmentación de imágenes, en el lado izquierdo aparece la imagen original y en el lado derecho la imagen segmentada con sus diferentes regiones rotuladas.

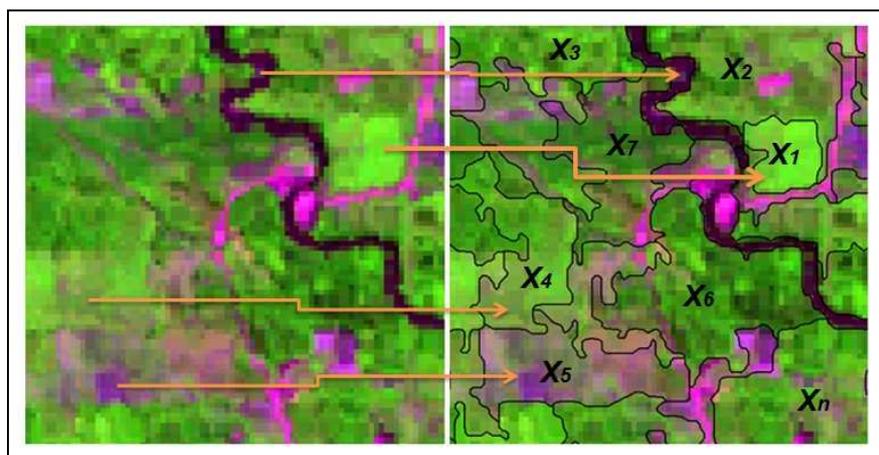


Figura II.29. Ejemplo de Segmentación de imágenes en regiones

Elaborado por: Mejía y Moncayo, 2011.

2.13.5.1.1 SEGMENTACIÓN DE IMÁGENES POR CRECIMIENTO DE REGIONES.

La segmentación por crecimiento de regiones particiona la imagen en regiones homogéneas, y cada región contiene un único rótulo. Esta técnica es desmenuada a partir de un “*píxel – semilla*” que agrupa los píxeles vecinos que poseen características parecidas, y que satisfacen un cierto criterio de similitud, el crecimiento continua hasta que son encontrados píxeles que no se adaptan a este criterio, y entonces el proceso termina y una nueva región se inicia, cuya media inicial es un valor del nuevo “*píxel – semilla*” (Kai y Muller 1991).

Inicialmente se considera a todos los píxeles de la imagen (Figura II.30.a), de la cual son escogidos los píxeles semillas (Figura II.30.b). Con base al criterio de similitud, cada píxel semilla es comparado con sus píxeles vecinos y dos píxeles vecinos son agrupadas si el criterio de similitud fuera satisfecho (Figura II.30.c y Figura II.30.d). En este caso, ocurre la formación de un nuevo píxel, que hereda las propiedades de los dos píxeles anteriores. Los píxeles son agrupados con sus vecinos en cuanto el criterio de similitud fuera satisfecho (Figura II.30.e y Figura II.30.f) (Bins et al. 1996).

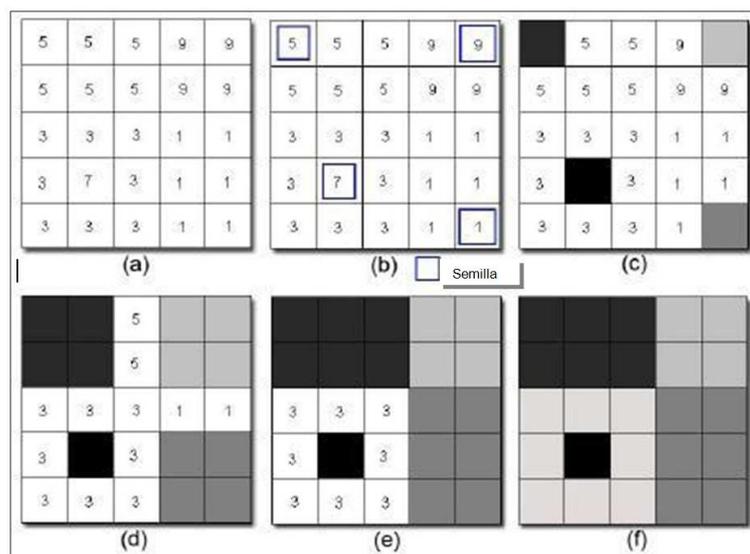


Figura II.30. Proceso de segmentación de imágenes por crecimiento de regiones: umbral de similitud igual a 2 ND.

Fuente: Mira, 2007.

Para que dos regiones X_1 y X_2 vecinas sean unidas, se deben adoptar los siguientes criterios:

- X_1 y X_2 son similares (test de las medias);
- La similitud satisface el umbral establecido;
- X_1 y X_2 son mutuamente próximas (si, entre los vecinos de X_1 , X_2 es la más próxima, y entre los vecinos de X_2 , X_1 es la más próxima).

En el caso que las regiones X_1 y X_2 satisfagan estos criterios, dichas regiones serán agregadas, en caso contrario, el sistema reinicia el proceso de prueba de agregación.

Según Bins et al. (1993), para lograr la segmentación por crecimiento de regiones, es necesario definir dos límites:

a) **Similitud:** Es el límite mínimo debajo del cual dos áreas son consideradas similares y agrupadas en una única región. La definición del rango de similaridad es una etapa crítica del proceso, el cual determinará la precisión de la segmentación; si el umbral de similaridad fuera muy bajo, el proceso no atribuirá muchos píxeles a las regiones; por otro lado, si el umbral fuera alto, píxeles representativos de diferentes regiones serán incorrectamente agrupados. Por esta razón, la imagen segmentada precisa ser estimada para confirmar o rechazar el umbral¹⁷ adoptado (Schoenmakers et al. 1991).

b) **Área:** Es el valor de superficie mínimo, dado en número de píxeles, para generar una región (Bins et al. 1993). Este valor se puede determinar mediante el cálculo de la Unidad Mínima de Mapeo.

2.13.5.1.2 UNIDAD MÍNIMA DE MAPEO (UMM).

Según la norma oficial Mexicana de especificaciones técnicas que deberá contener la cartografía y la clasificación para la elaboración de los inventarios

¹⁷ Umbral: Es el rango de valores que se prueban en la similitud, y de ese rango se escoge el valor que se considere mejor.

de suelos (2000), indica que es la superficie menor que puede ser representada sobre un mapa, de acuerdo a criterios que dependen del tipo de levantamiento de suelos que se realice.

Según el (INEGI) Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México (2009), es un concepto aplicado por cartógrafos cuando se refieren al área más pequeña que se puede mostrar en un mapa. Este concepto es por lo tanto, dependiente de la escala y no relacionado con la clasificación.

Según Salitchev (1979), el principio de la UMM permite lograr coherencia en la representación espacial, eficiencia en la lectura y utilidad del mapa en formato impreso. Este principio indica que a partir de determinada área espacial, los polígonos y sus correspondientes contenidos deben ser generalizados; de lo contrario, dificultarían la distinción por parte del usuario cuando se lea en formato analógico.

Existen varias sugerencias métricas y criterios para determinar la UMM. Por ejemplo en la parte métrica: según Salitchev (1979), Dorronsoro (2003), Rossiter (1994) y Vink (1975), el rango para calcular la UMM va desde 2 x 2 mm hasta 6 x 6 mm. A continuación se presentan algunos ejemplos:

- Según Salitchev (1979), la UMM a nivel internacional más empleada es de 5 x 5 mm, pero él recomienda utilizar 4 x 4 mm ya que es un área mínima que garantiza operatividad cartográfica y adecuada lectura del mapa.
- Según Dorronsoro (2003), considera que en un buen mapa de suelos, los límites entre unidades deben tener una precisión de unos 2 a 3 mm sobre el plano.
- Según Vink (1975), citado por Rossiter (1994), indica que el área mínima cartografiable que debe ocupar una unidad cartográfica ha de ser de al menos 25 mm², un cuadrado de 5 mm de lado.

Así mismo, a continuación algunos de los criterios para determinar la UMM son:

- **Métodos Cuantitativos.**

Como su nombre lo indica busca cuantificar la UMM, que está relacionada con la escala de trabajo del mapa. Diferentes autores e instituciones han planteado su uso, entre los que se mencionan los siguientes: Salichev (1979), Avery (1987), Rossiter (1994), Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica (1995) e Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México (2009). En la siguiente tabla se puede observar el cálculo hecho por Salichev (1979), para diferentes escalas utilizando una UMM de 4 x 4 mm.

Tabla II.16. Área Mínima Cartografiable para diferentes Escalas.

Escala de Trabajo	1 mm igual a	Unidad Mínima Mapeable (4 x 4 mm)
	Metros	m²
1:1.000	1	16
1:5.000	5	400
1:10.000	10	1.6
1:25.000	25	10.000
1:50.000	50	40.000
1:100.000	100	160.000

Fuente: Salichev, 1979.

Para el caso del Ecuador, el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP), mediante el Programa de Regulación y Administración de Tierras Rurales (PRAT), en el año 2008, empleó una metodología para el cálculo de la UMM. Aplicando la [Ec. II.23].

[Ec. II.23]

$$UMM = UMV \times Escala \ de \ trabajo$$

$$UMM = (5 \ mm \ x \ 5 \ mm) \times Escala \ de \ trabajo$$

Donde:

UMV: Unidad mínima visible.

Según Rossiter (2000), la unidad mínima visible, se define como la representación más pequeña en el mapa que puede ser legiblemente delineada.

Siguiendo la recomendación dada por Salichev (1979), se consideró para el presente trabajo de proyecto de grado, la *UMV* de $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$; quedando como se muestra en la siguiente ecuación.

[Ec. II.24]

$$UMM = (4\text{ mm} \times 4\text{ mm}) \times \text{Escala de trabajo.}$$

Para aclarar la Ec.II.24 se pone el siguiente ejemplo:

Supóngase que se desea calcular la *UMM*, para una escala de trabajo 1:25000 y utilizando la *UMV* de $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$.

En la siguiente Figura se puede entender gráficamente el concepto; para una escala de trabajo 1:25000, se determina que 1 mm en el mapa representa a 25 metros en el terreno.

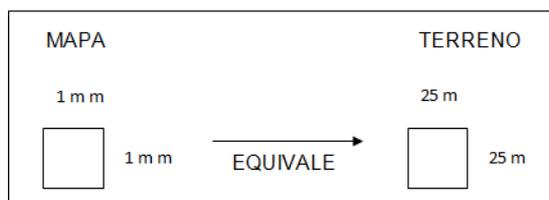


Figura II.31. Relación entre la distancia en el mapa con su correspondencia en el terreno.

Elaborado por: Mejía y Moncayo, 2011.

Se obtiene que $(25\text{ m} \times 25\text{ m}) / (1\text{ mm} \times 1\text{ mm}) = 625\text{ m}^2/\text{mm}^2$

Aplicando la Ec.II.24 se obtiene:

$$UMM = 4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 625\text{ m}^2/\text{mm}^2.$$

$$UMM = 16\text{ mm}^2 \times 625\text{ m}^2/\text{mm}^2.$$

$$UMM = 10000\text{ m}^2.$$

- **A partir de la fuente de datos.**

Considerando como el dado por el (GOFC – GOLD) Global Observation of Forest and Land Cover Dynamics (2011), en el Sourcebook de REDD

(Reducción de emisiones producidas por la deforestación y degradación forestal), en donde da una guía para relacionar la UMM con diferentes sensores disponibles para monitoreo de recursos naturales. En la siguiente figura se puede observar la relación entre la resolución espacial, con diferentes sensores y la UMM.

Resolución	Sensores disponibles	Unidad mínima cartografiable	Costo	Utilidad para el monitoreo
Baja (250-1000 mts)	SPOT-VGT (1998) Terra-MODIS (2000) Envisat-MERIS (2004)	~ 100 ha ~ 10-20 ha	Muy bajo o disponible desde la web	Permite el monitoreo a en grandes áreas y posibilita identificar zonas de cambios "hotspots" para su posterior análisis son sensores de mayor resolución
Media (10 – 60 mts)	Landsat TM or ETM+, Terra-ASTER IRS AWiFs or LISS III CBERS HRCCD DMC SPOT HRV	0.5 - 5 ha	Landsat & CBERS están disponibles sin costo	Cartografía de cobertura de suelo y análisis de cambios
Alta (< 5 mts)	IKONOS QuickBird Aerial photos	< 0.1 ha	Muy alto USD: 2-30 /km ²	Por su gran detalle, utilidad para el entrenamiento y la validación en estudios de cobertura de suelo y análisis de cambio

Figura II.31. Selección y adquisición de datos de satélite y su relación con la UMM.

Fuente: GOFC – GOLD, 2011.

- **Consensos dentro de instituciones.**

Ejemplos de estos, son los casos del Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE), en la que se acordó que la UMM utilizada para la generación de los mapas de uso y cobertura del suelo es de 10.000 m² (1 Ha), para mantener consistencia en la representación de acuerdo a la definición nacional de bosques (Peralvo y Delgado 2010).

Otro caso es el del servicio Geológico de los EE.UU (USGS), que estandarizó para su cartografía de Inventario Nacional de Humedales la UMM es de 0.4 Ha (USGS 2004).

Un último ejemplo es la metodología Corin Land Cover proveniente de Europa y adaptada por Colombia, en la cual establece para escalas de trabajo 1:100.000 una UMM de 5 Ha en zonas urbanas, mientras que para el resto de coberturas del suelo, una UMM de 25 Ha (IGAC, IDEAM y CORMAGDALENA 2008).

- **Selección del tamaño de píxel en las imágenes satelitales para la generación de mapas de uso del suelo.**

Según Hengl (2005), para seleccionar una adecuada resolución espacial en la generación de mapas, no existe una sola resolución espacial adecuada, pero si existe un rango de resoluciones apropiadas.

Para escoger la resolución de la imagen en sistemas de teledetección se debe controlar muchos aspectos usados en el mapeo como las características de los objetos, tales como: la escala, el área, el promedio y el perímetro.

Además se puede hacer inspeccionando el tamaño de los objetos espaciales más pequeños que están siendo mapeados y luego seleccionar la resolución de la imagen más apropiada. Según Rossiter (2003), debe haber al menos cuatro píxeles para representar los objetos más pequeños y al menos dos píxeles que representen los objetos más angostos.

Para decidir el sensor adecuado primero se debe estimar el tamaño de objetos espaciales en el área de estudio como: parcelas de cultivos, cuerpos de agua, parches de bosque, carreteras, etc. Por ejemplo, si el objetivo del proyecto es mapear parcelas agrícolas, y si las parcelas más pequeñas son de aproximadamente una hectárea, la resolución de la imagen, debe ser al menos de 50 metros, lo que significa que se puede usar imágenes landsat o imágenes similares; si en cambio las parcelas más pequeñas son de aproximadamente 0,05 hectárea (corresponde a la escala 1: 5000), se necesita imágenes con resoluciones de 10 metros o más finas.

2.13.5.1.3 EL ALGORITMO DE BHATTACHARYA

La medida de la distancia de Bhattacharya es usada en el clasificador por regiones, para medir la separabilidad estadística entre un par de clases espectrales, o sea, mide la distancia media entre las distribuciones de probabilidades de clases espectrales (INPE 2004).

El clasificador de Bhattacharya es un algoritmo de clasificación supervisada, que requiere la selección de áreas de entrenamiento, pudiendo utilizar las regiones separadas durante el proceso de segmentación o polígonos representativos de las regiones a ser clasificadas. Este utiliza las muestras de entrenamiento para estimar la función densidad de probabilidad de las clases apuntadas en el entrenamiento; en seguida evalúa en cada región, la distancia de Bhattacharya entre las clases, conforme a la [Ec. II.25] (Moreira 2005).

[Ec. II.25]

$$B(p_i, p_j) = \frac{1}{2} (m_i - m_j)^T \left[\frac{C_i + C_j}{2} \right]^{-1} (m_i - m_j) + 0.5 \ln \frac{\left| \frac{C_i + C_j}{2} \right|}{\sqrt{|C_i|} \sqrt{|C_j|}}$$

Donde:

B : Distancia de Bhattacharya;

p_i y p_j : Píxeles en las clases i y j ;

m_i y m_j : Medias de las clases i y j ;

T : Matriz transpuesta;

-1 : Inversa de la matriz;

\ln : Logaritmo neperiano;

i y j : Clases dentro del contexto;

C_i y C_j : Son las matrices de covarianza de las clases;

$|C_i|$ y $|C_j|$: : Determinante de la matriz de covarianza para las clases.

A continuación se da un ejemplo para entender cómo funciona esta distancia. En la siguiente figura, se puede observar la explicación gráfica de la Distancia de Bhattacharya.

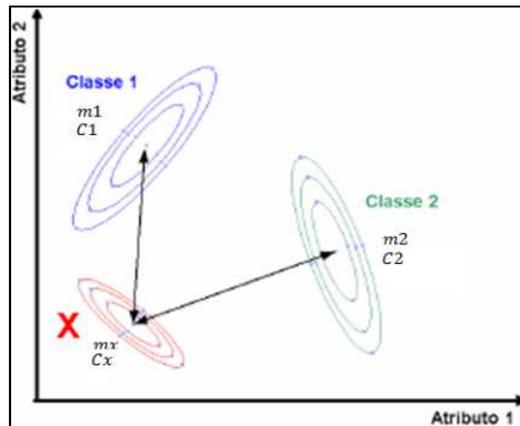


Figura II.32. Representación gráfica de la Distancia de Bhattacharya.

Fuente: De Andrade et al. (2009).

En la Figura II.33, se puede observar un ejemplo de 3 clases, Bosque, Nubes y una clase desconocida, que se desea averiguar a cual unir; con sus 3 bandas y sus respectivos Niveles Digitales.

BOSQUE (b)			NUBES (n)			INCOGNITA (i)		
97	98	100	142	146	142	94	83	76
95	95	102	142	144	142	91	84	79
97	94	102	138	141	142	91	87	84
BANDA 1								
77	74	78	185	196	187	78	63	56
71	74	80	185	193	186	73	67	62
72	76	80	176	184	186	71	67	65
BANDA 2								
34	35	35	215	221	200	35	33	33
34	34	36	221	225	210	33	33	33
35	35	37	208	212	210	35	35	34
BANDA 3								

Figura II.33. Representación gráfica de tres categorías de uso del suelo con 3 bandas y sus respectivos niveles digitales.

Elaborado por: Mejía y Moncayo, 2012.

Para resolver la ecuación de la distancia de Bhattacharya, se siguen los siguientes pasos:

1. Expresar los Números digitales de las Bandas en forma Matricial.

Bosque (b)	Nubes (n)	Incógnita (i)
97 77 34	142 185 215	94 78 35
98 74 35	146 196 221	83 63 33
100 78 35	142 187 200	76 56 33
95 71 34	142 185 221	91 73 33
95 74 34	144 293 225	84 67 33
102 80 36	142 186 210	79 62 33
97 72 35	138 176 208	91 71 35
94 76 35	141 184 212	87 67 35
102 80 37	142 186 210	84 65 34

2. Calcular los Vectores de las medias de cada Banda de cada Clase.

Bosque (b)	Nubes (n)	Incógnita (i)
97.7778	142.1111	85.4444
75.7778	197.5556	66.8889
35.0000	213.5556	33.7778

3. Calcular las Matrices de covarianzas de cada Clase.

Covarianza de Bosque	Covarianza de Nubes	Covarianza de Incógnita
8.9444 7.4444 2.3750	0.0046 0.0356 0.0096	34.7778 37.3056 3.7361
7.4444 10.6944 2.2500	0.0356 1.3068 0.1669	37.3056 42.3611 3.5972
2.3750 2.2500 1.0000	0.0096 0.1669 0.0608	3.7361 3.5972 0.9444

Resolviendo la [Ec. II.25]:

$$B(pi, pj) = \frac{1}{2}(mi - mj)^T \left[\frac{Ci + Cj}{2} \right]^{-1} (mi - mj) + 0.5 \ln \frac{\left| \left[\frac{Ci + Cj}{2} \right] \right|}{\sqrt{|Ci|} \sqrt{|Cj|}}$$

- Para el caso Clase Bosque - Clase Incógnita:

$$\frac{1}{2}(mi - mb)^T \left[\frac{Ci + Cb}{2} \right]^{-1} (mi - mb) = 1.4689$$

$$0.5 \ln \frac{\left| \left[\frac{Ci + Cb}{2} \right] \right|}{\sqrt{|Ci|} \sqrt{|Cb|}} = 1.6237$$

$$B(pi, pj) = 3.0926$$

- Para el caso Clase Nubes - Clase Incógnita:

$$\frac{1}{2} (mi - mn)^T \left[\frac{Ci + Cn}{2} \right]^{-1} (mi - mn) = 176.8107$$

$$0.5 \ln \frac{\left| \left[\frac{Ci + Cn}{2} \right] \right|}{\sqrt{|Ci|} \sqrt{|Cn|}} = 8.2645$$

$$B(pi, pj) = 185.0752$$

Con los valores obtenidos se puede observar que la **Clase Incógnita**, será asignada a la **Clase Bosque** ya que la separabilidad entre ambas (3.0926), es muy baja; a diferencia de la obtenida con la Clase Nubes (185.07), que demuestra un valor de separabilidad alto.

2.13.5.2 EL ALGORITMO ISOSEG

Es un algoritmo de agrupamiento (clusters) de datos no supervisados, aplicado sobre un determinado conjunto de regiones, caracterizadas por sus atributos estadísticos de media, matriz de covarianza y área. (DPI 2006).

Un algoritmo de agrupamiento no supone un conocimiento previo de la distribución de densidad de probabilidad de los datos. Es una técnica que procura agrupar regiones, a partir de una medida de similaridad entre ellas. Tal medida consiste en la distancia de Mahalanobis que permite comprobar cuando una observación, está cerca o lejos de un vector de medias, entre la clase y las regiones candidatas la relación de pertenencia con esta clase (Moreira 2005).

La distancia de Mahalanobis es calculada considerando la dispersión de los datos, inclusive la orientación de muestras de una determinada clase (Santos 2006). Tal distancia es calculada siempre entre un punto y un conjunto de muestras, como es mostrado en la Figura II.34.

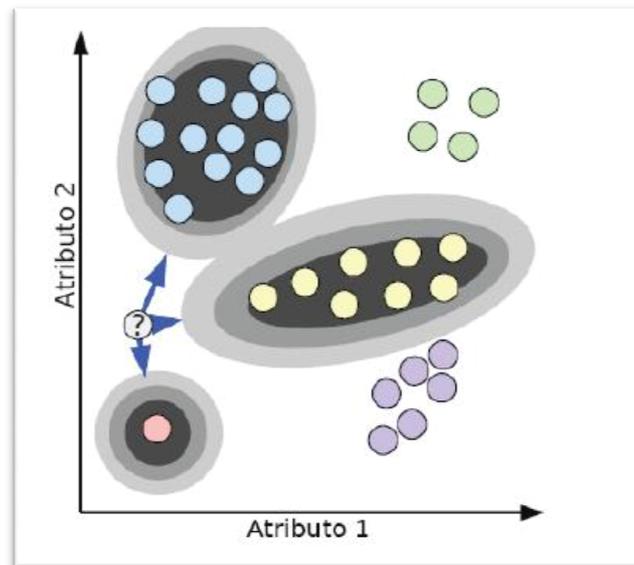


Figura II.34. Cálculo de la distancia Mahalanobis.

Fuente: Korthing, 2006.

La distancia Mahalanobiana envuelve dos representantes para cada clase, a conocer, un vector de medias m_i y m_j y una matriz de covarianza C_i calculada como sigue:

[Ec. II.26]

$$m_i = E[X]$$

[Ec. II.27]

$$C_i = E[(X - m_i)(X - m_i)^T]$$

La distancia de Mahalanobis se expresa y es calculado de la siguiente forma:

[Ec. II.28]

$$D = \frac{1}{2}(X - m_i)^T C_i^{-1} (X - m_j)$$

Donde:

D = distancia de Mahalanobis;

T = matriz transpuesta;

C_j = matriz de covarianza;

m_i y m_j = vector de media de las clases i y j ;

X = Región de análisis

El isoseg utiliza la distancia Mahalanobis como medida para procurar regiones similares caracterizadas por sus atributos estadísticos (media y matriz de covarianza). Se procura por la región de mayor área es el punto inicial de este algoritmo y después la ordenación de las regiones en orden decreciente de área, durante la detección de las clases, es iniciado el procedimiento de agrupamiento de las mismas (de Oliveira y Silva 2005).

Con los atributos estadísticos de cada región a conocer, la matriz de covarianza y el vector de media, se puede estimar el valor central de cada clase. El algoritmo Iseseg se resume en tres etapas, descritas a continuación.

2.13.5.2.1 DEFINICIÓN DEL UMBRAL

Se define un umbral (porcentaje) de aceptación; este umbral significa una distancia de Mahalanobis, siendo que las regiones pertenecientes a alguna clase están distantes por un valor inferior o igual para esta distancia. Se infiere que, cuando mayor sea el umbral, mayor será esta distancia, y consecuentemente menor será el número de clases detectadas por el algoritmo.

2.13.5.2.2 DETECCIÓN DE LAS CLASES

Las regiones existentes son ordenadas, en forma decreciente al área, para iniciarse el procedimiento de agruparlas en clases. Serán tomadas como parámetros estadísticos de una clase (media y matriz de covarianza), los parámetros estadísticos de la región de mayor área que todavía no haya sido clasificada; en seguida, se asocia esta clase con todas las regiones cuya distancia de Mahalanobis fueran inferior a la distancia definida por el umbral de aceptación.

Así, la primera clase tendrá como parámetros estadísticos aquellas regiones con mayor área; las clases siguientes tendrán parámetros estadísticos de media de las regiones de mayor área, que no hayan sido asociadas a ninguna

de las clases previamente detectadas. Esta fase se repite hasta que todas las regiones hayan sido asociadas a alguna clase.

2.13.5.2.3 COMPETENCIA ENTRE CLASES

Las regiones son reclasificadas, considerándose los nuevos parámetros estadísticos de las clases, definidos en las etapas anteriores. Se aplica este procedimiento con el objetivo de uniformizar los temas, o sea, eliminar puntos aislados, clasificados diferentemente de sus vecinos. Con esto, se genera una imagen clasificada con apariencia menos ruidosa.

Sintetizando lo anteriormente mencionado, la segunda fase de detección de las clases consiste básicamente en la detección de clases, siendo un proceso secuencial que puede favorecer las clases que son detectadas en primer lugar. Para intentar eliminar este favorecimiento, se realiza la etapa posterior, la competición entre clases. Esta competición consiste en reclasificar todas las regiones. El parámetro estadístico (media de cada clase) es recalculado y la convergencia de procesos se da cuando la media de las clases no se altera.

Para el final, todas las regiones estarán asociadas a una clase definida por el algoritmo.

2.14 FASE DE VALIDACIÓN

La fase de validación lo que pretende es comprobar la calidad temática de la clasificación de las imágenes, contrastándolas mediante matrices de confusión, y obteniendo de este el índice Kappa. (Ver Anexo 21)

2.14.1 TAMAÑO DE LA MUESTRA

- Según Fallas (2002), indica que la definición del tamaño de la muestra es un tema clásico en el análisis estadístico tradicional y es un área que

ha recibido gran atención en el análisis de clasificaciones derivadas de sensores remotos. Cada observación tiene un costo y por lo tanto su número debe ser el mínimo que satisfaga los requerimientos estadísticos y a la vez sea económicamente viable.

- Según Chavez (2010), indica que uno de los problemas más difíciles que tiene que enfrentar un muestrista es el de encontrar información suficiente y actualizada para establecer el tamaño de la muestra y su reparto entre estratos (clases de uso del suelo).
- Según Congalton (1991), indica que el desarrollo del muestreo supone la columna vertebral del proceso de verificación de Mapas de uso del Suelo; al igual que en otras aplicaciones, el muestreo espacial sirve para seleccionar una pequeña parte del área de estudio, de tal forma que sea suficientemente representativa del conjunto.

2.14.2 CÁLCULO DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA

Existen diferentes métodos para el cálculo del tamaño de la muestra, entre los que se mencionan los siguientes:

2.14.2.1 CÁLCULO DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA PARA UNA POBLACIÓN INFINITA.

Este método se puede utilizar para áreas de estudio que no se conozcan previamente. En este caso se puede aplicar la Distribución binomial; desarrollada por Snedecor y Cochran (1980). Utiliza la fórmula indicada en la [Ec. II.29].

[Ec. II.29]

$$n = \frac{Z^2(p * q)}{E^2}$$

Donde:

p : Proporción esperado de aciertos

q : Proporción esperado de errores (100 – p)

E : Error máximo permisible (fracción)

Z : es el valor de la distribución normal estandarizada para un nivel de confianza determinado.

2.14.2.2 CÁLCULO DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA PARA UNA POBLACIÓN FINITA

Este método se puede utilizar para un área de estudio que sea conocida por el intérprete. De acuerdo a Chavez et. al (2010), indicada la siguiente ecuación.

[Ec. II.30]

$$n = \frac{\sum(N_h \times S_h)^2}{V + \sum N_h \times S_h^2}$$

Donde:

N_h = Población o universo de predios en el Estrato (Área del Estrato).

S_h = Desviación Standard de los elementos de la población en el estrato h.

V = Varianza deseada de la superficie total de predios en el Universo o Población.

Según Mendenhall (2006), en el caso de haber solo un estrato, la desviación estándar se aproxima a 1.

2.14.3 DISEÑO DEL MUESTREO

Una vez determinado el número de muestras requerido, se debe definir cuál esquema de muestreo utilizar para asignar dichas muestras. Existen múltiples diseños de muestreo que pueden utilizarse para investigar la distribución espacial de fenómenos naturales. Investigaciones realizada por diversos autores como: Hord y Brooner (1976); Ginevan (1979); Rhode (1978);

Fitzpatrick-Lins (1991) y Congalton (1988b); indican que el muestreo simple al azar (sin reemplazo) y el estratificado al azar brindan resultados satisfactorios.

En la Figura II.35 se ilustran los posibles esquemas disponibles al investigador de diseños de muestreo. Se observa en A. Muestreo aleatorio, en B. Muestreo estratificado al azar, en C. Muestreo sistemático y en D. Muestreo sistemático estratificado no alineado.

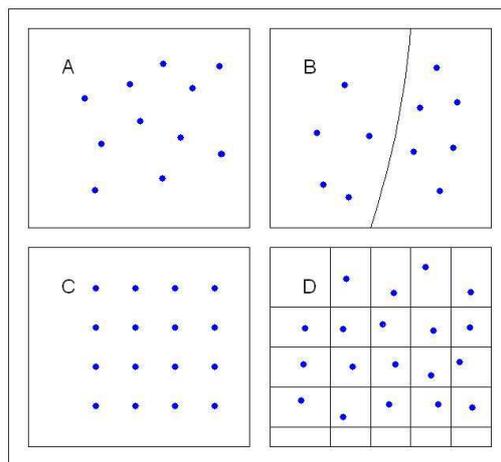


Figura II.35. Esquemas disponibles para muestreo.

Fuente: Chuvieco, 1996. Modificado por Mejía y Moncayo, 2011.

En la Tabla II.17 se da una descripción de las características de los diseños de muestreo.

Tabla II.17. Características de los diseños de muestreo.

Diseño	Características de los Mecanismos de Selección del Muestreo.
Aleatorio simple	<ul style="list-style-type: none"> • Le da la probabilidad a cada uno de los miembros de una población a ser elegidos. Es uno de los más empleados y recomendado en las investigaciones sociales y educativas. • Un grupo de n elementos es seleccionado al azar de entre una población de N puntos definidos por un par de coordenadas. • Tiende a subestimar el área de los atributos poco representados en la población. • Es un método de selección probabilística que permite el cálculo del error de muestreo. • Puede resultar impráctico en áreas de difícil acceso.
Estratificaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Es un método muy utilizado para la validación de imágenes y

con selección aleatoria de muestras	<p>en general en el muestreo de fenómenos de naturaleza espacial.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Es una variación del aleatorio simple y consiste en subdividir a la población en subgrupos o estratos más homogéneos (Ej. Pasto, Bosque, Áreas agropecuarias, etc.), de los que se toman muestras aleatorias simples de cada uno de dichos estratos. Hay que evitar que los estratos no se traslapen o que existan elementos de un estrato en otro.
Muestro sistemático	<ul style="list-style-type: none"> • El área a muestrear es dividida en n intersecciones utilizando una cuadrícula regular. El origen de la cuadrícula es definida en forma aleatoria. Una vez definido dicho punto se seleccionan las superficies a ser muestreadas. • Es un método de muestreo no probabilística y por lo tanto no es posible calcular un error.
Estratificado sistemático no alineado	<ul style="list-style-type: none"> • Este es un diseño de muestreo compuesto que incluye una subdivisión previa de la población a muestrear y luego se hace una selección de dichas muestras. • El diseño ofrece las ventajas del diseño estratificado con la facilidad de trabajo del diseño sistemático. • Elimina los errores derivados de un factor periódico en los datos a muestrear.

Fuente: Fallas, 2002.

2.14.4 PUNTOS DE VALIDACIÓN

Una vez calculado el método de muestreo y calcular el tamaño de la muestra, se procede a ubicar en gabinete, los puntos para ir a campo; estos puntos sirven como insumo para el cálculo de Matrices de Confusión (ver 2.14.5). Para el caso de verificar mapas de clasificación, el intérprete en terreno debería aplicar la misma definición de categorías temáticas que utilizó para clasificar la imagen y con ello poder validar los diferentes métodos de clasificación (Congalton y Green 1999).

2.14.5 MATRICES DE CONFUSIÓN

La matriz de confusión representa los conflictos que se presentan entre las diferentes categorías de uso y cobertura del suelo; las columnas representan la información de referencia (verdad sobre el terreno) y las filas indican el resultado de una clasificación de uso y cobertura del suelo. Para la elaboración de la matriz de confusión se toma como referencia la realidad en el terreno y esta información es comparada con el producto resultante de la clasificación.

Esta matriz es cuadrada ($n \times n$), donde n indica el número de categorías (ver Tabla II.18).

La diagonal de esta matriz expresa el número de puntos de verificación en donde se produce acuerdo entre las dos fuentes (mapa y realidad), mientras los marginales suponen errores de asignación; la relación entre el número de puntos correctamente asignados y el total expresa la fiabilidad global del mapa. Los residuales en columna indican tipos de cubierta real que no se incluyeron en el mapa (errores de omisión), mientras los residuales en filas implican cubiertas del mapa que no se ajustan a la realidad (errores de comisión). (Aronoff 1982; Story y Congalton 1986).

El interés de estas matrices de confusión proviene de su capacidad para plasmar los conflictos entre categorías; de esta forma, se conoce la exactitud conseguida para cada una de las clases, así como los principales conflictos entre ellas. En la siguiente tabla se indica la estructura de una matriz de confusión.

Tabla II.18. Estructura de una matriz de confusión.

	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase n	Total
Clase 1	X_{11}				X_{1+}
Clase 2		X_{22}			X_{2+}
Clase 3			X_{33}		X_{3+}
Clase n				X_{nn}	X_{n+}
Total	X_{+1}	X_{+2}	X_{+3}	X_{+n}	ΣX_{ij}

Fuente: Chuvieco, 2007.

2.14.6 FIABILIDAD TOTAL, ERROR DE MUESTREO E INTERVALO DE CONFIANZA.

A partir de la matriz de confusión pueden generarse toda una serie de medidas estadísticas que permitan validar numéricamente los resultados de distintas técnicas de clasificación. La medida más simple consiste en calcular la fiabilidad global del mapa, relacionando los elementos de la diagonal con el total de puntos muestreados:

[Ec. II.31]

$$\hat{F} = \frac{\sum_{i=1, n} x_{ii}}{\sum_{i=1, n} \sum_{j=1, n} x_{ij}}$$

Para calcular el Error de Muestreo (n_o), se aplica la siguiente ecuación:

[Ec. II.32]

$$n_o = \sqrt{\frac{\hat{F} \times (100 - \hat{F})}{l}}$$

En que:

l = Número de coberturas de la matriz de confusión.

\hat{F} = Fiabilidad Total.

Para calcular del Intervalo de Confianza (μ), se aplica la siguiente ecuación:

[Ec. II.33]

$$\mu = \hat{F} \pm (Z \times n_o)$$

En que:

\hat{F} = Fiabilidad Total.

Z = Es el nivel de confianza.

n_o = Error de muestreo.

2.14.7 EL ESTADÍSTICO KAPPA (\hat{k})

El índice estadística Kappa, sirve para comprobar la fiabilidad de una clasificación y en donde se debe analizar las relaciones entre las diferentes clases (Hudson et al. 1999). En los últimos años, el índice kappa ha sido uno de los índices estadísticos más utilizados para validar imágenes temáticas derivadas de datos de sensores remotos.

Según Gong y Howart (1990), este estadístico tiene la ventaja de representar completamente la matriz de confusión.

Entonces a partir de las datos existentes en la matriz de confusión, se calcula el índice kappa, que es dado por la siguiente ecuación.

[Ec. II.34]

$$\hat{k} = \frac{n \sum_{i=1}^l n_{ii} - \sum_{i=1}^l (n_{i+} n_{+j})}{n^2 - \sum_{i=1}^l (n_{i+} n_{+j})}$$

En que:

l = Número de coberturas de la matriz de confusión.

n = Número total de observaciones de la matriz.

n_{ii} = Número de observaciones en la línea i y columna i en la diagonal principal.

[Ec. II.35]

$$(a) n_{i+} = \sum_{j=1}^l n_{ij}$$

$$(b) n_{+j} = \sum_{i=1}^l n_{ij}$$

En que:

n_{i+} = Es la sumatoria de los valores de una categoría en una fila.

n_{+j} = Es la sumatoria de los valores de una categoría en una columna.

De acuerdo con Congalton y Green (1998), las clasificaciones de las imágenes generadas en sensores remotos son categorizadas en determinados intervalos de valores, conforme a los niveles de aceptación. El valor de k definirá el grado de dependencia entre dos clasificaciones, una de referencia y otra a ser

comparada en la matriz de confusión. Visando una evaluación cualitativa. Landis y Kock (1977), caracterizan ciertos valores k con relación al grado de concordancia. En la Tabla II.19 se indican los intervalos de aceptación de los resultados del índice Kappa.

Tabla II.19. Intervalo de aceptación de los resultados del índice Kappa.

VALOR DE KAPPA	CALIDAD
≤ 0.00	Pésima
0.00 – 0.20	Mala
0.20 – 0.40	Razonable
0.40 – 0.60	Buena
0.60 – 0.80	Muy buena
0.80 – 1.00	Excelente

Fuente: Landis y Kock, 1977.

El índice kappa presenta las siguientes características:

- El índice Kappa, intenta delimitar el grado de ajuste de la exactitud de la clasificación, prescindiendo del causado por factores aleatorios.
- También, permite conocer si las clases bien estimadas se alejan o no significativamente del esperado al azar.
- Además, pretende evaluar si la clasificación ha discriminado las categorías de interés con exactitud significativa, mayor a la que se hubiera obtenido con una asignación aleatoria.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1 DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

Para definir el área de estudio, se siguieron los siguientes criterios:

- **Disponibilidad de información:** para poder cumplir los objetivos del presente estudio, se buscaron imágenes satélites de moderada y alta resolución espacial que se traslapen entre sí y se procedió a visitar diferentes instituciones que cuentan con este tipo de información como por ejemplo: Empresa Pública de Movilidad y Obras Públicas de Quito (EPMMOP), Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos (CLIRSEN) y el Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE).
- **Cercanía de temporalidad** entre las imágenes satelitales.
- **Accesibilidad vial y logística** al área de estudio.
- **Presencia de zonas antrópicas y naturales.**

Por lo anteriormente expuesto, se seleccionó información del MAE de un sector de la parroquia Shushufindi, dentro de la provincia de Sucumbíos. (la descripción del área de estudio se encuentra en el Capítulo I).

3.2 RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Se escogieron dos imágenes satélite, la primera es una imagen Aster de código: AST_LIB_0030521200753723_2009078182451_14567, de mayo del 2007 y la segunda es una imagen satélite Ikonos código: po_309239_0030000_2007, de febrero del mismo año. También se procedió a descargar cartografía base en formato digital, escala 1: 50.000 procedente del

Instituto Geográfico Militar (IGM), accediendo a la página <http://www.geoportaligm.gob.ec>. Dicha cartografía y toponimia fue utilizada como insumo de referencia para el área de estudio.

3.3 VALIDACIÓN DE LA CALIDAD DE LA INFORMACIÓN (PRE PROCESAMIENTO).

Antes de realizar cualquier tratamiento a las imágenes satélite, se validó las mismas. Para lo cual se evaluaron los siguientes aspectos.

- **Revisión de las bandas de las imágenes.**

Se verificó que las imágenes contengan todas las bandas necesarias, siguiendo las especificaciones técnicas explicadas en los Capítulos 2.4.1 y 2.5.1. Para la imagen Aster se comprobó que existan las bandas 1, 2 y 3N correspondientes al visible e infrarojo cercano que poseen una resolución espacial de 15 metros y para la imagen Ikonos se confirmó que cuenten con las bandas 1, 2, 3 y 4 que corresponden a las bandas azul, verde, rojo e infrarojo que poseen una resolución espacial de 4 metros.

- **Combinación de bandas**

Se realizó la combinación de bandas en un solo archivo, lo que permite visualizar una composición RGB¹⁸. Para realizar este proceso se usó el programa ERDAS 9.1 con la opción Layer stack.

En lo que se refiere al sensor Aster, se utilizó las bandas correspondientes al VNIR, que corresponden a las bandas con resolución espacial de 15 metros a excepción de la banda 3B.

En lo que se refiere al sensor Ikonos, se usó todas las bandas con resolución espacial de 4 metros.

¹⁸ Composición Red, Green y Blue por sus siglas en inglés, en español una composición Rojo, Verde y Azul.

- **Revisión de la calidad radiométrica de las imágenes**

Se procedió a realizar una verificación de las imágenes satélite, tanto para Aster como para Ikonos y se observó que no presentan píxeles sin datos digitales (huecos de información), así como bandedo; por lo que no fue necesario realizar este tipo de corrección en ninguna de las dos imágenes satélite.

- **Revisión de la calidad geométrica de las imágenes.**

Se observó la posición espacial de las imágenes, y se determinó que se requería realizar una corrección geométrica (ver capítulo 2.8) a las mismas para posicionarlas en su verdadera ubicación en el terreno en la proyección UTM, WGS84 zona 18 sur.

- **Recorte de las imágenes satélite al área de estudio**

Con el polígono de 60 km² del área de estudio, se procedió a realizar un recorte de las imágenes combinadas anteriormente, mediante el uso de la herramienta Subset en ERDAS.

3.4 PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO.

En la planificación del trabajo de campo para la corrección geométrica y el control posicional de las imágenes, primero se seleccionó la imagen Ikonos (por ser de mayor resolución espacial) y se realizaron los siguientes pasos:

- a. **Ubicación en gabinete de puntos para la georreferenciación:** Se situó puntos en gabinete de acuerdo a los criterios expuestos en el capítulo 2.8 y se distribuyeron en diferentes sitios de la imagen, en lugares discernibles e identificables, y con un número adecuado.

Para conocer el número mínimo de puntos a usar en la georreferenciación de la imagen se analizó la [Ec. II.8].

$$Np = \frac{(0+1)(0+2)}{2} = \frac{(2+1)(2+2)}{2} = 6 \text{ Puntos}$$

Donde:

σ : Es el orden de los polinomios de transformación, que para este caso es de segundo orden, por las razones explicadas en la Tabla II.7.

Siguiendo la recomendación de Villa (2004), que sugiere ubicar de 3 a 4 puntos por el número de coeficientes de la esta ecuación; al ser de segundo orden el número sería de entre 18 a 24 puntos, por tanto se planificó más puntos que los obtenidos en la [Ec. II.8], ubicando un total de 21 puntos los cuales se pueden ver en el ANEXO 4.

- b. **Análisis de la precisión de equipos GPS:** Para determinar el tipo de equipo que se requirió, se procedió a determinar la precisión, según la necesidad del proyecto utilizando las ecuaciones [Ec. II.11] y [Ec. II.12]:

$$T = 0.3 \text{ mm} \times 25000 = 7.5 \text{ m}$$

Donde:

T = Tolerancia de error del mapa.

M = Factor de escala (para Imagen Ikonos escala requerida 1:25.000.)

Para escalas 1:25.000, $T = +/-7.5 \text{ m}$.

Para obtener la precisión del equipo GPS se siguió la recomendación del documento Geospatial Positioning Accuracy Standards del National Standard for Spatial Data Accuracy (1998), en donde se recomienda que la fuente de mayor precisión sea unas tres veces más exacta que el conjunto de datos espaciales con que se compara, para lo cual se utilizó la siguiente fórmula:

$$PGPS = +/- (T \times \frac{1}{3}) = +/- (7.5 \text{ m} \times \frac{1}{3}) = +/- 2.5 \text{ m}$$

Donde:

$PGPS$ = Precisión GPS requerida para Georreferenciación de imágenes.

T = Tolerancia de error del mapa.

Para escalas 1:25.000, la precisión del GPS requerida es de 2.5 m. De acuerdo a este cálculo se procedió a buscar equipos que cumplan con las características deseadas, seleccionando el equipo GPS L1 Trimble Geoexplorer XM (ver ficha técnica en el ANEXO 3).

- c. **Estación GPS Base:** Siguiendo las recomendaciones del Comité Nacional de la Unión Geodésica de Argentina (1996). Se puede obtener presiones relativas submétricas para distancias de hasta 50 km. Se procedió a buscar dentro de la REGME la estación de monitoreo continuo más cercana al área de estudio, la cual corresponde a la estación Auca (ver Figura III.2) que se encuentra a una distancia de 60 km, pero tomando en cuenta que la precisión requerida para el proyecto es métrica (2.5 m), se consideró que la línea base que para receptores geodésicos de medición de fase L1 (de nuestro Gps Trimble geoexplorer XM), a la estación Auca, cumplía con los requerimientos para el post - proceso. A continuación, se solicitó la información de los datos de la estación Base de los días correspondientes a la medición.
- d. **Organización logística:** Se organizó todos los detalles logísticos para la realización del trabajo de campo de una manera rápida y eficiente.

3.4.1 RECOLECCIÓN DE PUNTOS GPS PARA LA GEORREFERENCIACIÓN.

Para la recolección de los puntos, se realizó una salida de campo al área de estudio en el mes de abril del año 2010, ubicándose en los lugares planificados anteriormente (ver ANEXOS 4 y 5), tomando un tiempo de medición de 10 minutos por punto.

3.4.2 POST - PROCESAMIENTO DE PUNTOS GPS PARA LA GEORREFERENCIACIÓN

Para el post - proceso, se requirieron los siguientes insumos:

- Puntos tomados en campo con GPS para la georreferenciación.
- Un equipo GPS Base o una Estación de Monitoreo Continuo que se traslade en las fechas u horas de la medición de los datos.
- Un programa que permita realizar el procesamiento.

Se realizó el siguiente procedimiento, se recolectaron puntos en campo y se analizaron las Estaciones de Monitoreo Continuo disponibles y se adquirió los datos de la Estación Auca, debido a que es la más cercana al área de estudio (alrededor de 60 km de distancia), como se ilustra en Figura III.2 y tiene intervalos de grabación de 1 segundo.

Se utilizó el programa Pathfinder office de Trimble V 4.0 y Los datos post – procesados se encuentran en la Tabla IV.1. Puntos para la Georreferenciación. en formato shape file (*.shp) y se enlazaron a una geodatabase; para más detalle acerca del post - proceso se puede observar el ANEXO 9. El proceso se esquematiza en la siguiente figura.

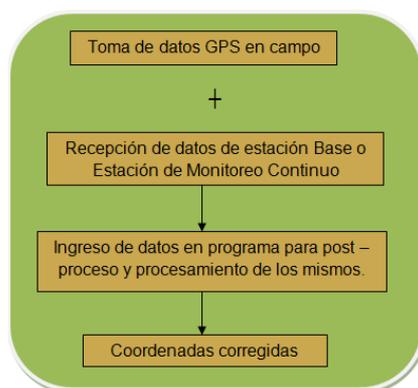


Figura III.1. Esquema de trabajo de datos con GPS.

Elaborado por: Mejía y Moncayo, 2011.

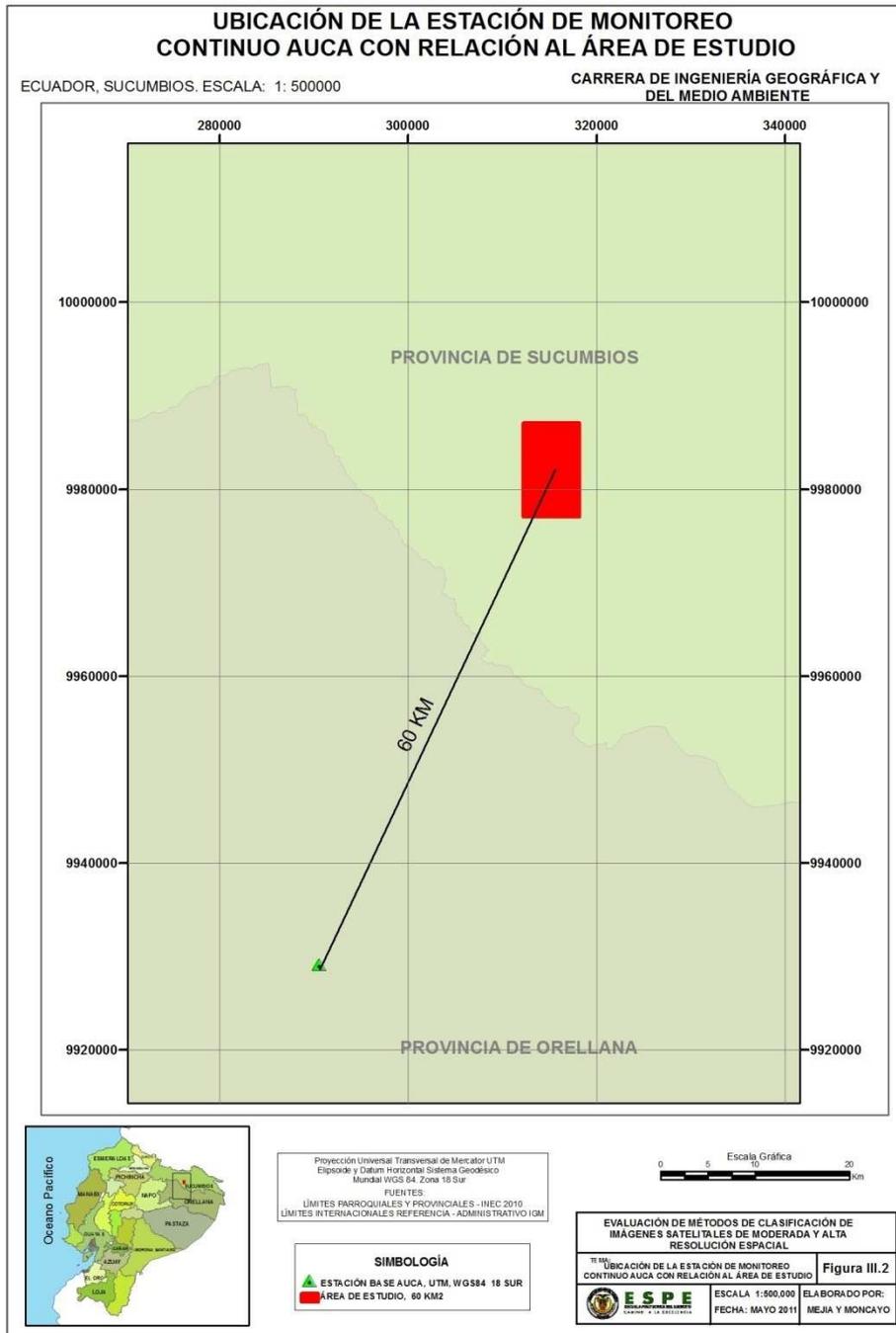


Figura III.2. Ubicación de la estación de Monitoreo Continuo Auca con relación al área de estudio.

Elaborado por: Mejía y Moncayo, 2011.

3.5 GEORREFERENCIACIÓN DE LA IMAGEN IKONOS.

Se utilizaron 21 puntos (analizados en 3.4), a continuación se utilizó el programa ERDAS 9.1, el módulo Geometric Correction que permite realizar

corrección geométrica a las imágenes y se seleccionó una corrección polinomial de segundo grado, referenciando al sistema UTM, zona 18 Sur, en el Datum WGS-84. Los puntos se distribuyeron adecuadamente en lugares claramente identificables en la imagen como se puede ver en el ANEXO 4.

Luego se resamplio la imagen, seleccionando el método del vecino más cercano y conservando la resolución espacial de 4 metros de la imagen original.

3.5.1 CONTROL POSICIONAL DE LA IMAGEN IKONOS.

Se verificó que la Precisión horizontal obtenida por los puntos GPS post – procesados no excedan el límite calculado. Primeramente se aplicó la [Ec. II.11], en donde indica la tolerancia de error del mapa.

$$T = +/-0.3 \text{ mm} \times M = +/-0.3 \text{ mm} \times 25.000 = +/-7.50 \text{ m}$$

Donde:

T = Tolerancia de error del mapa

M = Factor de escala = Para imagen Ikonos = 25.000

A continuación, para obtener la precisión GPS requerida para georreferenciar la imagen Ikonos se utilizó la [Ec. II.12], que indicamos a continuación y dichas coordenadas post - procesadas se pueden observar en la Tabla 4.2: Puntos de Control Posicional.

$$PGPS = +/- (7.50 \times \frac{1}{3}) = +/-2.5 \text{ m}$$

Siguiendo la recomendación del IGM se utilizó la metodología NMAS, descrita por Ruano (2008), se tomaron 20 puntos en campo que cumplan con los mismos criterios de ubicación y distribución de los puntos para georreferenciación y a los mismo se los comparó con su ubicación en la imagen digital mediante puntos creados en gabinete emulando su ubicación real, para lo cual se puede observar los ANEXOS 7 y 8, y el resultado de este

análisis se puede consultar en la Tabla IV.4. Tabla de puntos utilizados para control posicional de la imagen Ikonos empleando el Test NMAS.

3.6 GEORREFERENCIACIÓN DE LA IMAGEN ASTER.

Se georreferenció la imagen Aster utilizando la imagen Ikonos previamente georreferenciada y para calcular el número de puntos necesarios se volvió a utilizar la siguiente ecuación:

$$Np = \frac{(2 + 1)(2 + 2)}{2}$$

$$Np = 6 \text{ puntos.}$$

Así mismo, siguiendo la recomendación de Villa (2004), que sugiere ubicar de 3 a 4 puntos por el número de coeficientes de la esta ecuación; al ser de segundo orden el número sería de entre 18 a 24 puntos; pero ahora se cuenta con la imagen Ikonos como una referencia de mayor precisión, por dicha razón se tomó 40 puntos para cumplir holgadamente con este requerimiento.

A continuación se utilizó el programa Erdas 9.1, el módulo Geometric Correction que permite realizar corrección geométrica a las imágenes y se seleccionó una corrección polinomial de segundo grado, referenciando al sistema UTM, zona 18 Sur, en el Datum WGS-84. En un visualizador se desplegó la imagen Aster y en otro la imagen Ikonos como referencia; a continuación se tomaron puntos identificables en ambas imágenes como por ejemplo: límites entre cultivo y bosque, intersección de caminos, bordes del río y cualquier lugar que sea destacable en las imágenes, así mismo se hizo una distribución homogénea de los puntos y en la Figura III.3, se observa el proceso descrito.

Luego se resamplio la imagen, seleccionando el método del vecino más cercano y conservando la resolución espacial de 15 metros de la imagen original. Los resultados se pueden consultar en la Tabla IV.5.

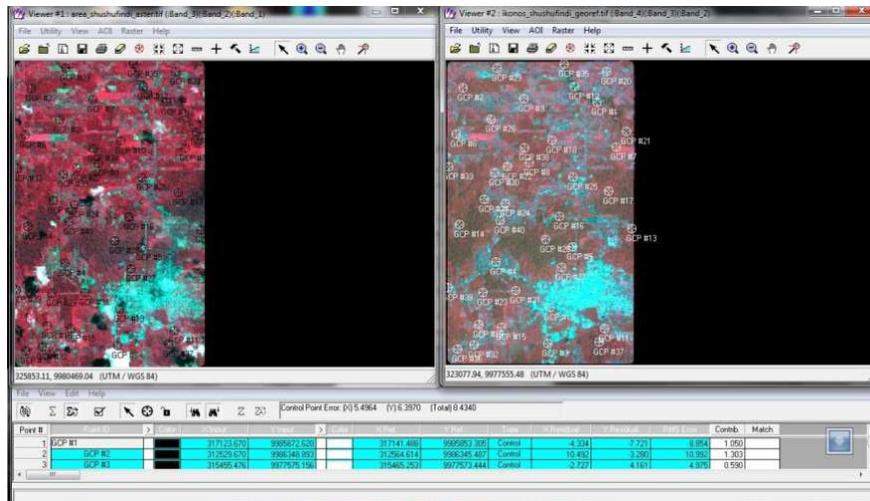


Figura III.3. Georreferenciación de la imagen Aster tomando como referencia la imagen Ikonos georreferenciada.

3.6.1.- CONTROL POSICIONAL DE LA IMAGEN ASTER.

Se aplicó la [Ec. II.11], para calcular la tolerancia de error del mapa.

$$T = \pm 0.3 \text{ mm} \times M = \pm 0.3 \text{ mm} \times 50.000 = \pm 15 \text{ m}$$

Donde:

T = Tolerancia de error del mapa

M = Factor de escala = Para imagen Aster = 50.000

A continuación, se utilizó la imagen Ikonos georreferenciada como fuente de mayor precisión para realizar el control posicional.

Siguiendo la recomendación del IGM se utilizó la metodología NMAS, descrita por Ruano (2008), se tomaron 21 puntos tanto en la imagen Aster georreferenciada como en la imagen Ikonos georreferenciada.

Se tomaron puntos identificables en ambas imágenes como intersección de caminos, bordes del río y delimitación de parcelas, así mismo se hizo una

distribución homogénea de los puntos. El resultado de este análisis se puede consultar en la Tabla IV.6. Puntos utilizados para control posicional de la imagen Aster empleando el Test NMAS.

3.7 CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES

Como paso inicial a la clasificación se realizó una inspección visual de las imágenes Ikonos y Aster, mediante el programa Arcgis 10, y se observó que la imagen Aster contenía nubes y sombras de las mismas, por lo que se procedió a extraer ésta información no útil de la imagen a partir de un enmascaramiento, dejando así, solamente información útil.

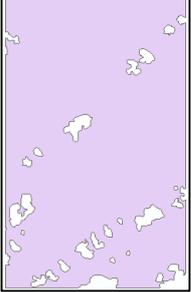
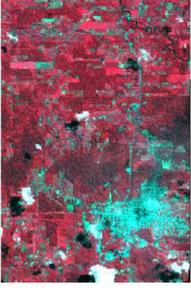
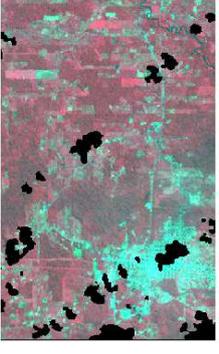
Como paso siguiente, las imágenes satelitales se clasificaron de acuerdo a los siguientes métodos, con los respectivos programas citados:

- Supervisado, por Píxeles utilizando el algoritmo de Máxima Probabilidad en el programa Erdas 9.1
- No Supervisado, por Píxeles utilizando el algoritmo Isodata en el programa Erdas 9.1
- Supervisado, por Objetos utilizando el algoritmo de Bhattacharya en el programa Spring 5.1.8
- No Supervisado, por Objetos utilizando el algoritmo Ioseg en el programa Spring 5.1.8

3.7.1 EXTRACCIÓN DE LA INFORMACIÓN NO ÚTIL (ENMASCARAMIENTO DE LA IMAGEN ASTER).

Para la extracción de la información no útil, se realizó el siguiente proceso descrito en la Tabla III.1.

Tabla III.1. Pasos, gráfico y proceso para la obtención de la imagen Aster Enmascarada.

PASOS	GRÁFICO	PROCESO
1		<p>Digitalización de polígonos sobre la imagen georreferenciada mediante criterios de interpretación visual.</p>
2	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>Área de estudio (AE)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Polígonos digitalizados paso 1 (PD)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Polígono resultante (PR)</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">AE - PD = PR.</p>	<p>Resta del polígono del área de estudio de los polígonos obtenidos en el paso 1, utilizando el comando Erase del programa Arc Gis 9.3.</p>
3	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>Transformación AOI en Erdas</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Imagen Aster georreferenciada con nubes.</p> </div> </div>	<ul style="list-style-type: none"> • Importación del polígono resultante del paso 2 al programa Erdas 9.2. • Conversión del PR a un archivo Área de Interés (AOI). • Utilizando la herramienta Subset se extrae de la imagen georreferenciada la información no útil.
4		<p>Imagen Aster Enmascarada resultante.</p>

Elaborado por: Mejía y Moncayo, 2011.

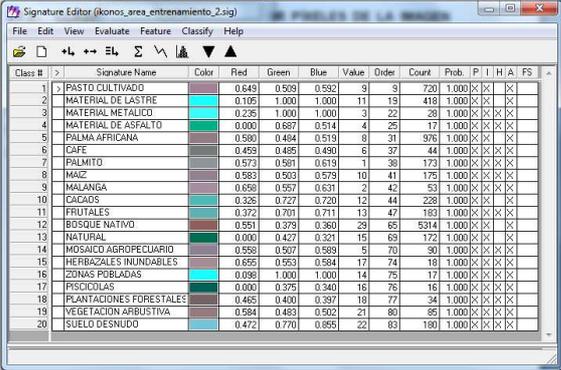
3.7.2 GENERACIÓN DE LA LEYENDA TEMÁTICA.

Para poder establecer la leyenda temática (ver 2.13.2.1) y realizar las clasificaciones, se hizo una inspección visual de las imágenes; en ese sentido, en los lugares en donde existían dudas del tipo de cobertura, se efectuó una visita de campo, en la cual se recolectaron puntos de calibración (ver ANEXO 10), considerando en la recolección por lo menos un punto por cada tipo de cobertura del suelo que incluye su respectivo respaldo fotográfico (ver ANEXO 11).

3.7.3 MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN POR PÍXELES.

3.7.3.1 CLASIFICACIÓN SUPERVISADA POR PÍXELES, ALGORITMO DE MÁXIMA PROBABILIDAD PARA LA IMAGEN IKONOS.

Para la clasificación supervisada por píxeles, se utilizó el programa ERDAS 9.1; se importó la imagen Ikonos georreferenciada, se escogió el módulo *Classifier* → *Signature Editor* y se crearon las firmas de clase de las áreas de entrenamiento. En la Figura III.4. se puede observar el módulo *Signature Editor*, útil para la creación y edición de las firmas espectrales.



Class #	Signature Name	Color	Red	Green	Blue	Value	Order	Count	Prob	P	I	H	A	FS
1	PASTO CULTIVADO		0.649	0.509	0.592	9	9	720	1.000	X	X	X	X	X
2	MATERIAL DE LASTRE		0.105	1.000	1.000	11	19	418	1.000	X	X	X	X	X
3	MATERIAL METALICO		0.235	1.000	1.000	3	22	28	1.000	X	X	X	X	X
4	MATERIAL DE ASFALTO		0.000	0.887	0.514	4	25	17	1.000	X	X	X	X	X
5	PALMA AFRICANA		0.580	0.454	0.519	8	31	976	1.000	X	X	X	X	X
6	CAFE		0.459	0.485	0.490	8	37	44	1.000	X	X	X	X	X
7	PALMITO		0.573	0.581	0.619	1	38	173	1.000	X	X	X	X	X
8	MAIZ		0.583	0.503	0.579	10	41	175	1.000	X	X	X	X	X
9	MALANGA		0.658	0.597	0.631	2	42	53	1.000	X	X	X	X	X
10	CACAO		0.325	0.727	0.720	12	44	238	1.000	X	X	X	X	X
11	FRUTALES		0.372	0.701	0.711	13	47	183	1.000	X	X	X	X	X
12	BOSQUE NATIVO		0.551	0.379	0.380	29	65	5314	1.000	X	X	X	X	X
13	NATURAL		0.000	0.427	0.321	15	69	172	1.000	X	X	X	X	X
14	MOSAICO AGROPECUARIO		0.558	0.307	0.589	5	70	50	1.000	X	X	X	X	X
15	HERBAZALES INUNDABLES		0.655	0.553	0.584	17	74	18	1.000	X	X	X	X	X
16	ZONAS POBLADAS		0.098	1.000	1.000	14	75	17	1.000	X	X	X	X	X
17	PRISCOLAS		0.000	0.375	0.340	16	76	16	1.000	X	X	X	X	X
18	PLANTACIONES FORESTALES		0.465	0.400	0.397	18	77	34	1.000	X	X	X	X	X
19	VEGETACION ARBUSTIVA		0.584	0.483	0.502	21	80	55	1.000	X	X	X	X	X
20	SUELO DESNUDO		0.472	0.770	0.855	22	83	180	1.000	X	X	X	X	X

Figura III.4. Signature Editor. Creación de áreas de entrenamiento.

Una vez creadas las áreas de entrenamiento, abrir Supervised Classification (ver Figura III.5), se realizó el siguiente proceso:

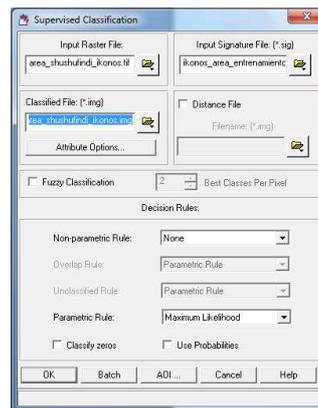


Figura III.5. Parámetros para la generación de la clasificación supervisada.

- Selección del módulo *Classifier* → *Supervised Classification*
- Ingreso de la imagen Ikonos georreferenciada.
- Nombre del archivo de salida.
- Selección del método no paramétrico
- Selección del algoritmo de máxima probabilidad
- Ok (ejecutar del proceso).

3.7.3.2 CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA POR PÍXELES, ALGORITMO ISODATA PARA LA IMAGEN IKONOS.

Para la clasificación no supervisada por píxeles, se utilizó el programa ERDAS 9.1, se importó la imagen Ikonos georreferenciada y se procedió a ir al módulo *Classifier* → *Unsupervised Classification (Isodata)*. Se realizó el siguiente proceso (ver Figura III.6):

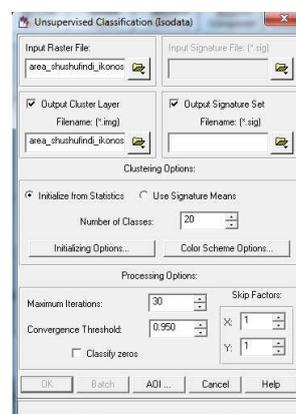


Figura III.6. Parámetros de clasificación no supervisada.

- Ingreso de la imagen Ikonos georreferenciada.
- Nombre del archivo de salida.
- Ingreso del número de clases (19 clases correspondientes al Nivel III de la leyenda temática, ver Tabla II.13. Definiciones para el Nivel III.).
- Ejecutar 10 iteraciones. Según la recomendación dada por Quintana (2008).
- Seleccionar un umbral de convergencia al 95%. Para asegurar que este porcentaje de píxeles queden asignados a un solo agrupamiento.
- Ok (ejecutar del proceso).

3.7.3.3 CLASIFICACIÓN SUPERVISADA POR PÍXELES, ALGORITMO DE MÁXIMA PROBABILIDAD PARA LA IMAGEN ASTER.

Para la clasificación supervisada por píxeles, se utilizó el programa ERDAS 9.1; se importó la imagen Aster georreferenciada, se escogió el módulo *Classifier* → *Signature Editor* y se crearon las firmas de las áreas de entrenamiento (paso previo a la clasificación supervisada).

Una vez creadas las áreas de entrenamiento, se realizó el siguiente proceso:

- Selección del módulo *Classifier* → *Supervised Classification*
- Ingreso de la imagen Ikonos georreferenciada.
- Nombre del archivo de salida.
- Selección del método no paramétrico
- Selección del algoritmo de máxima probabilidad
- Ok (ejecutar del proceso).

3.7.3.4 CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA POR PÍXELES, ALGORITMO ISODATA PARA LA IMAGEN ASTER.

Para la clasificación no supervisada por píxeles, se utilizó el programa ERDAS 9.1, se importó la imagen Aster georreferenciada y se escogió el

módulo *Classifier* → *Unsupervised Classification*. Se realizó el siguiente proceso:

- Ingreso de la imagen Ikonos georreferenciada.
- Nombre del archivo de salida.
- Ingreso del número de clases (12 clases correspondientes al Nivel II de la leyenda temática, ver Tabla II.12. Definiciones para el Nivel II.)
- Ejecutar 10 iteraciones. Según la recomendación dada por Quintana (2008).
- Seleccionar un umbral de convergencia al 95%. Para asegurar que este porcentaje de píxeles queden asignados a un solo agrupamiento.
- Ok (ejecutar del proceso).

3.7.4 CLASIFICACIÓN POR MÉTODO DE OBJETOS.

Después de la instalación del programa Spring versión 5.1.8, de uso libre, desarrollado por el *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)* y antes de realizar cualquier tipo de clasificación en dicho programa, se procedió a realizar los siguientes pasos operativos.

- Configuración operativa del programa Spring.
- Segmentación de imágenes por crecimiento de regiones.
- Clasificación Supervisada (Bhattacharya), y No Supervisada (Isoseg).

3.7.4.1 CONFIGURACIÓN OPERATIVA DEL PROGRAMA SPRING PARA CARGA Y VISUALIZACIÓN DE IMÁGENES.

Se configuró la carga y visualización de imágenes empleando los siguientes pasos:

- Crear un Banco de Datos. Selección de *Archivo* → *Banco de Datos*.

- Crear un Proyecto, donde se debe introducir la ubicación espacial del área de estudio, comprendidos por un límite geográfico¹⁹ (Proyección y Datum). Selección de *Archivo* → *Proyecto* → *Proyecto*.
- Establecer un modelo de datos. Selección de *Archivo* → *Modelo de Datos* → *CAT_Imagen*.
- Importación de las imágenes Ikonos y Aster con formato Geo tiff. *Archivo* → *Importar* → *Importar Datos Vectoriales y Matriciales*.
- Visualización de las imágenes; se realizó un paso previo de mejoramiento del contraste por cada banda. Selección de *Imagen* → *Contraste* → *Canal (rojo, azul, verde)* → *salir*. En la siguiente figura se puede observar un ejemplo de manipulación del contraste.

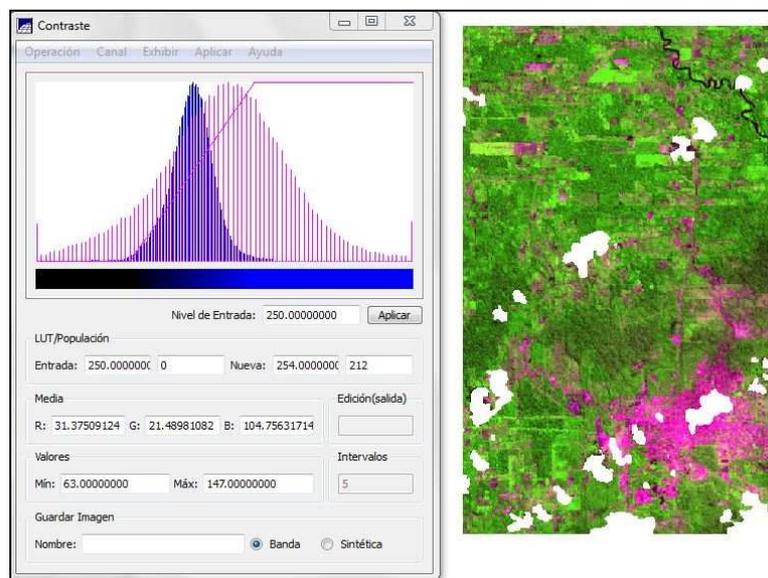


Figura III.7. Módulo de Contraste en el programa Spring.

3.7.4.2 SEGMENTACIÓN DE IMÁGENES POR CRECIMIENTO DE REGIONES PARA LA IMAGEN IKONOS.

Para iniciar con la segmentación se procedió a realizar los siguientes pasos:

¹⁹ Cualquier cobertura ingresada posteriormente a la definición del área de estudio será cortada.

- Seleccionar *Imagen* → Segmentación. En la siguiente figura se puede observar el módulo para ingresar los parámetros para la segmentación de imágenes.



Figura III.8. Módulo Segmentación en el programa Spring

- Seleccionar el *Método* → *Crecimiento de Regiones*, Selección de las bandas → Ingreso del valor del área: Este valor expresado en píxeles, se determinó utilizando la ecuación [Ec. II.24], de la unidad mínima de mapeo (UMM).

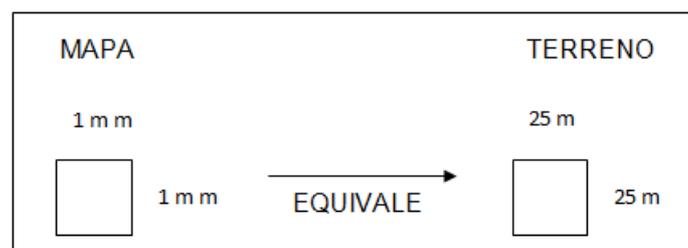
Donde:

$$UMM = UMV \times Escala \ de \ trabajo$$

$$UMV = 4 \ mm \times 4 \ mm$$

$$UMV = 16mm^2.$$

Escala de trabajo para Ikonos:



Se obtiene que $(25 \text{ m} \times 25 \text{ m}) / (1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}) = 625 \text{ m}^2 / \text{mm}^2$,

Escala de trabajo para Ikonos = $625 \text{ m}^2 / \text{mm}^2$

$UMM = 16 \text{ mm}^2 \times 625 \text{ m}^2 / \text{mm}^2$

$UMM = 10000 \text{ m}^2 = 1 \text{ Ha.}$

Para obtener el número de píxeles = $\frac{UMM}{\text{Área del píxel}}$

Área del píxel = $4 \text{ m} \times 4 \text{ m} = 16 \text{ m}^2$

Número de píxeles = $10000 \text{ m}^2 / 16 \text{ m}^2$

Número de píxeles para la imagen Ikonos = 625.

- Ingreso del valor de similitud. Para poder establecer el valor óptimo para esta imagen, se siguió la recomendación dada por Schoenmakers et al. (1991), quien indica que: "la imagen segmentada precisa ser estimada para confirmar o rechazar el umbral adoptado".
- Siguiendo esta sugerencia se realizaron varias pruebas (ver Figura III.9), y se observó que el mejor **valor de similitud para la imagen Ikonos es de 5**.
- Ingresar nombre de la imagen segmentada.
- Selección del *Suavizado de arcos* → *no*.
- Ejecutar.

En la Figura III.9, se puede observar las pruebas realizadas para determinar el mejor valor de similitud de la imagen Ikonos.

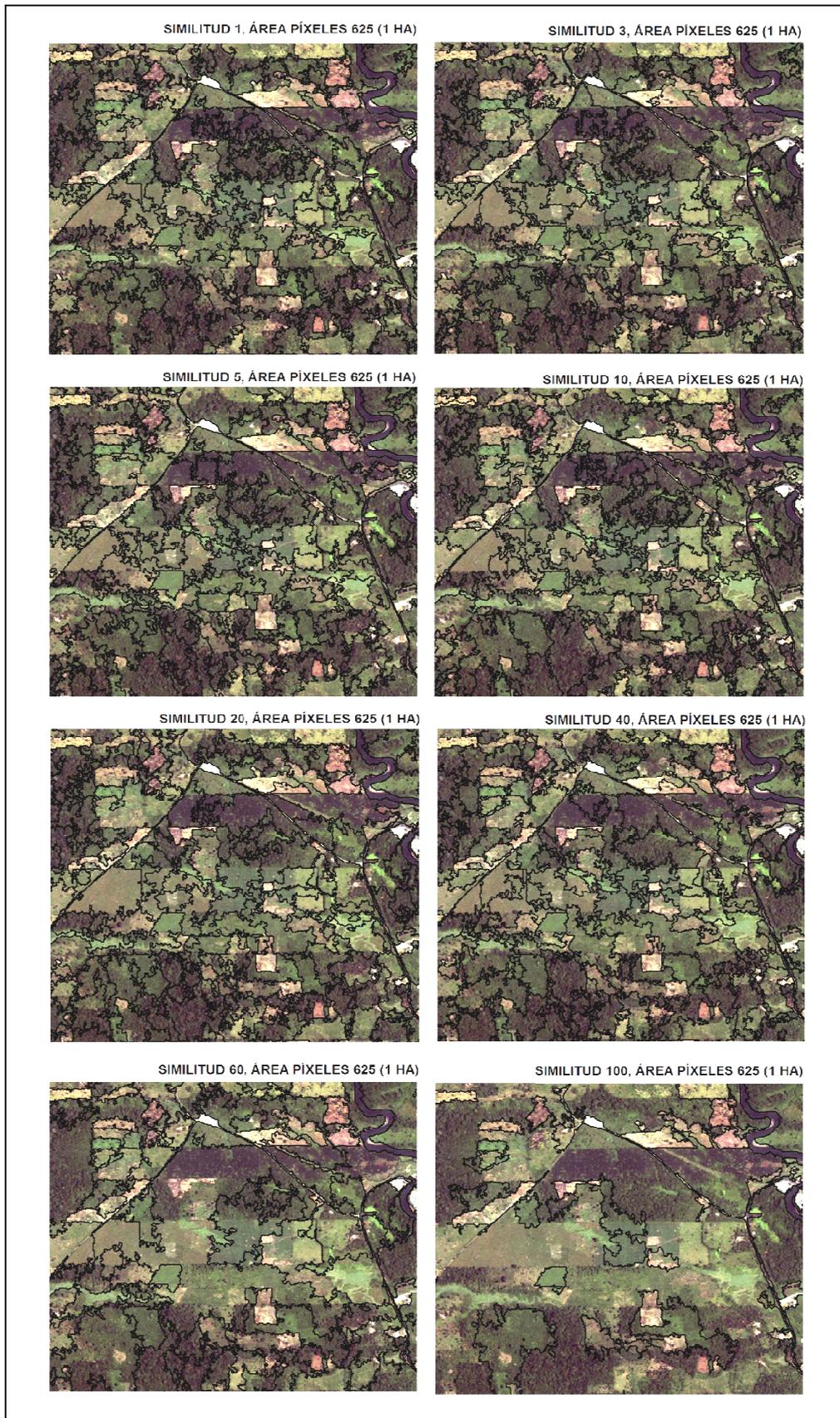


Figura III.9. Pruebas de similitud para la imagen Ikonos.

Elaborado por: Mejía y Moncayo, 2011.

3.7.4.3 SEGMENTACIÓN DE IMÁGENES POR CRECIMIENTO DE REGIONES PARA LA IMAGEN ASTER.

Para iniciar con la segmentación se procedió a realizar los siguientes pasos:

- Selección *Imagen* → Segmentación.
- Selección del *Método* → *Crecimiento de Regiones*.
- Selección de las bandas.
- Ingreso del valor del área: Este valor expresado en píxeles, se determinó utilizando la ecuación de la UMM.

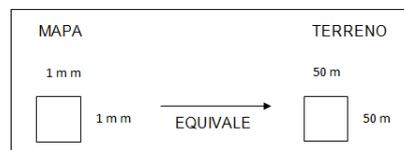
Donde:

$$UMM = UMV \times Escala \text{ de trabajo}$$

$$UMV = 4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$$

$$UMV = 16 \text{ mm}^2$$

Escala de trabajo para Aster:



Se obtiene que $(50 \text{ m} \times 50 \text{ m}) / (1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}) = 2500 \text{ m}^2 / \text{mm}^2$,

$$Escala \text{ de trabajo para Aster} = 2500 \text{ m}^2 / \text{mm}^2$$

$$UMM = 16 \text{ mm}^2 \times 2500 \text{ m}^2 / \text{mm}^2$$

$$UMM = 40000 \text{ m}^2 = 4 \text{ Ha.}$$

Para obtener el número de píxeles para Aster = $\frac{UMM}{\text{Área del píxel}}$

$$\text{Área del píxel para Aster} = 15 \text{ m} \times 15 \text{ m} = 225 \text{ m}^2$$

$$\text{Número de píxeles para la imagen Aster} = 40000 \text{ m}^2 / 225 \text{ m}^2$$

$$\text{Número de píxeles para la imagen Aster} = 117.$$

- Ingreso del valor de similitud. Para poder establecer el valor óptimo para esta imagen, se realizaron varias pruebas (ver Figura III.10). Se observó que el mejor valor de similitud para la imagen **Aster es de 1**.

- Ingresar nombre de la imagen segmentada.
- Selección del *Suavizado de arcos* → *no*.
- Ejecutar.

En la Figura III.10 , se puede observar las pruebas realizadas para determinar el mejor valor de similitud.

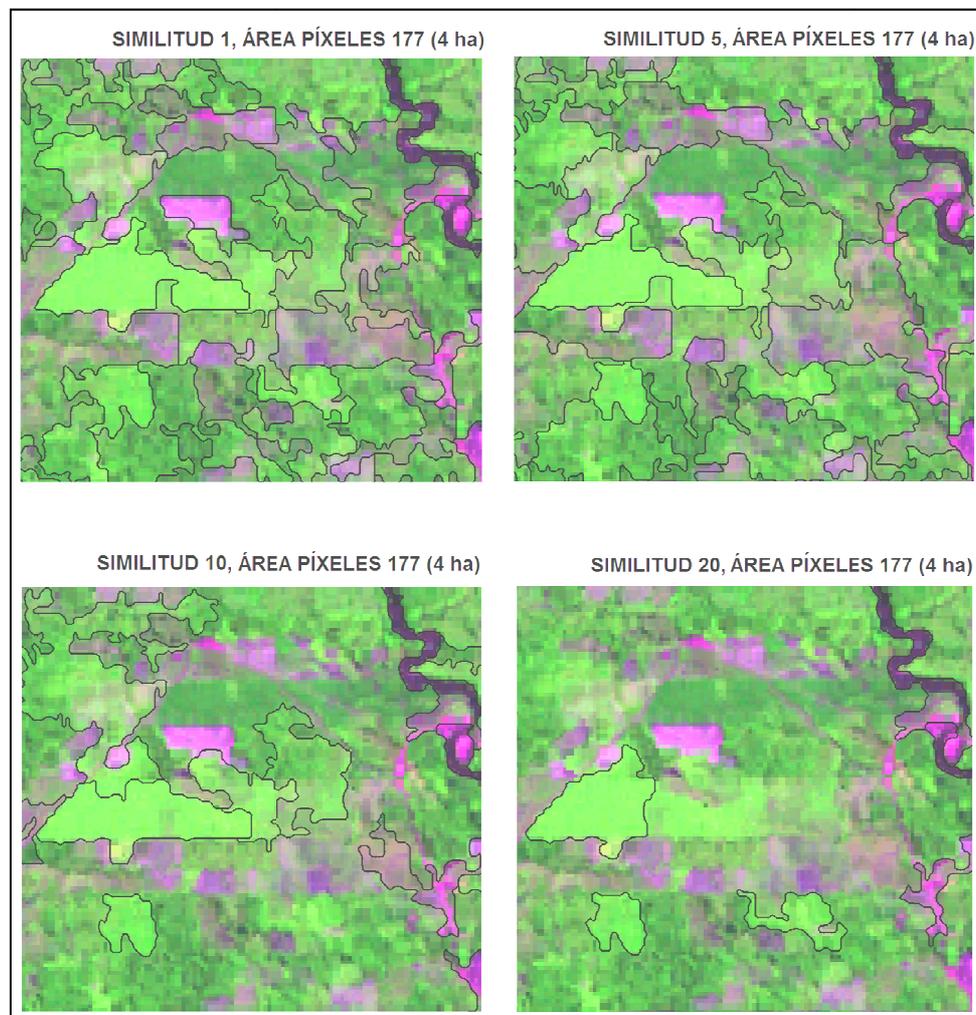


Figura III.10. Pruebas de similitud para la imagen Aster.

Elaborado por: Mejía y Moncayo, 2011.

En la Figura III.11, se puede observar ejemplos de segmentación por crecimiento de regiones, utilizando diferentes rangos de área y un valor de similitud constante.

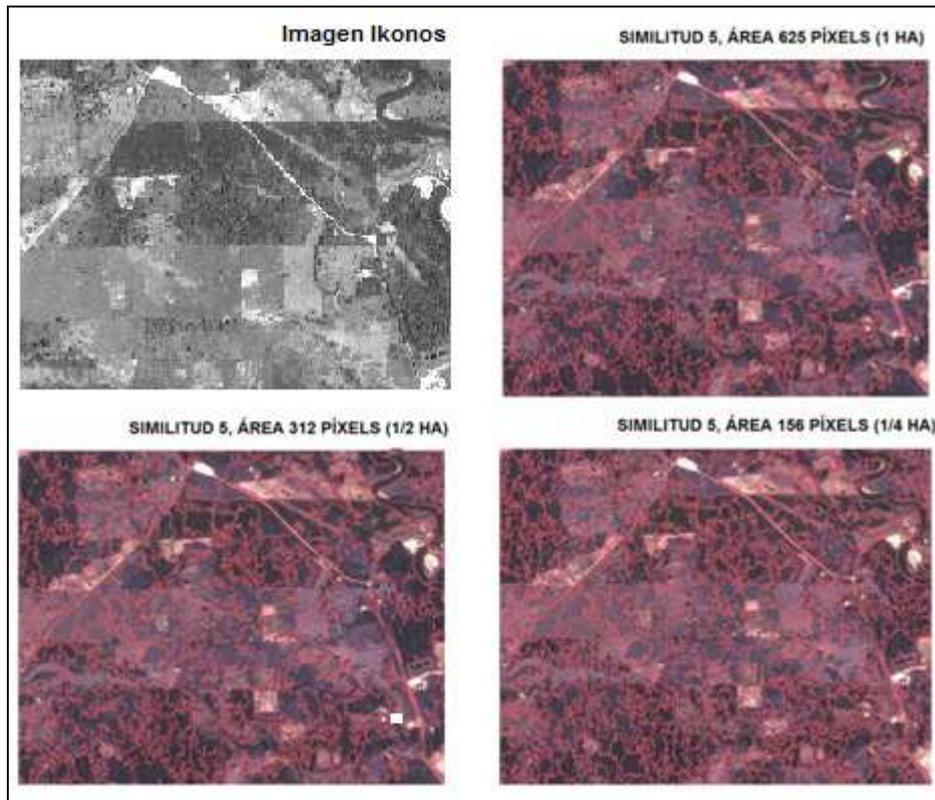


Figura III.11. Segmentación de imágenes por crecimiento de regiones, Rango de similitud uniforme y área variable.

Elaborado por: Mejía y Moncayo, 2011.

3.7.4.4 CLASIFICACIÓN SUPERVISADA POR MÉTODO DE OBJETOS, ALGORITMOS DE BHATTACHARYA PARA LA IMAGEN IKONOS.

Para realizar la clasificación supervisada, se segmentó la imagen como se puede observar en los anteriores ítems y se continuó con los siguientes pasos:

- *Desplegar la imagen Ikonos Georreferenciada, **Menu** → **Clasificación**.*
- *En la pantalla de clasificación crear un **contexto** → activar la casilla por **Regiones** → seleccionar las 4 bandas → en imágenes segmentadas, seleccionar la imagen segmentada que corresponda , en este caso "CONTEX_IKON-5-625" y dar clic en ejecutar .*

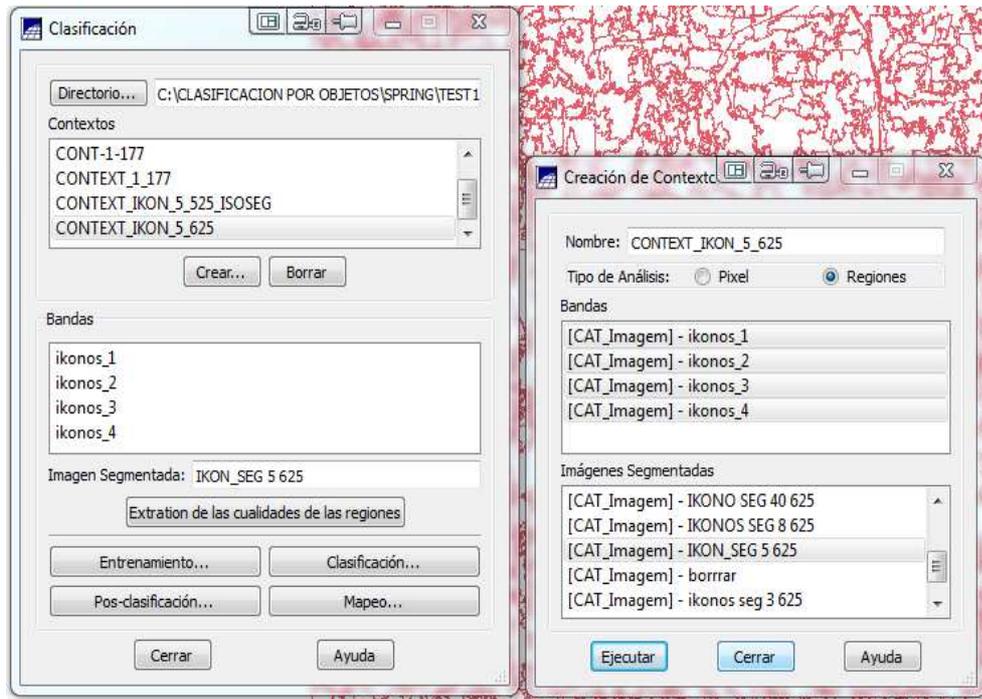


Figura III.12. Programa Spring, clasificación y creación de contextos.

- En la pantalla de clasificación seleccionar el contexto creado anteriormente → clic en **Extracción de las cualidades de las regiones** → clic sobre **Entrenamiento**. (donde se adquiere las muestras de los niveles temáticos) → clic en **aceptar**.
- En la pantalla Entrenamiento establecer el **nombre** de las clases de acuerdo a la leyenda temática pre establecida → seleccionar: el **color, modo Normal, exhibe todas**. En **Tipo**: activar **adquisición**, y en contorno **Región** → buscar la clase que corresponda en la imagen satelital Ikonos y dar clic sobre ella (se seleccionará la región que contenga dicha clase) y en la ventana de entrenamiento dar un clic sobre **Adquirir**. Este paso se repite por varias ocasiones hasta completar toda la leyenda temática.

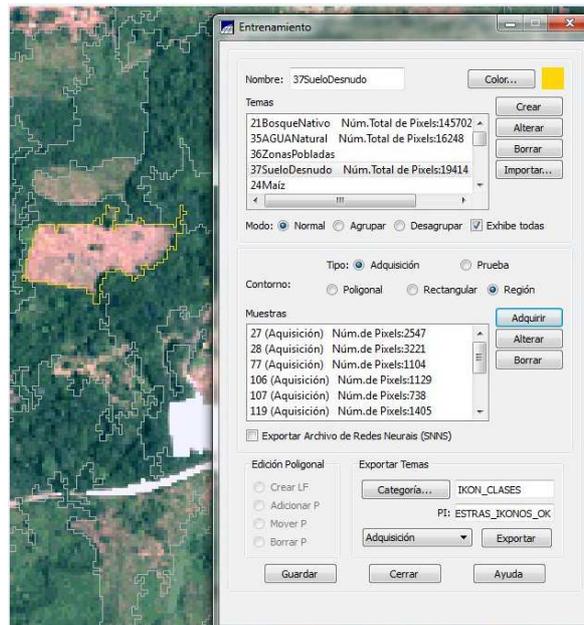


Figura III.13. Programa Spring, asignación de la leyenda temática.

- En la pantalla Entrenamiento aplicar **Guardar** → **Cerrar**.
- También se puede exportar los temas a una **Categoría** para visibilizarlos, luego ubicar nombre pi (plano de información o capa): dar clic sobre **exportar** → **Cerrar**.
- En la pantalla de clasificación seleccionar **clasificación** (se abre una nueva venta) → Seleccionar tipo de clasificador, seleccionar **Bhattacharya** → Umbral de aceptación **de 95%** → **Analizar muestras** → poner categoría y nombre → clic sobre **Clasificar**. Automáticamente se despliega la clasificación.

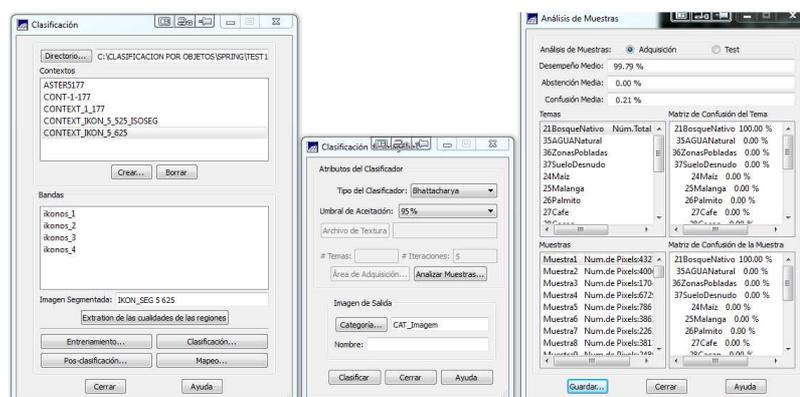


Figura III.14. Programa Spring, clasificación supervisada mediante el algoritmo de Bhattacharya

3.7.4.5 CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA POR MÉTODO DE OBJETOS, ALGORITMO ISOSEG PARA LA IMAGEN IKONOS.

Previamente se desplegó y segmentó la imagen Ikonos, se procede de la siguiente manera:

- *Desplegar la imagen Ikonos Georreferenciada, Menu → **Clasificación**.*
- *En la pantalla de clasificación crear un **contexto** → activar la casilla por **Regiones** → seleccionar las 4 bandas → en imágenes segmentadas, seleccionar la imagen segmentada que corresponda, en este caso "CONTEX_IKON-5-625_" y dar clic en ejecutar .*
- *En la pantalla de clasificación seleccionar el contexto creado anteriormente → dar clic en **Extracción de las cualidades de las regiones** → después de este proceder a aplicar un clic sobre **clasificar** → seleccionar tipo de clasificador **ISOSEG**, Umbral de aceptación **de 75%** (debido a que con un valor de umbral menor se obtiene un mayor número de clases), **10 en el número de iteraciones** (ya que un valor cercano a 1 generaliza las clases, reduciendo las de menor área) y el **nombre** → **Clasificar**.*

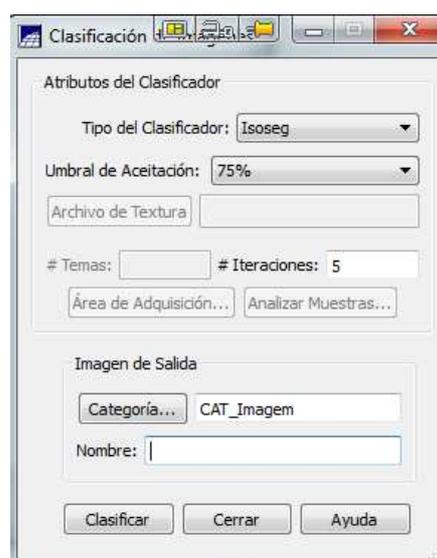


Figura III.15. Programa Spring, clasificación No supervisada mediante el algoritmo de Isoseg.

3.7.4.6 CLASIFICACIÓN SUPERVISADA POR MÉTODO DE OBJETOS, ALGORITMOS DE BHATTACHARYA PARA LA IMAGEN ASTER.

Una vez segmentada la imagen Aster, se despliega la misma y se continua con el siguiente procedimiento:

- *Seleccionar la Imagen Aster Georreferenciada → clic en Clasificación.*
- *En la pantalla de clasificación crear un **contexto** → poner un nombre "CONTEX_ ASTER-1-177", activar la casilla por **Regiones** → seleccionar las 3 bandas → y dar clic en **ejecutar**.*

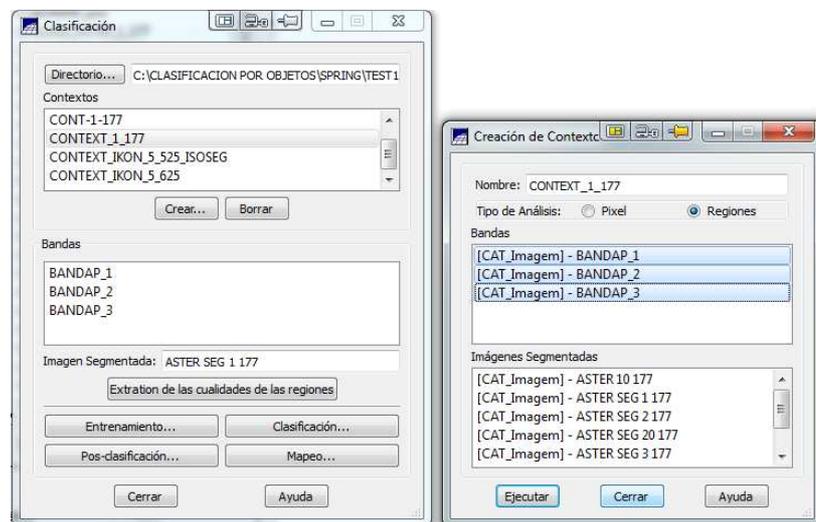


Figura III.16. Programa Spring, creación de contexto.

- *En la pantalla de clasificación seleccionar el contexto creado anteriormente → dar clic en **Extracción de las cualidades de las regiones** → después de este proceso dar un clic sobre **Entrenamiento** (donde se adquiere las muestras de los niveles temáticos) → dar clic en **aceptar**.*
- *En la pantalla Entrenamiento establecer el **nombre** de las clases de acuerdo a la leyenda temática pre establecida → seleccionar: el **color**; en **Modo: Normal**; activar **Exhibe todas**; en Tipo: **Adquisición** y en Contorno: **Región** → buscar la clase que*

corresponda en la imagen satelital Aster y dar clic sobre ella (se seleccionará la región que contenga dicha clase) y en la ventana de entrenamiento aplicar un clic sobre Adquirir. Este paso se repite por varias ocasiones hasta completar toda la leyenda temática.

- En la pantalla Entrenamiento aplicar Guardar → Cerrar.
- También se puede exportar los temas a una **Categoría** para visibilizarlos luego → ubicar nombre pí: dar clic sobre **Exportar** → **Cerrar**.
- En la pantalla de clasificación seleccionamos **clasificación** (se abre una nueva venta) → Seleccionar tipo de clasificador: **Bhattacharya** → Umbral de aceptación **de 95%** → **Analizar muestras** → poner categoría y nombre → clic sobre **Clasificar**. Automáticamente se despliega la clasificación.

3.7.5 CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA POR MÉTODO DE OBJETOS, ISOSEG PARA LA IMAGEN ASTER.

Proceder de la siguiente manera:

- Desplegar la imagen Aster Georreferenciada. Ir a **Menu** → **Clasificación**.
- En la pantalla de clasificación seleccionar un **contexto** → en este caso "CONTEX_ASTER-1-177" → dar clic en **Extracción de las cualidades de las regiones** → clic sobre **clasificar** → seleccionar tipo de clasificador: ISOSEG, Umbral de aceptación **de 75%** (debido a que con un valor de umbral menor se obtiene un mayor número de clases), **10 en el número de iteraciones** (ya que un valor cercano a 1 generaliza las clases, reduciendo las de menor área) y el **nombre** → **Clasificar**.

3.7.6 RECOLECCIÓN DE PUNTOS GPS PARA LA VALIDACIÓN DE LA IMAGEN IKONOS Y ASTER

Previa planificación en gabinete, para la recolección de los puntos GPS de validación, se realizó una salida de campo independiente al área de estudio. Los puntos fueron recolectados con un equipo Trimble Juno, en un intervalo de 10 minutos por punto y se utilizó la misma leyenda temática de uso y cobertura del suelo. Se realizó el post proceso mediante el programa Pathfinder Office de Trimble V 4.0, con datos de la estación Base AUCA. Ver el mapa de distribución de puntos de validación en el ANEXO 11 y la respectiva tabla en el capítulo 4.7.

3.7.7 MATRIZ DE CONFUSIÓN PARA LA EVALUACIÓN DE LAS CLASIFICACIONES

Para establecer las matrices de confusión se construyó una hoja electrónica en el programa Excel, ingresando las fórmulas de los indicadores de: fiabilidad total, error de muestreo, intervalo de confianza e índice kappa. En interacción con el programa Arcgis 10, se extrajeron los datos de las diferentes clasificaciones obtenidas con los puntos de validación, como se puede observar en la siguiente figura.

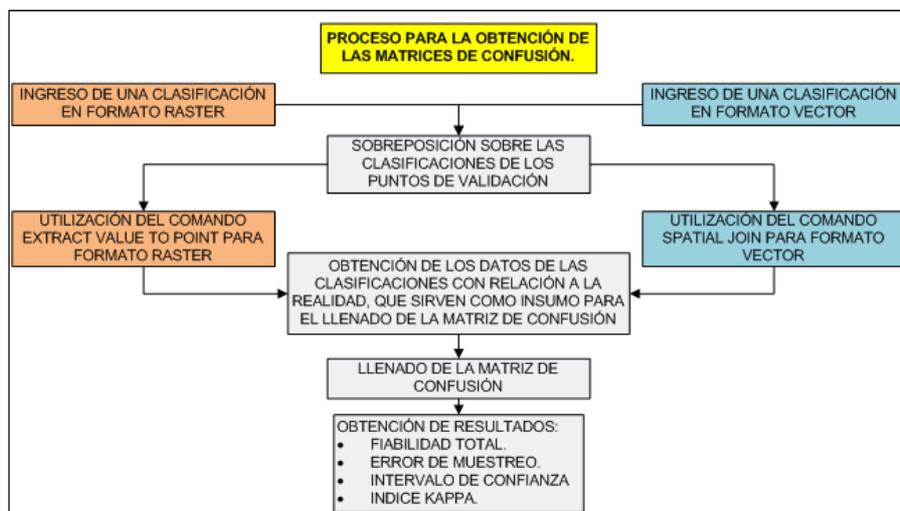


Figura III.17.- Proceso para la obtención de la Matriz de Confusión.

3.7.7.1 EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN DE LOS PUNTOS DE VALIDACIÓN PARA LAS MATRICES DE CONFUSIÓN

Para obtener la información de los puntos de validación con respecto a cada clasificación, se utilizó el programa Arcgis 10, mediante los comandos "extract values to points" para formatos raster y "Spatial join" para formatos vector (polígonos); se sobreponen los puntos de validación sobre la clasificación y se obtienen los datos de las diferentes coberturas clasificadas con relación a la realidad (campo).

Estos puntos de validación con la información de cada clasificación, sirven como insumo para llenar las matrices de confusión para cada una de las ocho clasificaciones. En la siguiente figura se puede observar el proceso para extraer la información de dichos puntos .

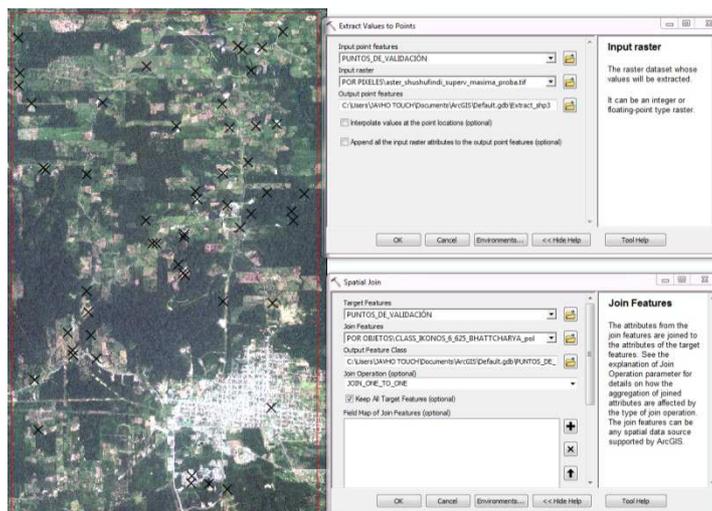


Figura III.18. Extracción de los valores de la clasificación para puntos de validación.

3.7.7.2 INGRESO DE DATOS DE LOS PARÁMETROS PARA LA EVALUACIÓN DE LAS MATRICES DE CONFUSIÓN

Para poder ingresar los datos en la matriz de confusión, se utilizó la tabla resultante de los puntos de validación provenientes del anterior procedimiento.

como se observa en la anterior figura:

- En (a), existen 17 puntos para la cobertura Bosque Nativo, pero debido a que 1 de estos puntos se encuentran en áreas sin cobertura (sin información por la máscara de nubes), este no se consideró para el ingreso en la matriz, quedando un total de 16 muestras, como se puede observar en (a1).
- En (b), existen 54 puntos de validación, pero debido a que en la imagen Aster, 5 de estos puntos se encuentran en áreas sin cobertura, se procedió excluirlos de la matriz, quedando un total de 49, como se puede observar en (b1).
- Para llenar las columnas, se compara los datos de la realidad (c), con los datos obtenidos de la clasificación (c1). Por ejemplo para llenar la columna Bosque Nativo, en (d) se encuentran 11 datos que coinciden (campo versus clasificación) que están bien asignados. En (e) se tiene 5 datos que no coinciden entre Bosque Nativo con Vegetación Arbustiva; en el resto de coberturas no existen datos. Este proceso se realiza para las demás columnas.

Continuando con la descripción se desarrollan las fórmulas de los indicadores para el mismo ejemplo.

- Para calcular la Fiabilidad Total, se aplica la [Ec. II.31].

$$\hat{F} = \frac{\sum_{i=1, n} n^{X_{ii}}}{\sum_{i=1, n} \sum_{j=1, n} n^{X_{ij}}}$$

n = Número total de observaciones de la matriz = 49

n_{ii} = Número de observaciones en la línea i y columna i en la diagonal principal. = sumatoria de coincidencias en la diagonal = 26 (*Clases bien estimadas*).

Reemplazando en la ecuación:

$$\hat{F} = \frac{26 \times 100}{49} = 53.06\%$$

- Para calcular el Error de Muestreo (n_o) se aplica la [Ec. II.32]:

$$n_o = \sqrt{\frac{\hat{F} \times (100 - \hat{F})}{l}}$$

En donde:

l = Número de coberturas de la matriz de confusión = 12

\hat{F} = Fiabilidad Total = 53.06 %

$$n_o = 7.12$$

- Para calcular del Intervalo de Confianza (μ) se aplica la [Ec. II.33] :

$$\mu = \hat{F} \pm (Z \times n_o)$$

En donde:

\hat{F} = Fiabilidad Total = 53.06.

Z = Es el nivel de confianza. Aplicando al 95% de nivel de confianza, el mismo es 1.96.

n_o = Error de muestreo = 7.12

Intervalo de Confianza = $39.08 \leq \mu \leq 67.03$

- Para calcular el índice Kappa (\hat{k}), se aplica la [Ec. II.34]:

$$\hat{k} = \frac{n \sum_{i=1}^l n_{ii} - \sum_{i=1}^l (n_{i+} n_{+j})}{n^2 - \sum_{i=1}^l (n_{i+} n_{+j})}$$

En donde:

l = Número de coberturas de la matriz de confusión = 12.

n = Número total de observaciones de la matriz = 49.

n_{ii} = Número de observaciones en la línea i y columna i en la diagonal principal = 26.

Para calcular las sumatorias de las filas y columnas de las diferentes coberturas se aplicaron las siguientes ecuaciones:

$$(a) n_{i+} = \sum_{j=1}^l n_{ij}$$

$$(b) n_{+j} = \sum_{i=1}^l n_{ij}$$

En donde:

n_{i+} = Es la sumatoria de los valores de una categoría en una fila. Por ejemplo para la cobertura Bosque Nativo = 11

n_{+j} = Es la sumatoria de los valores de una categoría en una columna. Por ejemplo para la cobertura Bosque Nativo = 16.

Para poder calcular la siguiente expresión del denominador de la ecuación de kappa se procede de la siguiente forma:

En la figura anterior en (g), se obtiene de la sumatoria de las multiplicaciones de $n_{i+} \times n_{+j}$, para todas las coberturas, que se obtiene de la ecuación $\sum_{i=1}^l (n_{i+} n_{+j}) = 265$. Si se observa en la figura anterior en (f), para la cobertura Bosque Nativo, $n_{i+} \times n_{+j} = 11 \times 16$ que es 176, lo mismo se hace para las demás coberturas.

Reemplazando en el Índice kappa:

$$\hat{k} = \frac{((49 \times 26) - 265)}{49^2 - 265} = 0.47$$

Se procede de esta misma manera para los ocho métodos estudiados. Luego de esto se comparan los valores de \hat{k} obtenidos con los intervalos dados por Landis y Kock (1977).

VALOR DE KAPPA	CALIDAD
≤ 0.00	Pésima
0.00 – 0.20	Mala
0.20 – 0.40	Razonable
0.40 – 0.60	Buena
0.60 – 0.80	Muy buena
0.80 – 1.00	Excelente

Para el presente ejemplo se obtiene que para el método Supervisado por píxeles del algoritmo de Máxima Probabilidad de la imagen Aster, $\hat{k} = 0.47$, que corresponde a una calidad Buena. (ver resultados en el capítulo 4.8, en la Tabla IV.15).

CAPÍTULO IV. RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

4.1 GEORREFERENCIACIÓN Y CONTROL POSICIONAL

4.1.1 PUNTOS GPS POST PROCESADOS.

Se procesó los datos de acuerdo al procedimiento indicado en el capítulo 3.4.2, los resultados del post – proceso se observan en la Tabla IV.1 donde se encuentran las coordenadas y precisión horizontal para los puntos de georreferenciación y en la Tabla IV.2 se encuentran las coordenadas y precisión horizontal para los puntos de control posicional. A continuación se presentan dichas tablas y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla IV.1. Puntos para la Georreferenciación.

CODIGO	PRECISIÓN HORIZONTAL	NORTE (m)	ESTE (m)	OBSERVACIONES
PG002	2.100	9986446.643	317394.397	
PG003	2.300	9986220.645	316104.450	
PG006	2.400	9985317.090	312338.426	
PG007	2.200	9985272.952	313929.067	No utilizado, porque el punto no está bien definido en la imagen Ikonos
PG008	2.200	9984015.895	313665.636	
PG009	2.100	9983994.647	312069.643	
PG010	1.800	9985269.271	316462.506	
PG012	2.100	9984823.953	317425.654	
PG014	2.000	9983667.498	316783.271	
PG018	2.300	9982891.007	315894.463	
PG020	2.400	9982294.511	316738.819	
PG021	2.200	9981761.416	317247.214	
PG022	2.100	9980656.976	317350.550	
PG025	1.700	9979472.448	317762.200	
PG028	2.300	9977928.214	317781.273	

PG031	2.100	9980707.096	313442.450	
PG033	2.300	9977533.544	312923.333	
PG034	2.300	9977886.103	314446.082	
PG037	2.200	9979522.505	315055.244	
PG038	1.800	9978321.417	315415.920	
PG042	1.800	9977760.299	316381.432	
<p>CÓDIGO: Identificador de los puntos de observación tomados en campo. PRECISIÓN HORIZONTAL: Indica la incertidumbre con la cual fueron determinadas las coordenadas en el plano horizontal. NORTE: Indica la coordenada en Norte en metros (proyección UTM, zona 18 sur, Datum WGS 84). ESTE: Indica la coordenada en Este en metros (proyección UTM, zona 18 sur, Datum WGS 84). OBSERVACIÓN: Es una nota aclaratoria.</p>				

Para los puntos de georreferenciación, se puede observar que la precisión horizontal es menor a 2,50 m, que es el valor umbral de la precisión GPS requerida.

Tabla IV.2. Puntos de Control Posicional.

CODIGO	PRECISIÓN HORIZONTAL	NORTE (m)	ESTE (m)
PG001	1.200	9986407.512	316686.030
PG004	1.900	9986755.819	315283.948
PG005	1.900	9986765.870	312329.174
PG011	1.200	9984598.057	316746.061
PG013	1.200	9984050.563	316779.557
PG015	1.200	9983266.125	316748.789
PG016	1.400	9982997.012	316711.736
PG017	1.500	9982980.963	316369.847
PG019	1.700	9982783.499	316725.368
PG023	1.400	9979924.480	317566.654
PG024	1.100	9979609.574	317761.823
PG026	1.200	9979194.008	317268.012
PG027	1.300	9978537.650	317524.131
PG029	1.900	9978083.612	317394.285
PG030	1.400	9980228.447	313427.532
PG032	1.300	9981966.768	314511.990
PG036	1.300	9978261.864	314869.467
PG040	1.500	9977103.315	315585.777
PG041	1.300	9977368.225	316348.104
PG044	1.800	9981330.655	315363.677
<p>CÓDIGO: Identificador de los puntos de observación tomados en campo. PRECISIÓN HORIZONTAL: Indica la incertidumbre con la cual fueron determinadas las coordenadas en el plano horizontal. NORTE: Indica la coordenada en Norte en metros (proyección UTM, zona 18 sur, Datum WGS 84). ESTE: Indica la coordenada en Este en metros (proyección UTM, zona 18 sur, Datum WGS 84).</p>			

Para los puntos de control posicional, se puede observar que la precisión horizontal es menor a 2,50 m, que es el valor umbral de la precisión GPS requerida.

4.2 GEORREFERENCIACIÓN DE LA IMAGEN IKONOS

En la georreferenciación de la imagen Ikonos, se puede observar que el ECM, no sobrepasa el valor de un píxel, como lo sugiere Chuvieco (2007).

Tabla IV.3. Tabla de puntos utilizados para Georreferenciación de la imagen Ikonos con su respectivo Error cuadrático medio.

CODIGO	ESTE IMAGEN ORIGINAL	NORTE IMAGEN ORIGINAL	ESTE PUNTO DE CONTROL	NORTE PUNTO DE CONTROL	ECM (m)
PG006	312343.143	9985311.294	312338.426	9985317.090	0.622
PG009	312073.491	9983985.990	312069.643	9983994.647	0.474
PG008	313673.469	9984010.426	313665.636	9984015.895	0.605
PG045	315529.051	9984759.693	315522.357	9984765.178	1.398
PG003	316112.146	9986219.301	316104.450	9986220.645	3.049
PG002	317399.836	9986437.730	317394.397	9986446.643	1.959
PG010	316467.274	9985259.499	316462.506	9985269.271	4.218
PG012	317426.579	9984815.264	317425.654	9984823.953	3.842
PG014	316791.363	9983661.674	316783.271	9983667.498	2.168
PG018	315903.441	9982885.584	315894.463	9982891.007	1.380
PG020	316747.901	9982288.094	316738.819	9982294.511	2.044
PG021	317255.521	9981750.896	317247.214	9981761.416	1.775
PG022	317358.686	9980647.338	317350.550	9980656.976	0.567
PG025	317771.078	9979464.319	317762.200	9979472.448	1.428
PG028	317790.513	9977919.539	317781.273	9977928.214	0.263
PG042	316391.417	9977751.776	316381.432	9977760.299	0.771
PG038	315423.422	9978311.632	315415.920	9978321.417	2.608

PG001 CP	316684.978	9986403.254	316686.030	9986407.512	-1.052	-4.258	4.386	SI
PG004 CP	315286.571	9986751.605	315283.948	9986755.819	2.623	-4.214	4.964	SI
PG005 CP	312328.953	9986762.152	312329.174	9986765.870	-0.221	-3.718	3.725	SI
PG011 CP	316749.495	9984598.594	316746.061	9984598.057	3.434	0.537	3.476	SI
PG013 CP	316782.620	9984048.977	316779.557	9984050.563	3.063	-1.586	3.449	SI
PG015 CP	316750.845	9983268.659	316748.789	9983266.125	2.056	2.534	3.263	SI
PG016 CP	316710.320	9982999.849	316711.736	9982997.012	-1.416	2.837	3.171	SI
PG017 CP	316369.326	9982983.828	316369.847	9982980.963	-0.521	2.865	2.912	SI
PG019 CP	316724.692	9982785.416	316725.368	9982783.499	-0.676	1.917	2.033	SI
PG023 CP	317565.593	9979923.472	317566.654	9979924.480	-1.061	-1.008	1.463	SI
PG024 CP	317761.620	9979607.447	317761.823	9979609.574	-0.203	-2.127	2.137	SI
PG026 CP	317266.829	9979194.905	317268.012	9979194.008	-1.183	0.897	1.485	SI
PG027 CP	317522.856	9978536.734	317524.131	9978537.650	-1.275	-0.916	1.570	SI
PG029 CP	317392.479	9978082.793	317394.285	9978083.612	-1.806	-0.819	1.982	SI
PG030 CP	313429.384	9980231.701	313427.532	9980228.447	1.852	3.254	3.744	SI
PG032 CP	314510.762	9981964.859	314511.990	9981966.768	-1.228	-1.909	2.270	SI
PG036 CP	314869.309	9978260.474	314869.467	9978261.864	-0.158	-1.390	1.399	SI
PG040 CP	315584.284	9977101.693	315585.777	9977103.315	-1.493	-1.622	2.204	SI
PG041 CP	316348.024	9977365.634	316348.104	9977368.225	-0.080	-2.591	2.593	SI
PG044 CP	315362.869	9981333.210	315363.677	9981330.655	-0.808	2.555	2.680	SI
Número total de puntos							20	
Puntos aceptados dentro del test							20	
Puntos rechazados dentro del test							0	
Porcentaje de puntos que cumplen la norma (7.5 m) para escala 1:25.000.							100%	
Cumple la norma							SI	
CÓDIGO: Identificador de los puntos de observación tomados en campo. ESTE (PUNTOS DE GABINETE SOBRE LA IMAGEN): Coordenada en Este sobre la imagen Ikonos georreferenciada. NORTE (PUNTOS DE GABINETE SOBRE LA IMAGEN): Coordenada en Norte sobre la imagen Ikonos georreferenciada. ESTE (PUNTOS GPS DE CAMPO): Coordenada en Este del punto GPS tomado en campo. NORTE (PUNTOS GPS DE CAMPO): Coordenada en Norte del punto GPS tomado en campo. Δ ESTE: Diferencia de la posición al Este, entre la imagen georreferenciada y los puntos de control GPS. Δ NORTE: Diferencia de la posición al Norte, entre la imagen georreferenciada y los puntos de control GPS. VECTOR: Es la raíz cuadrada de la suma de Δ ESTE con Δ NORTE, expresado en metros.								

4.2.2 NIVEL DE CONFIANZA DEL CONTROL POSICIONAL DE LA IMAGEN IKONOS.

Siguiendo la indicación de Kirby (2007), para calcular el nivel de confianza de una muestra, se utilizó la siguiente ecuación:

$$n = \frac{\delta^2 t^{\alpha/2}}{\tau^2}$$

En donde:

n = tamaño de la muestra = 20. Es decir tiene 19 grados de libertad.

δ = la desviación estándar = 1.013.

$t^{\alpha/2}$ = es el valor que representa el área bajo la curva de la t de student y que sirve para el cálculo del nivel de confianza.

τ = es el error permitido o tolerado en el proceso = +/-7.5 m de tolerancia para escala 1:25.000.

Para calcular el nivel de confianza se despejo la ecuación y se calculó.

$$t^{\alpha/2} = \frac{\tau^2 n}{\delta^2}$$

$$t^{\alpha/2} = \sqrt{\frac{\tau^2 n}{\delta^2}}$$

$$t^{\alpha/2} = \sqrt{\frac{7.5^2 \times 20}{1.013^2}}$$

$$t^{\alpha/2} = 33.099$$

Comparando con el valor de la tabla T de student, para 19 grados de libertad se obtiene que $3.883 \leq 33.099$ por lo tanto se obtiene un nivel de confianza del 99.9995%.

4.3 GEORREFERENCIACIÓN DE LA IMAGEN ASTER

En la georreferenciación de la imagen Aster, se puede observar que el ECM, no sobrepasa el valor de un píxel, como lo sugiere Chuvieco (2007).

Tabla IV.5. Puntos utilizados para Georreferenciación de la imagen Aster con su respectivo Error cuadrático medio.

CÓDIGO	ESTE IMAGEN ORIGINAL ASTER	NORTE IMAGEN ORIGINAL ASTER	ESTE IMAGEN IKONOS G	NORTE IMAGEN IKONOS G	ECM (m)
PG001	317123.670	9985872.620	317141.488	9985853.305	8.854
PG002	312529.670	9986348.893	312564.614	9986345.487	10.992
PG003	315455.476	9977575.156	315465.253	9977573.444	4.975
PG004	313671.928	9980381.981	313696.265	9980384.416	5.575
PG005	316280.731	9980898.316	316297.954	9980878.690	15.220
PG006	312324.654	9984751.512	312342.362	9984745.738	12.217

PG007	317756.696	9984305.888	317779.468	9984306.975	7.360
PG008	314805.963	9983781.716	314837.623	9983772.859	10.255
PG009	314618.658	9985978.323	314631.572	9985966.666	10.925
PG010	315576.707	9984546.074	315604.800	9984537.428	6.596
PG011	317390.889	9978086.360	317395.854	9978080.471	6.189
PG012	316343.917	9986397.808	316374.259	9986383.099	6.858
PG013	318298.821	9981524.173	318314.358	9981526.006	3.582
PG014	313871.965	9978152.381	313884.042	9978147.649	5.703
PG015	312428.142	9981639.084	312454.795	9981646.810	4.159
PG016	315843.856	9981942.444	315854.580	9981935.677	7.156
PG017	317520.449	9982794.810	317543.473	9982790.735	6.840
PG018	313076.334	9978236.873	313098.738	9978240.923	4.512
PG019	315520.254	9978822.510	315529.512	9978811.616	7.597
PG020	317442.445	9986910.398	317464.993	9986900.699	4.418
PG021	318138.956	9984853.330	318149.123	9984846.428	9.405
PG022	314060.910	9983631.366	314084.515	9983627.709	1.810
PG023	313226.338	9979344.441	313246.144	9979330.391	14.830
PG024	313991.880	9982374.114	314006.014	9982368.980	7.332
PG025	316285.172	9983289.236	316309.656	9983283.529	5.657
PG026	313491.534	9985264.960	313518.623	9985256.433	5.146
PG027	315916.346	9980196.122	315933.738	9980194.508	3.819
PG028	315369.242	9981146.065	315386.710	9981139.447	1.346
PG029	313706.568	9987029.642	313736.544	9987019.872	5.171
PG030	313636.697	9983408.496	313650.341	9983420.284	16.722
PG031	314356.219	9979385.983	314374.500	9979393.500	11.111
PG032	312918.131	9977530.736	312938.500	9977534.500	3.353
PG033	312072.262	9983610.822	312085.500	9983629.500	14.802
PG034	313275.415	9982515.176	313301.500	9982510.500	6.358
PG035	315999.913	9987178.922	316018.500	9987166.500	7.701
PG036	312349.732	9977390.884	312376.063	9977385.097	11.176

PG037	317190.435	9977610.563	317198.551	9977620.697	11.586
PG038	314651.423	9984291.061	314673.691	9984284.948	1.696
PG039	312034.552	9979463.762	312056.135	9979481.050	8.488
PG040	313811.914	9981795.058	313829.981	9981792.039	3.057
				ECM TOTAL	8.434
<p>CÓDIGO: Identificador de los puntos de observación tomados de la imagen Aster Original. ESTE IMAGEN ORIGINAL ASTER: Indica la coordenada en Este de la imagen Aster sin georreferenciación. NORTE IMAGEN ORIGINAL ASTER: Indica la coordenada en Norte de la imagen Aster sin georreferenciación. ESTE IMAGEN IKONOS G: Indica la coordenada en Este del punto de control tomado de la imagen Ikonos georreferenciada (proyección UTM, zona 18 sur, Datum WGS 84). NORTE IMAGEN IKONOS G: Indica la coordenada en Norte del punto de control tomado de la imagen Ikonos georreferenciada (proyección UTM, zona 18 sur, Datum WGS 84). ECM: Error Cuadrático Medio expresado en metros.</p>					

Se obtuvo como resultados que el ECM para la imagen Aster es de 8.434 m, menor al tamaño del píxel.

4.3.1 EVALUACIÓN POSICIONAL DE LA IMAGEN ASTER.

Al aplicar el test NMAS, se puede observar que los puntos tomados en gabinete para el control posicional y contrastados con la imagen Ikonos georreferenciada no sobrepasa el 10% máximo admisible indicada por Ruano (2008). Teniendo así un resultado positivo en el control posicional de la imagen Aster.

Tabla IV.6. Puntos utilizados para control posicional de la imagen Aster empleando el Test NMAS.

CÓDIGO	PUNTOS DE GABINETE SOBRE LA IMAGEN ASTER		PUNTOS DE GABINETE SOBRE LA IMAGEN IKONOS		Δ ESTE	Δ NORTE	VALOR MÁXIMO PERMITIDO 15 (m) VECTOR	CUMPLEN CON LA NORMA
	ESTE	NORTE	ESTE	NORTE				
PG001 CP	312610.781	9984035.992	312609.348	9984028.942	1.433	7.050	7.194	SI
PG002 CP	314509.634	9985822.544	314518.576	9985825.026	-8.942	-2.482	9.279	SI
PG003 CP	315281.560	9986746.430	315285.673	9986746.301	-4.114	0.129	4.116	SI
PG004 CP	316273.857	9986782.961	316275.912	9986776.036	-2.054	6.925	7.223	SI

PG005 CP	317082.492	9985987.896	317085.558	9985981.985	-3.066	5.911	6.659	SI
PG006 CP	317127.489	9978219.185	317127.716	9978216.181	-0.226	3.004	3.013	SI
PG007 CP	316461.382	9985266.761	316461.295	9985260.932	0.088	5.829	5.829	SI
PG008 CP	316707.756	9983009.055	316703.694	9983006.281	4.062	2.774	4.919	SI
PG009 CP	316704.487	9982335.112	316702.240	9982335.234	2.247	-0.121	2.251	SI
PG010 CP	316473.924	9981877.502	316471.134	9981872.916	2.790	4.586	5.368	SI
PG011 CP	316441.222	9980946.392	316432.702	9980947.414	8.521	-1.021	8.582	SI
PG012 CP	312903.147	9977567.884	312905.073	9977564.015	-1.926	3.869	4.322	SI
PG013 CP	317515.482	9978549.052	317517.980	9978538.046	-2.497	11.006	11.285	SI
PG014 CP	317777.800	9977937.980	317778.208	9977928.994	-0.408	8.987	8.996	SI
PG015 CP	313428.577	9980743.771	313434.973	9980723.306	-6.396	20.466	21.442	NO
PG016 CP	313384.643	9980235.883	313393.482	9980226.004	-8.839	9.879	13.256	SI
PG017 CP	314449.374	9977908.792	314456.753	9977902.467	-7.380	6.325	9.720	SI
PG018 CP	312334.477	9986669.370	312333.231	9986670.639	1.246	-1.268	1.778	SI
PG019 CP	312453.476	9981644.339	312454.112	9981643.913	-0.636	0.426	0.765	SI
PG020 CP	312709.919	9979122.155	312707.282	9979130.848	2.637	-8.693	9.084	SI
PG021 CP	316728.528	9982774.993	316720.189	9982768.232	8.339	6.761	10.736	SI
Número total de puntos							21	
Puntos aceptados dentro del test							20	
Puntos rechazados dentro del test							1	
Porcentaje de puntos que cumplen la norma (15m) para escala 1:50.000.							95.2%	
Cumple la norma							SI	
CÓDIGO: Identificador de los puntos de observación en la imagen Aster.								
ESTE (PUNTOS DE GABINETE SOBRE LA IMAGEN ASTER): Coordenada en Este sobre la imagen Aster georreferenciada.								
NORTE (PUNTOS DE GABINETE SOBRE LA IMAGEN ASTER): Coordenada en Norte sobre la imagen Aster georreferenciada.								
ESTE (PUNTOS DE GABINETE SOBRE LA IMAGEN IKONOS): Coordenada en Este sobre la imagen Ikonos georreferenciada.								
NORTE (PUNTOS DE GABINETE SOBRE LA IMAGEN IKONOS): Coordenada en Norte sobre la imagen Ikonos georreferenciada.								
Δ ESTE: Diferencia de la posición en Este, entre la imagen Aster georreferenciada, con respecto a la imagen Ikonos georreferenciada.								
Δ NORTE: Diferencia de la posición en Norte, entre la imagen Aster georreferenciada, con respecto a la imagen Ikonos georreferenciada.								
VECTOR: Es la raíz cuadrada de la suma de Δ ESTE con Δ NORTE, expresada en metros.								

4.3.2 NIVEL DE CONFIANZA DEL CONTROL POSICIONAL PARA LA IMAGEN ASTER.

Siguiendo la indicación de Kirby (2007), para calcular el nivel de confianza de una muestra, se utilizó la siguiente ecuación:

$$n = \frac{\delta^2 t^{\alpha/2^2}}{\tau^2}$$

n = tamaño de la muestra = 21. Es decir tiene 20 grados de libertad.

δ = la desviación estándar = 4.628.

$t^{\alpha/2}$ = es el valor que representa el área bajo la curva de la t de student y que sirve para el cálculo del nivel de confianza.

τ = es el error permitido o tolerado en el proceso = +/-15 m de tolerancia para escala 1:50.000.

Para calcular el nivel de confianza se despejo la ecuación y se calculó.

$$t^{\alpha/2^2} = \frac{\tau^2 n}{\delta^2}$$

$$t^{\alpha/2} = \sqrt{\frac{\tau^2 n}{\delta^2}}$$

$$t^{\alpha/2} = \sqrt{\frac{15^2 \times 21}{4.628^2}}$$

$$t^{\alpha/2} = 14.85222$$

Comparando con el valor de la tabla T de student, para 20 grados de libertad se obtiene que $3.850 \leq 14.8522$ por lo tanto se obtiene un nivel de confianza del 99.9995%.

4.4 PUNTOS DE CALIBRACIÓN.

En la siguiente tabla se puede consultar los 51 puntos de calibración (observación).

Tabla IV.7. Puntos de calibración (observación).

CÓDIGO	NIVEL I	NIVEL II	NIVEL III	ESTE (m)	NORTE (m)
PC001	ZONAS ANTRÓPICAS	INFRAESTRUCTURA	MATERIAL DE LASTRE	9986404.027	316695.734
PC002	ZONAS ANTRÓPICAS	INFRAESTRUCTURA	MATERIAL DE LASTRE	9986756.800	315340.704
PC003	ZONAS ANTRÓPICAS	INFRAESTRUCTURA	MATERIAL DE LASTRE	9985287.321	313919.705
PC004	ZONAS	INFRAESTRUCTURA	MATERIAL DE	9985271.403	316469.293

	ANTRÓPICAS		ASFALTO		
PC005	ZONAS ANTRÓPICAS	INFRAESTRUCTURA	MATERIAL DE LASTRE	9984862.226	317460.263
PC006	ZONAS ANTRÓPICAS	INFRAESTRUCTURA	MATERIAL DE LASTRE	9982983.660	316378.151
PC007	CUERPOS DE AGUA	CUERPOS DE AGUA NATURAL	CUERPOS DE AGUA NATURAL	9986356.123	316328.253
PC008	CUERPOS DE AGUA	CUERPOS DE AGUA NATURAL	CUERPOS DE AGUA NATURAL	9985736.279	317660.219
PC009	CUERPOS DE AGUA	CUERPOS DE AGUA NATURAL	CUERPOS DE AGUA NATURAL	9984889.002	318071.274
PC010	ZONAS ANTRÓPICAS	INFRAESTRUCTURA	MATERIAL DE ASFALTO	9980228.516	313435.279
PC011	ZONAS ANTRÓPICAS	INFRAESTRUCTURA	MATERIAL DE LASTRE	9977538.253	312877.116
PC012	ZONAS ANTRÓPICAS	SUELO DESNUDO	SUELO DESNUDO	9981065.595	313683.751
PC013	ZONAS ANTRÓPICAS	SUELO DESNUDO	SUELO DESNUDO	9981315.952	313722.367
PC014	ZONAS ANTRÓPICAS	INFRAESTRUCTURA	INFRAESTRUCTURA METÁLICA	9983117.337	316620.361
PC015	ZONAS ANTRÓPICAS	INFRAESTRUCTURA	INFRAESTRUCTURA METÁLICA	9983176.122	316670.680
PC016	ÁREAS AGROPECUARIAS	CULTIVOS PERMANENTES	FRUTALES	9982736.457	315693.178
PC017	ÁREAS AGROPECUARIAS	CULTIVOS PERMANENTES	FRUTALES	9982650.241	315709.344
PC018	ÁREAS AGROPECUARIAS	CULTIVOS PERMANENTES	PALMA AFRICANA	9986472.994	316699.107
PC019	ÁREAS AGROPECUARIAS	PISCÍCOLAS	PISCÍCOLAS	9984825.164	315481.603
PC020	ZONAS ANTRÓPICAS	ZONAS POBLADAS	ZONAS POBLADAS	9979194.857	317268.621
PC021	ZONAS ANTRÓPICAS	INFRAESTRUCTURA	MATERIAL DE LASTRE	9986400.565	316366.888
PC022	ÁREAS AGROPECUARIAS	PASTO CULTIVADOS	PASTO CULTIVADOS	9986906.814	312615.114
PC023	ÁREAS AGROPECUARIAS	PASTO CULTIVADOS	PASTO CULTIVADOS	9986592.771	316704.480
PC024	ÁREAS AGROPECUARIAS	CULTIVOS PERMANENTES	PALMA AFRICANA	9986919.344	316730.917
PC025	ÁREAS AGROPECUARIAS	PASTO CULTIVADOS	PASTO CULTIVADOS	9986321.221	317697.048
PC026	ÁREAS AGROPECUARIAS	PASTO CULTIVADOS	PASTO CULTIVADOS	9986132.829	317851.104
PC027	ZONAS ANTRÓPICAS	INFRAESTRUCTURA	MATERIAL DE LASTRE	9986309.167	317049.094
PC028	ÁREAS AGROPECUARIAS	CULTIVOS PERMANENTES	PALMA AFRICANA	9986545.198	316147.614
PC029	ÁREAS AGROPECUARIAS	CULTIVOS ANUALES	PALMITO	9985168.994	316381.412
PC031	ÁREAS AGROPECUARIAS	PASTO CULTIVADOS	PASTO CULTIVADOS	9985007.043	316540.213
PC032	CUERPOS DE AGUA	HERBAZALES INUNDABLES	HERBAZALES INUNDABLES	9984820.313	316696.735
PC034	VEGETACIÓN ARBUSTIVA Y HERBÁCEA	VEGETACIÓN ARBUSTIVA	VEGETACIÓN ARBUSTIVA	9983338.578	316723.298
PC036	ÁREAS AGROPECUARIAS	PASTO CULTIVADOS	PASTO CULTIVADOS	9982971.416	315464.224
PC037	CUERPOS DE AGUA	HERBAZALES INUNDABLES	HERBAZALES INUNDABLES	9982602.182	315079.180

PC038	ÁREAS AGROPECUARIAS	CULTIVOS PERMANENTES	CAFÉ	9982474.623	315081.761
PC040	ÁREAS AGROPECUARIAS	CULTIVOS PERMANENTES	PALMA AFRICANA	9984354.100	313820.070
PC043	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	BOSQUE NATIVO	9980882.657	313872.185
PC044	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	BOSQUE NATIVO	9978611.824	312839.172
PC045	ÁREAS AGROPECUARIAS	CULTIVOS PERMANENTES	CACAO	9978674.447	312829.455
PC046	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	BOSQUE NATIVO	9978576.326	312841.341
PC047	ÁREAS AGROPECUARIAS	CULTIVOS PERMANENTES	PALMA AFRICANA	9978873.467	312861.588
PC048	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	BOSQUE NATIVO	9980181.857	313700.046
PC049	VEGETACIÓN ARBUSTIVA Y HERBÁCEA	VEGETACIÓN ARBUSTIVA	VEGETACIÓN ARBUSTIVA	9979490.802	315015.496
PC050	ÁREAS AGROPECUARIAS	PASTO CULTIVADOS	PASTO CULTIVADOS	9979550.993	315027.546
PC051	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	BOSQUE NATIVO	9978363.203	315443.007
PC052	ZONAS ANTRÓPICAS	INFRAESTRUCTURA	MATERIAL DE LASTRE	9977808.492	316416.320
PC053	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	BOSQUE NATIVO	9977832.001	316620.446
PC054	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	BOSQUE NATIVO	9980964.962	316507.744
PC055	ÁREAS AGROPECUARIAS	PASTO CULTIVADOS	PASTO CULTIVADOS	9981330.737	316446.247
PC056	ÁREAS AGROPECUARIAS	CULTIVOS ANUALES	MALANGA	9982972.739	315931.747
PC058	ÁREAS AGROPECUARIAS	CULTIVOS ANUALES	MAÍZ	9986325.697	316760.026
<p>CÓDIGO: Identificador de los puntos de observación tomados en campo NIVEL I: Identifica las clases de uso y cobertura correspondientes al nivel I de la leyenda. NIVEL II: Identifica las clases de uso y cobertura correspondientes al nivel II de la leyenda. NIVEL III: Identifica las clases de uso y cobertura correspondientes al nivel III de la leyenda. ESTE: Indica la coordenada en Este en metros (proyección UTM, zona 18 sur, Datum WGS 84). NORTE: Indica la coordenada en Norte en metros (proyección UTM, zona 18 sur, Datum WGS 84).</p>					

4.5 RESULTADOS DE LOS MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN.

En el programa ARCGIS 10, se realizó las cuantificaciones de los diferentes métodos de clasificación, y se analizó para cada imagen mediante píxeles y por objetos mediante los métodos supervisado y no supervisado; cuyos resultados y gráficas analíticas se presentan a continuación. (También se puede Ver, ANEXO 21).

4.5.1 RESULTADOS DE LAS CLASIFICACIONES SUPERVISADAS BASADAS EN PÍXELES Y ORIENTADA A OBJETOS DE LA IMAGEN IKONOS.

En la Tabla IV.8, se puede observar el resultado de la cuantificación del área de cada clase del uso del suelo expresado en hectáreas, de la clasificación supervisada de la imagen Ikonos, por píxeles y mediante objetos, donde se estableció la diferencia de áreas y la variabilidad porcentual

Tabla IV.8. Resultados de las clasificaciones supervisadas basadas en píxeles y orientada a objetos de la imagen Ikonos.

LEYENDA NIVEL III	CLASES TEMÁTICAS	IKONOS PÍXELES SUPERVISADO MÁXIMA PROBABILIDAD	IKONOS POR OBJETOS SUPERVISADO BHATTACHARYA	PROMEDIO	DIFERENCIA	VARIABILIDAD PORCENTUAL
CODIGO	NOMBRE	ÁREA (HA)	ÁREA (HA)	ÁREA (HA)	ÁREA (HA)	%
21	BOSQUE NATIVO	2727,3	2725,6	2726,5	1,6	0,0%
23	PISCICOLAS	3,1	0,0	1,6	3,1	0,1%
24	MAIZ	195,2	64,3	129,8	130,9	2,2%
25	MALANGA	109,6	632,5	371,0	-522,9	8,7%
26	PALMITO	73,7	36,8	55,3	37,0	0,6%
27	CAFE	561,8	43,6	302,7	518,3	8,6%
28	CACAO	119,1	4,7	61,9	114,4	1,9%
29	FRUTALES	253,4	50,1	151,8	203,3	3,4%
30	PALMA AFRICANA	407,4	104,8	256,1	302,7	5,0%
31	PASTOS CULTIVADOS	282,9	1217,6	750,3	-934,7	15,6%
32	MOSAICO AGROPECUARIO	171,5	52,3	111,9	119,2	2,0%
33	VEGETACION ARBUSTIVA	502,3	262,4	382,4	239,9	4,0%
34	HERBAZALES INUNDABLES	137,4	0,0	68,7	137,4	2,3%
35	CUERPOS DE AGUA (NATURAL)	13,8	16,8	15,3	-3,0	0,1%
36	ZONAS POBLADAS	193,7	398,2	295,9	-204,5	3,4%
37	SUELO DESNUDO	100,2	294,2	197,2	-194,0	3,2%
38	MATERIAL METALICO	39,3	0,0	19,6	39,3	0,7%
39	MATERIAL DE LASTRE	71,5	114,9	93,2	-43,4	0,7%
40	MATERIAL DE ASFALTO	43,1	2,8	22,9	40,3	0,7%
	TOTAL	6006,4	6021,6	6014,0		

En la siguiente figura se puede observar gráficamente la comparación de áreas de la clasificación supervisada de la imagen Ikonos, por píxeles y por objetos

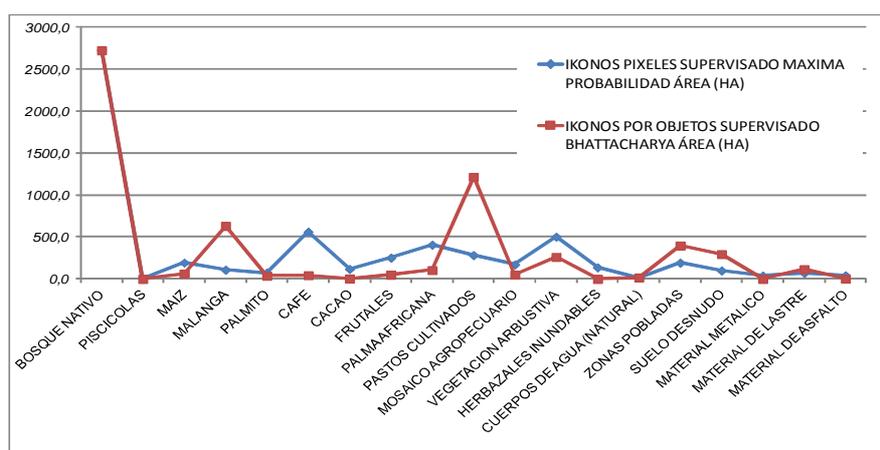


Figura IV.1. Representación gráfica de los resultados de las clasificaciones supervisadas basadas en píxeles y orientada a objetos de la imagen Ikonos.

En la siguiente figura se puede observar los resultados obtenidos de la clasificación supervisada mediante píxeles y objetos para la imagen Ikonos, donde se puede apreciar las clases de uso y cobertura, su área, forma y la diferencia entre ambos métodos.

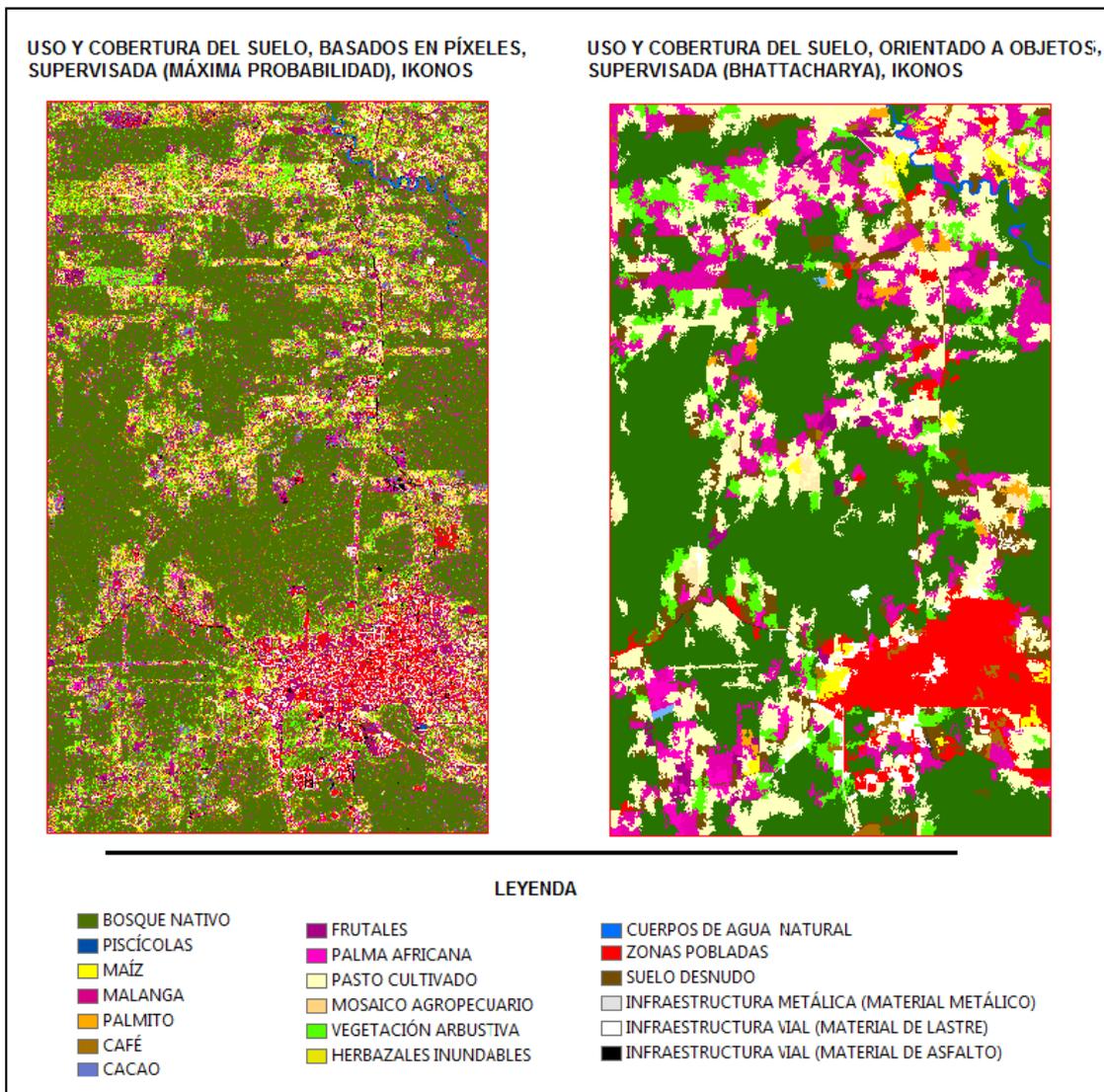


Figura IV.2. Resultados de las clasificaciones supervisadas basadas en píxeles y orientada a objetos de la imagen Ikonos.

4.5.2 RESULTADOS DE LAS CLASIFICACIONES SUPERVISADAS BASADAS EN PÍXELES Y ORIENTADA A OBJETOS DE LA IMAGEN ASTER.

En la Tabla IV.9, se puede observar el resultado de la cuantificación del área de cada clase del uso del suelo expresado en hectáreas, de la clasificación

supervisada de la imagen Aster, por píxeles y mediante objetos, donde se estableció una diferencia de áreas y la variabilidad porcentual²⁰.

Tabla IV.9. Resultados de la clasificación supervisada basada en píxeles y orientada a objetos de la imagen Aster.

LEYENDA NIVEL II	CLASES TEMÁTICAS	ASTER, POR PÍXELES SUPERVISADO, MAXIMA PROBABILIDAD	ASTER, POR OBJETOS SUPERVISADO, BHATTACHARYA	PROMEDIO	DIFERENCIA	VARIABILIDAD PORCENTUAL
CODIGO	NOMBRE	ÁREA (HA)	ÁREA (HA)	ÁREA (HA)	ÁREA (HA)	%
7	BOSQUE NATIVO	2091,4	1713,2	1902,3	378,2	6,3%
10	CULTIVOS ANUALES	283,9	566,5	425,2	-282,6	4,7%
11	CULTIVOS PERMANENTES	1032,2	577,7	805,0	454,5	7,6%
12	PASTO CULTIVADO	326,5	1215,0	770,7	-888,5	14,8%
13	MOSAICO AGROPECUARIO	29,4	122,0	75,7	-92,6	1,5%
14	VEGETACION ARBUSTIVA	895,7	537,6	716,6	358,1	6,0%
16	CUERPOS DE AGUA	21,3	14,8	18,0	6,5	0,1%
17	ZONAS POBLADAS	109,1	337,5	223,3	-228,4	3,8%
18	SUELO DESNUDO	485,3	283,6	384,4	201,6	3,4%
19	INFRAESTRUCTURA	366,3	273,0	319,7	93,3	1,6%
20	SIN INFORMACIÓN	405,2	405,2	405,2	0,0	0,0%
	TOTAL	6046,1	6046,1	6046,1		

En la siguiente figura se puede observar gráficamente una representación de comparación de áreas de la clasificación supervisada basada en píxeles y orientada a objetos de la imagen Aster.

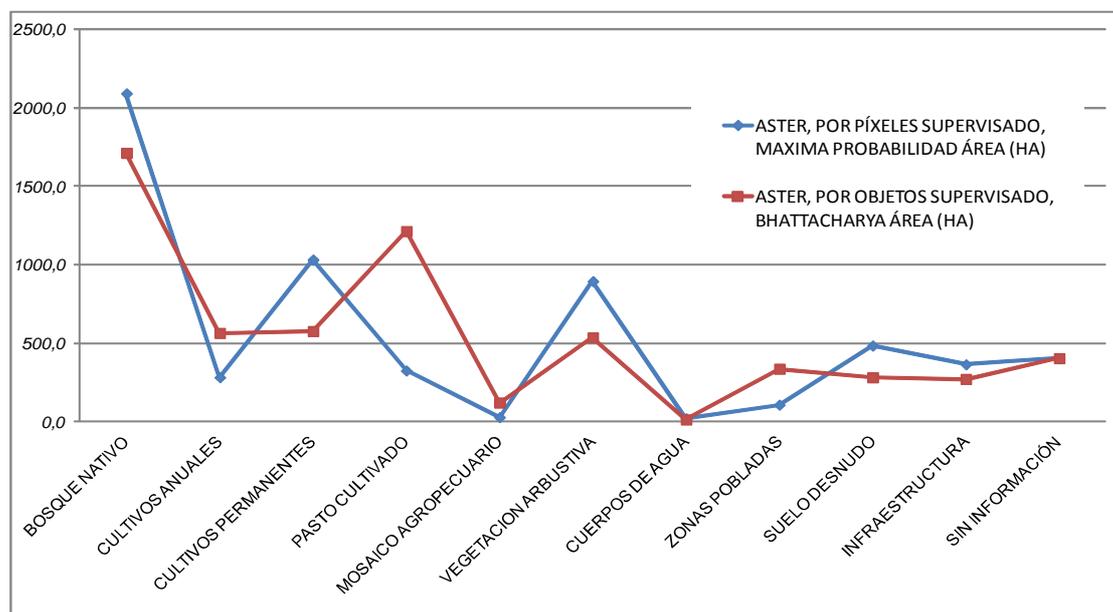


Figura IV.3. Representación gráfica de los resultados de la clasificación supervisada basada en píxeles y orientada a objetos de la imagen Aster.

²⁰ La variabilidad porcentual está dada por la diferencia del valor final y el valor inicial expresada en porcentaje de la totalidad del área.

En la Figura IV.4, se puede observar los resultados obtenidos de esta clasificación

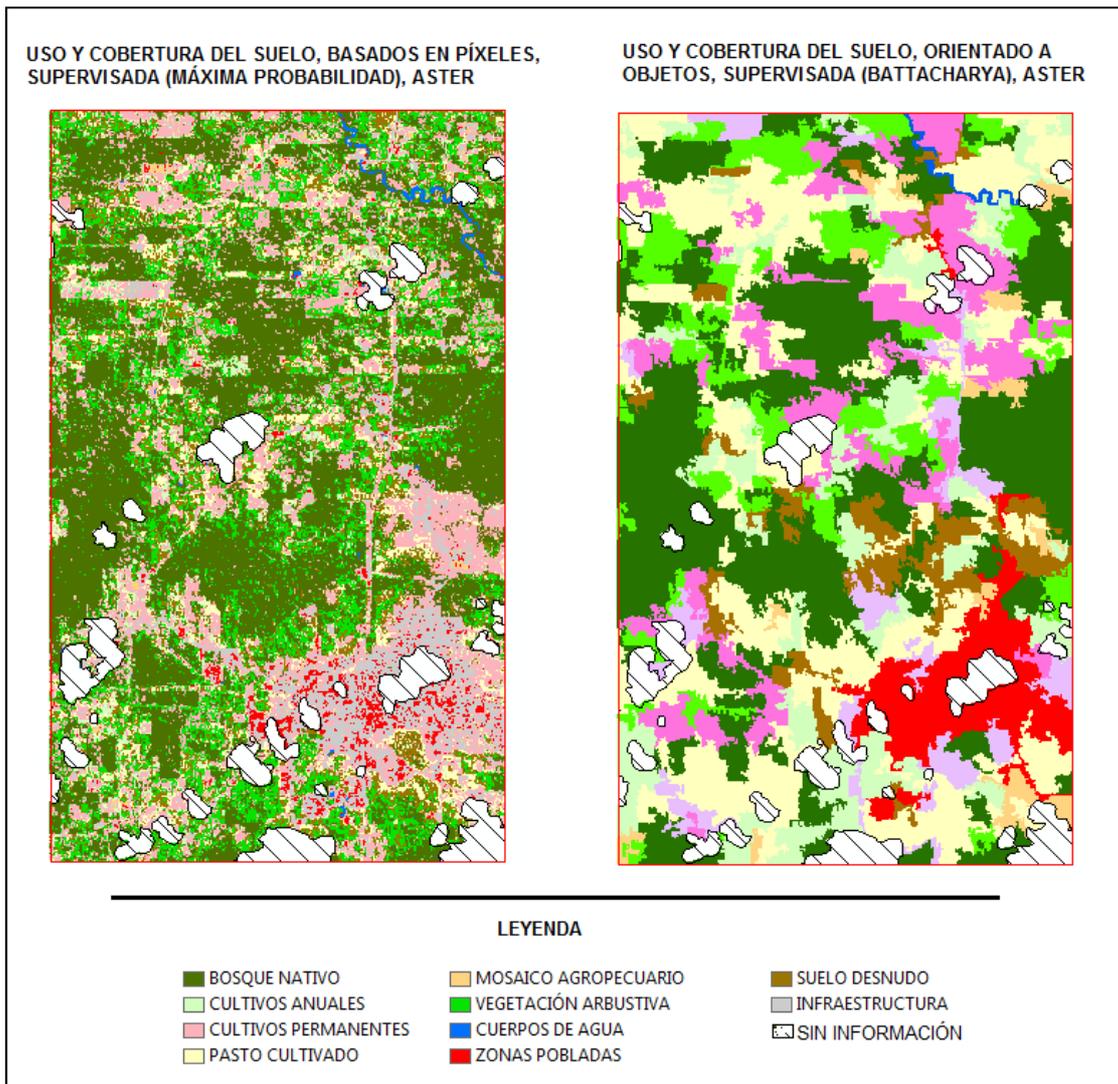


Figura IV.4. Resultados de las clasificaciones supervisadas basadas en píxeles y orientada a objetos de la imagen Aster.

4.5.3 RESULTADOS DE LAS CLASIFICACIONES NO SUPERVISADAS BASADAS EN PÍXELES Y ORIENTADA A OBJETOS DE LA IMAGEN IKONOS.

En la Tabla IV.10, se puede observar el resultado de la cuantificación del área de cada clase del uso del suelo expresado en hectáreas, de la clasificación No Supervisada de la imagen Ikonos, por píxeles y mediante objetos, donde se estableció una diferencia de áreas y la variabilidad porcentual.

Tabla IV.10. Áreas obtenidas de la clasificación No Supervisada por píxeles de la imagen Ikonos.

LEYENDA NIVEL III	CLASES TEMÁTICAS	IKONOS PÍXELES NO SUPERVISADO ISODATA	IKONOS POR OBJETOS NO SUPERVISADO ISOSEG	PROMEDIO	DIFERENCIA	VARIABILIDAD PORCENTUAL
CODIGO	NOMBRE	ÁREA (HA)	ÁREA (HA)	ÁREA (HA)	ÁREA (HA)	%
21	BOSQUE NATIVO	3124,3072	2926,2	3025,2	198,1	3%
23	PISCICOLAS	0,0	0,0	0,0	0,0	0%
24	MAIZ	0,0	0,0	0,0	0,0	0%
25	MALANGA	0,0	0,0	0,0	0,0	0%
26	PALMITO	0,0	0,0	0,0	0,0	0%
27	CAFE	0,0	0,0	0,0	0,0	0%
28	CACAO	0,0	0,0	0,0	0,0	0%
29	FRUTALES	0,0	0,0	0,0	0,0	0%
30	PALMA AFRICANA	0,0	0,0	0,0	0,0	0%
31	PASTOS CULTIVADOS	1027,6	1869,5	1448,5	-841,8	-14%
32	MOSAICO AGROPECUARIO	627,3	0,0	313,7	627,3	10%
33	VEGETACION ARBUSTIVA	358,7	593,9	476,3	-235,2	-4%
34	HERBAZALES INUNDABLES	0,0	0,0	0,0	0,0	0%
35	CUERPOS DE AGUA (NATURAL)	115,8	22,5	69,1	93,3	2%
36	ZONAS POBLADAS	234,1	609,6	421,8	-375,5	-6%
37	SUELO DESNUDO	371,3	0,0	185,6	371,3	6%
38	MATERIAL METALICO	0,0	0,0	0,0	0,0	0%
39	MATERIAL DE LASTRE	147,3	0,0	73,7	147,3	2%
40	MATERIAL DE ASFALTO	0,0	0,0	0,0	0,0	0%
	TOTAL	6006,4	6021,6	6014,0		

En la siguiente figura se puede observar gráficamente una representación de comparación de áreas de la clasificación No Supervisada por píxeles de la imagen Ikonos.

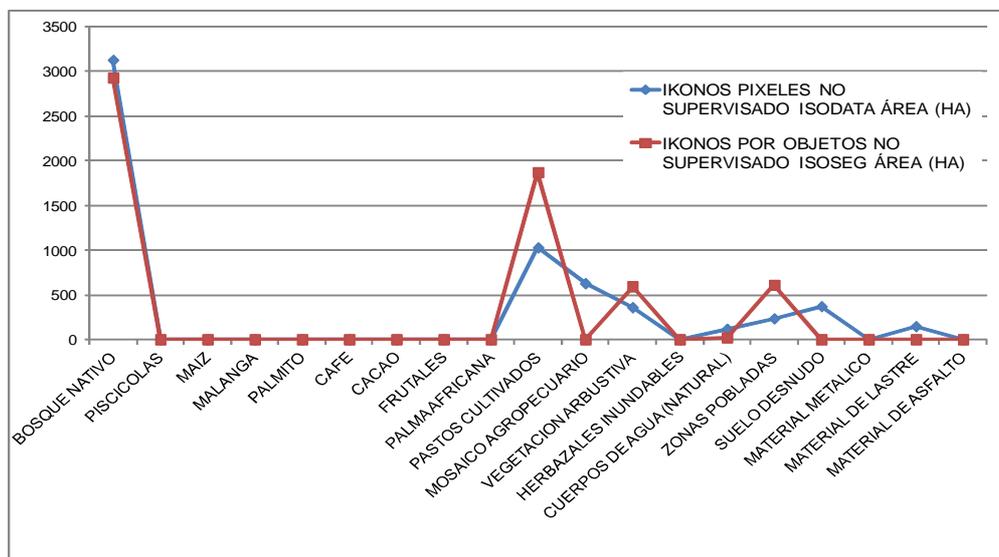


Figura IV.5. Representación gráfica de áreas obtenidas de la clasificación No Supervisada por píxeles de la imagen Ikonos.

En la figura a continuación, se puede observar los resultados obtenidos de la clasificación No Supervisada mediante píxeles y objetos para la imagen Ikonos, donde se puede apreciar las clases de uso y cobertura, su área, forma y la diferencia entre ambos métodos.

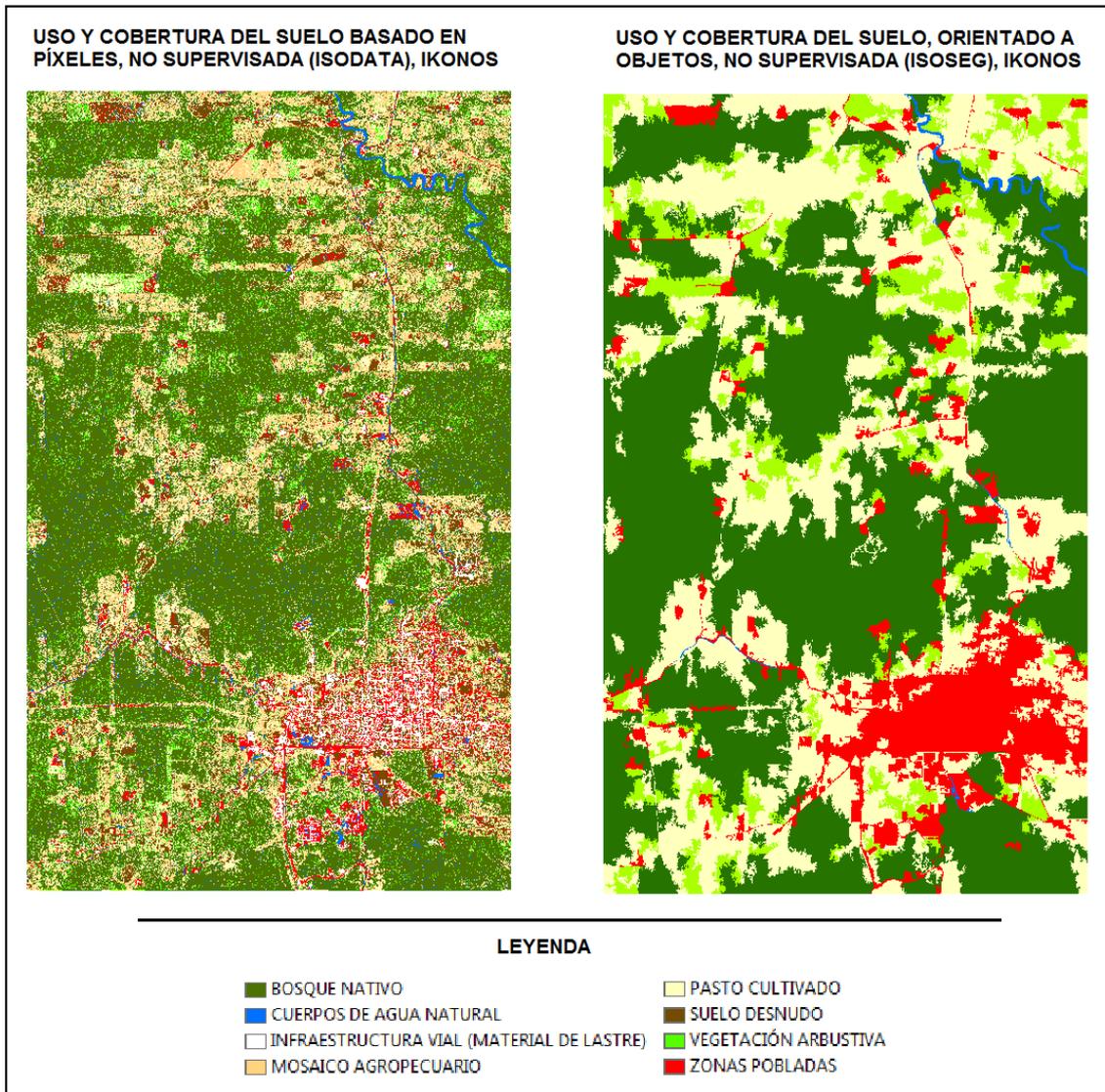


Figura IV.6. Representación gráfica de las áreas obtenidas de la clasificación Supervisada por píxeles de la imagen Ikonos.

4.5.4 RESULTADOS DE LA CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA BASADA EN PÍXELES Y ORIENTADA A OBJETOS DE LA IMAGEN ASTER.

En la Tabla IV.11, se puede observar el resultado de la cuantificación del área de cada clase del uso del suelo expresado en hectáreas, de la clasificación No Supervisada de la imagen Aster, por píxeles y mediante objetos, donde se estableció una diferencia de áreas y la variabilidad porcentual.

Tabla IV.11. Áreas obtenidas de la clasificación No Supervisada por píxeles de la imagen Aster.

LEYENDA NIVEL III	CLASES TEMÁTICAS	ASTER PIXELES NO SUPERVISADO ISODATA	ASTER POR OBJETOS NO SUPERVISADO ISOSEG	PROMEDIO	DIFERENCIA	VARIABILIDAD PORCENTUAL
CODIGO	NOMBRE	ÁREA (HA)	ÁREA (HA)	ÁREA (HA)	ÁREA (HA)	%
7	BOSQUE NATIVO	2496,4	2953,1	2724,8	-456,6	7,6%
10	CULTIVOS ANUALES	420,1	0,0	210,1	420,1	7,0%
11	CULTIVOS PERMANENTES	0,0	130,9	65,5	-130,9	2,2%
12	PASTO CULTIVADO	1517,7	19,8	768,7	1497,9	25,0%
13	MOSAICO AGROPECUARIO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0%
14	VEGETACION ARBUSTIVA	0,0	2498,5	1249,3	-2498,5	41,6%
16	CUERPOS DE AGUA	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0%
17	ZONAS POBLADAS	279,4	0,0	139,7	279,4	4,7%
18	SUELO DESNUDO	597,5	38,6	318,0	558,9	9,3%
19	INFRAESTRUCTURA	329,7	0,0	164,9	329,7	5,5%
20	SIN INFORMACIÓN	386,1	386,1	386,1	0,0	0,0%
	TOTAL	6027,0	6027,0	6027,0		

Se puede observar gráficamente en la figura a continuación, el resultado de la cuantificación de la Tabla IV.11:

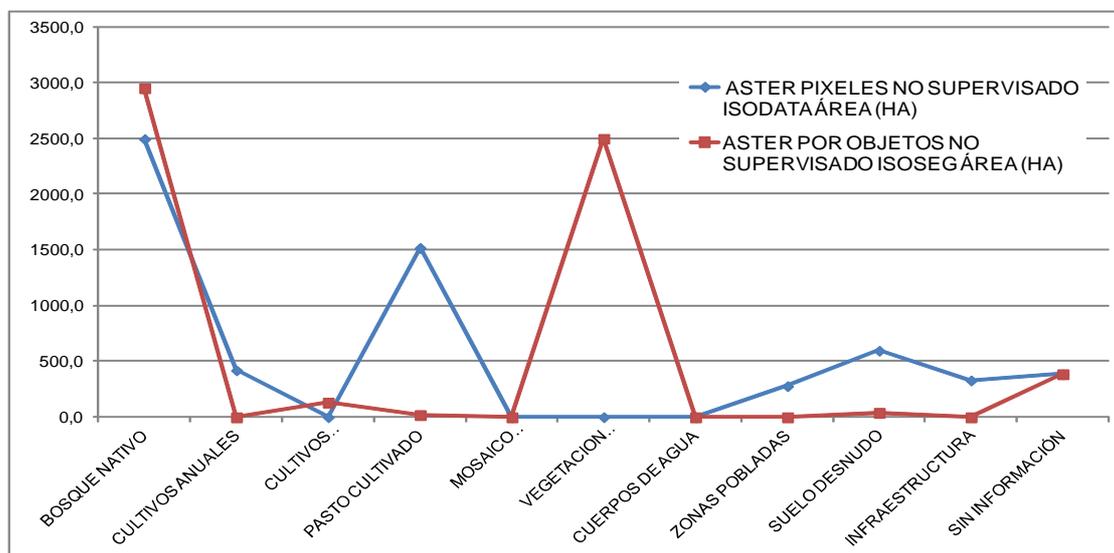


Figura IV.7. Representación gráfica de Áreas obtenidas de la clasificación No Supervisada por píxeles de la imagen Aster.

En la siguiente figura, se puede observar los resultados obtenidos de la clasificación No Supervisada mediante píxeles y objetos para la imagen Aster, donde se puede apreciar el número de clases de uso y cobertura, su área, forma y la diferencia entre ambos métodos.

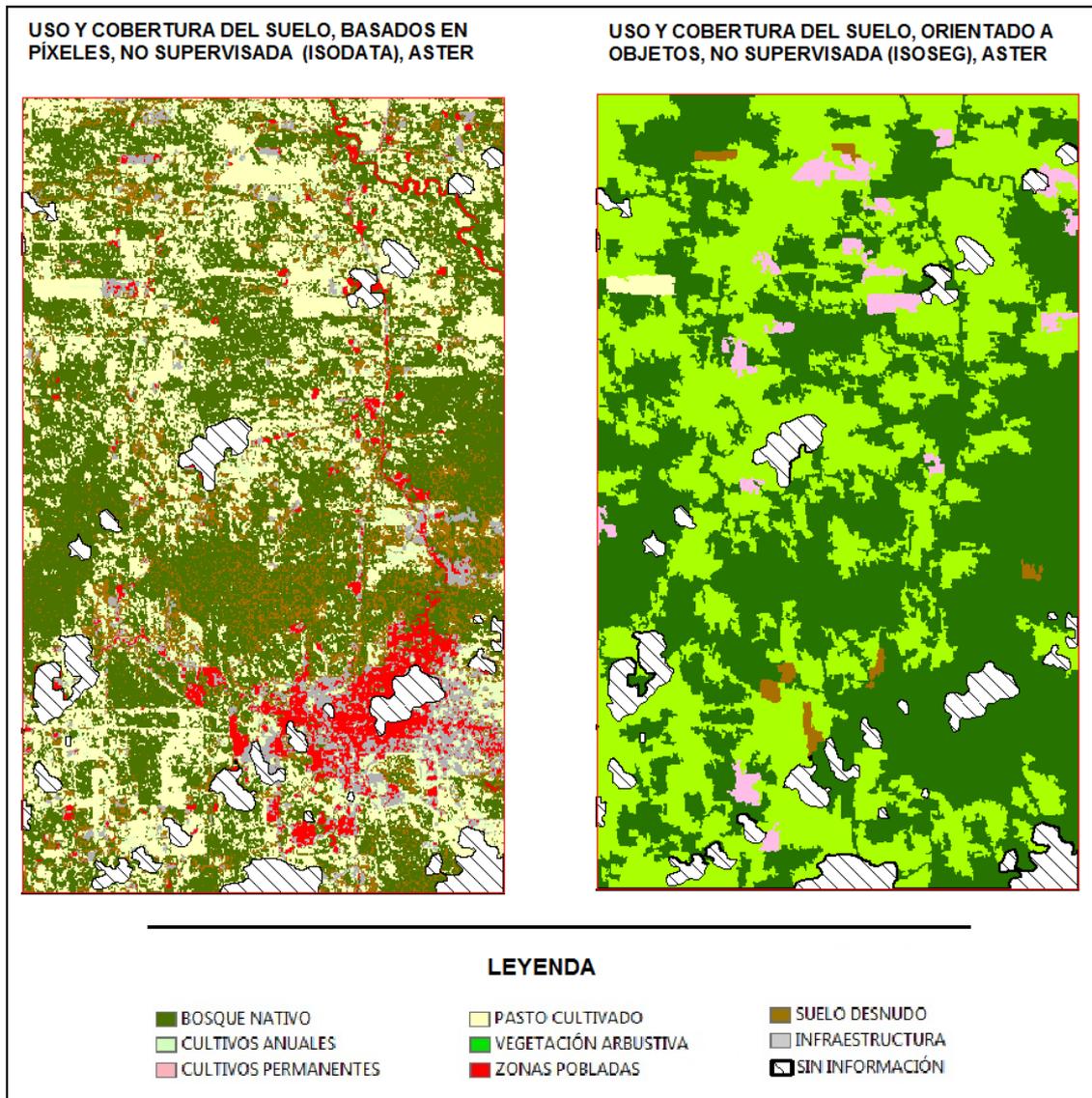


Figura IV.8. Representación gráfica de las áreas obtenidas de la clasificación Supervisada por píxeles de la imagen Aster.

4.6 RESULTADO DEL CÁLCULO DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA PARA PUNTOS DE VALIDACIÓN DE MAPAS DE USO DEL SUELO Y COBERTURA VEGETAL EN CAMPO, USANDO LA FÓRMULA DE MUESTREO ESTRATIFICADO.

Según Chavez et. al (2010). Utiliza la fórmula indicada en la siguiente ecuación:

$$n = \frac{\sum(N_h \times S_h)^2}{V + \sum N_h \times S_h^2}$$

Donde:

N_h = Población o universo de predios en el Estrato (Área del Estrato).

S_h = Desviación Standard de los elementos de la población en el estrato h.

V = Varianza deseada de la superficie total de predios en el Universo o Población.

En la Tabla IV.11, se observa dicho cálculo, obteniendo 24 puntos de muestreo para la imagen Aster y 31 puntos de muestreo para la imagen Ikonos.

Cabe recalcar que en esta fórmula se utilizó exclusivamente el promedio de las áreas de los métodos supervisados, ya que solo en ésta metodología se tiene control del número de clases.

Tabla IV.11. Cálculo del tamaño de la muestra para puntos de validación de mapas de uso del suelo y cobertura vegetal en campo.

CÁLCULO DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA PARA PUNTOS DE VALIDACIÓN, USANDO LA FÓRMULA DE MUESTREO ESTRATIFICADO (CHAVEZ 2010)

NIVEL I	NIVEL II	NIVEL III	ÁREA (km ²)	DESVIACIÓN ESTANDAR	CÁLCULO MUESTREO ESTRATIFICADO NIVEL II	No MUESTRAS NIVEL II (ASTER)	CÁLCULO MUESTREO ESTRATIFICADO NIVEL III	No MUESTRAS NIVEL III (IKONOS)
Bosque	Bosque Nativo	Bosque Nativo	27,26	1,0	11,760299	12	11,76030	12
Áreas Agropecuarias	Piscícolas	Piscícolas	0,02	1,65	0,840115	1	0,00001	1
		Maíz	1,30				0,08977	1
		Malanga	3,71				0,73406	1
	Cultivos Anuales	Palmito	0,55	1,08	0,476644	1	0,01628	1
		Café	3,03				0,23724	1
		Cacao	0,62				0,00992	1
		Frutales	1,52				0,05964	1
		Palma Africana	2,56				0,16984	1
	Pasto Cultivado	Pasto Cultivado	7,50	1,00	1,295611	2	1,29561	2
	Mosaico Agropecuario (Asociaciones)	Mosaico Agropecuario (Asociaciones)	1,12	1,00	0,033773	1	0,03377	1
Vegetación Arbustiva y Herbácea	Vegetación Arbustiva	Vegetación Arbustiva	3,82	1,00	0,367673	1	0,36767	1
	Herbazales Inundables	Herbazales Inundables	0,69	1,00	0,012890	1	0,01289	1
Cuerpos de agua	Natural	Natural	0,15	1,00	0,000648	1	0,00065	1
Zonas Antrópicas	Zonas Pobladas	Zonas Pobladas	2,96	1,00	0,225108	1	0,22511	1
	Suelo Desnudo	Suelo Desnudo	1,97	1,00	0,102541	1	0,10254	1
	Infraestructura	Material Metálico	0,20	0,42	0,004587	1	0,00018	1
		Material de Lastre	0,93				0,00416	1
Material de Asfalto		0,23	0,00020				1	
Sin información	Sin Información	Sin Información	0,00	0,00	0,000000	0	0,00000	0
Area Total			60,14					
Varianza total			35,94		N° de muestras	24		31

CÓDIGO: Identificador de los puntos de observación tomados en campo

NIVEL I: Identifica las clases de uso y cobertura correspondientes al nivel I de la leyenda.

NIVEL II: Identifica las clases de uso y cobertura correspondientes al nivel II de la leyenda.

NIVEL III: Identifica las clases de uso y cobertura correspondientes al nivel III de la leyenda.

DESVIACIÓN ESTANDAR : Raíz cuadrada de la varianza

CÁLCULO MUESTREO ESTRATIFICADO NIVEL II : Cálculo estadístico según la fórmula de Chavez para el Nivel II

No MUESTRAS NIVEL II (ASTER) : Número de muestras a ser tomadas en campo para validar los métodos de clasificación para el nivel II

CÁLCULO MUESTREO ESTRATIFICADO NIVEL III : Cálculo estadístico según la fórmula de Chavez para el Nivel III

No MUESTRAS NIVEL III (IKONOS) : Número de muestras a ser tomadas en campo para validar los métodos de clasificación para el nivel III

4.7 PUNTOS DE VALIDACIÓN PARA LA IMAGEN IKONOS Y ASTER

Una vez realizado el cálculo de los puntos para la validación de los mapas de uso y cobertura del suelo, se obtiene que para la imagen Ikonos se requiere 31 puntos, pero en campo se tomaron 54 puntos.

Para la imagen Aster se requiere 24 puntos, pero se tomaron 49 puntos de validación en campo.

Tabla IV.12. Resumen de puntos de validación para el nivel III de la leyenda temática (Imagen Ikonos).

CÓDIGO	NIVEL III	No
21	BOSQUE NATIVO	17
23	PISCICOLAS	1
24	MAIZ	1
25	MALANGA	1
26	PALMITO	1
27	CAFE	1
28	CACAO	2
29	FRUTALES	1
30	PALMA AFRICANA	2
31	PASTO CULTIVADOS	7
32	MOSAICO AGROPECUARIO	1
33	VEGETACION ARBUSTIVA	1
34	HERBAZALES INUNDABLES	2
35	CUERPOS DE AGUA	2
36	ZONAS POBLADAS	1
37	SUELO DESNUDO	4
38	MATERIAL METALICO	2
39	MATERIAL DE LASTRE	5
40	MATERIAL DE ASFALTO	2
	TOTAL	54

Tabla IV.13. Resumen de puntos de validación para el nivel II de la leyenda temática (Imagen Aster).

CÓDIGO	NIVEL II	No
7	BOSQUE NATIVO	16
9	PISCICOLAS	1
10	CULTIVOS ANUALES	3
11	CULTIVOS PERMANENTES	5
12	PASTO CULTIVADOS	6
13	MOSAICO AGROPECUARIO	1
14	VEGETACION ARBUSTIVA	1
15	HERBAZALES INUNDABLES	2
16	CUERPOS DE AGUA	2
17	ZONAS POBLADAS	1
18	SUELO DESNUDO	3
19	INFRAESTRUCTURA	8
	TOTAL	49

Tabla IV.14. Puntos de validación para el nivel II Y III de la leyenda temática

CODIGO	NIVEL_1	NIVEL_2	NIVEL_3	ESTE	NORTE	NIVEL
PV007	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	BOSQUE NATIVO	316935,184	9983065,945	NIVEL II Y III
PV013	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	BOSQUE NATIVO	316463,070	9977584,185	NIVEL II Y III
PV014	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	BOSQUE NATIVO	316382,706	9981320,598	NIVEL II Y III
PV017	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	BOSQUE NATIVO	315512,056	9982059,911	NIVEL II Y III
PV020	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	BOSQUE NATIVO	312359,860	9986566,820	NIVEL II Y III
PV027	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	BOSQUE NATIVO	317253,481	9983479,684	NIVEL II Y III
PV029	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	BOSQUE NATIVO	317980,443	9983460,378	NIVEL II Y III
PV030	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	BOSQUE NATIVO	314874,118	9982927,782	NIVEL II Y III
PV034	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	BOSQUE NATIVO	315837,877	9983503,816	NIVEL II Y III
PV042	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	BOSQUE NATIVO	313709,419	9981529,307	NIVEL II Y III
PV047	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	BOSQUE NATIVO	315616,266	9982593,501	NIVEL II Y III
PV048	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	BOSQUE NATIVO	317764,061	9982930,756	NIVEL II Y III
PV049	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	BOSQUE NATIVO	317729,594	9983112,959	NIVEL II Y III
PV050	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	BOSQUE NATIVO	313705,469	9983843,264	NIVEL II Y III
PV053	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	BOSQUE NATIVO	314020,941	9985273,950	NIVEL II Y III
PV054	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	BOSQUE NATIVO	313789,100	9980646,197	NIVEL II Y III
PV055	BOSQUE	BOSQUE NATIVO	BOSQUE NATIVO	312754,917	9978767,078	NIVEL II Y III
PV025	AREAS AGROPECUARIAS	CULTIVOS PERMANENTES	CACAO	317030,842	9984803,261	NIVEL II Y III
PV036	AREAS AGROPECUARIAS	CULTIVOS PERMANENTES	CACAO	317148,948	9986372,532	NIVEL II Y III
PV057	AREAS AGROPECUARIAS	CULTIVOS PERMANENTES	CAFE	315077,922	9982482,005	NIVEL II Y III
PV003	CUERPOS DE AGUA	CUERPOS DE AGUA	CUERPOS DE AGUA	316941,573	9985906,853	NIVEL II Y III
PV004	CUERPOS DE AGUA	CUERPOS DE AGUA	CUERPOS DE AGUA	316106,364	9977698,990	NIVEL II Y III
PV028	AREAS AGROPECUARIAS	CULTIVOS PERMANENTES	FRUTALES	315624,947	9982654,889	NIVEL II Y III
PV011	CUERPOS DE AGUA	HERBAZALES INUNDABLES	HERBAZALES INUNDABLES	313437,977	9980258,329	NIVEL II Y III
PV018	CUERPOS DE AGUA	HERBAZALES INUNDABLES	HERBAZALES INUNDABLES	317358,414	9981289,888	NIVEL II Y III
PV056	AREAS AGROPECUARIAS	CULTIVOS ANUALES	MAIZ	316768,591	9986333,987	NIVEL II Y III
PV023	AREAS AGROPECUARIAS	CULTIVOS ANUALES	MALANGA	312623,218	9985264,638	NIVEL II Y III
PV001	ZONAS ANTROPICAS	INFRAESTRUCTURA	MATERIAL DE ASFALTO	316671,092	9986403,991	NIVEL II Y III
PV002	ZONAS ANTROPICAS	INFRAESTRUCTURA	MATERIAL DE ASFALTO	316721,113	9982784,034	NIVEL II Y III
PV008	ZONAS ANTROPICAS	INFRAESTRUCTURA	MATERIAL DE LASTRE	317437,577	9984848,457	NIVEL II
PV009	ZONAS ANTROPICAS	INFRAESTRUCTURA	MATERIAL DE LASTRE	316464,748	9983227,391	NIVEL II
PV010	ZONAS ANTROPICAS	INFRAESTRUCTURA	MATERIAL DE LASTRE	315880,057	9983350,341	NIVEL II
PV026	ZONAS ANTROPICAS	INFRAESTRUCTURA	MATERIAL DE LASTRE	316388,425	9983866,561	NIVEL II
PV039	ZONAS ANTROPICAS	INFRAESTRUCTURA	MATERIAL DE LASTRE	316514,257	9984767,407	NIVEL II
PV005	ZONAS ANTROPICAS	INFRAESTRUCTURA	MATERIAL METALICO	315754,718	9977710,080	NIVEL II Y III
PV006	ZONAS ANTROPICAS	INFRAESTRUCTURA	MATERIAL METALICO	315774,624	9977854,010	NIVEL II Y III
PV012	AREAS AGROPECUARIAS	MOSAICO AGROPECUARIO	MOSAICO AGROPECUARIO	313337,649	9980692,002	NIVEL II Y III
PV024	AREAS AGROPECUARIAS	CULTIVOS PERMANENTES	PALMA AFRICANA	314885,082	9985992,659	NIVEL II Y III
PV038	AREAS AGROPECUARIAS	CULTIVOS PERMANENTES	PALMA AFRICANA	316881,431	9984085,558	NIVEL II Y III
PV037	AREAS AGROPECUARIAS	CULTIVOS ANUALES	PALMITO	316367,840	9985249,137	NIVEL II Y III
PV021	AREAS AGROPECUARIAS	PASTO CULTIVADOS	PASTO CULTIVADOS	312392,013	9985866,000	NIVEL II Y III
PV022	AREAS AGROPECUARIAS	PASTO CULTIVADOS	PASTO CULTIVADOS	312372,867	9985610,630	NIVEL II Y III
PV031	AREAS AGROPECUARIAS	PASTO CULTIVADOS	PASTO CULTIVADOS	315003,881	9982470,498	NIVEL II Y III
PV032	AREAS AGROPECUARIAS	PASTO CULTIVADOS	PASTO CULTIVADOS	312852,270	9983975,527	NIVEL II Y III
PV035	AREAS AGROPECUARIAS	PASTO CULTIVADOS	PASTO CULTIVADOS	317561,743	9986686,700	NIVEL II Y III
PV040	AREAS AGROPECUARIAS	PASTO CULTIVADOS	PASTO CULTIVADOS	313422,838	9980345,395	NIVEL II Y III
PV044	AREAS AGROPECUARIAS	PASTO CULTIVADOS	PASTO CULTIVADOS	313893,522	9980178,898	NIVEL II Y III
PV058	AREAS AGROPECUARIAS	PISCICOLAS	PISCICOLAS	315465,919	9984810,766	NIVEL II Y III
PV041	ZONAS ANTROPICAS	SUELO DESNUDO	SUELO DESNUDO	313741,162	9981106,483	NIVEL II Y III
PV043	ZONAS ANTROPICAS	SUELO DESNUDO	SUELO DESNUDO	312684,941	9979766,607	NIVEL II Y III
PV045	ZONAS ANTROPICAS	SUELO DESNUDO	SUELO DESNUDO	315608,420	9981887,792	NIVEL II Y III
PV046	ZONAS ANTROPICAS	SUELO DESNUDO	SUELO DESNUDO	315635,854	9981842,898	NIVEL II Y III
PV033	ACION ARBUSTIVA Y HER	VEGETACION ARBUSTIVA	VEGETACION ARBUSTIVA	312896,345	9983947,588	NIVEL II Y III
PV016	ZONAS ANTROPICAS	ZONAS POBLADAS	ZONAS POBLADAS	317331,201	9979202,509	NIVEL II Y III

CÓDIGO: Identificador de los puntos de observación tomados en campo
NIVEL I: Identifica las clases de uso y cobertura correspondientes al nivel I de la leyenda.
NIVEL II: Identifica las clases de uso y cobertura correspondientes al nivel II de la leyenda.
NIVEL III: Identifica las clases de uso y cobertura correspondientes al nivel III de la leyenda.
ESTE: Indica la coordenada en Este en metros (proyección UTM, zona 18 sur, Datum WGS 84).
NORTE: Indica la coordenada en Norte en metros (proyección UTM, zona 18 sur, Datum WGS 84).

Se puede observar el respectivo mapa de distribución de puntos de validación en el ANEXO 11.

4.8 MATRIZ DE CONFUSIÓN INDICE KAPPA

Una vez recolectados los puntos de validación en campo, se procede a generar las matrices de confusión para los diferentes algoritmos de clasificación (ver ANEXO 20, Tablas de Matrices de Confusión).

Siguiendo la recomendación de Landis y Kock (1977), de la Tabla II.19. Intervalo de aceptación de los resultados del índice Kappa. se calificó a cada una de las metodologías y algoritmos de clasificación de uso y cobertura del suelo, obteniendo los siguientes resultados, como se puede ver en la siguiente tabla.

Tabla IV.15.- Resultado comparativo de las Matrices de confusión.

IMAGEN	POR PÍXELES				ORIENTADO A OBJETOS			
	SUPERVISADO (MÁXIMA PROBABILIDAD)		NO SUPERVISADO (ISODATA)		SUPERVISADA (BHATTACHARYA)		NO SUPERVISADA (ISOSEG)	
IKONOS								
Clases bien estimadas	23		25		30		23	
Total de clases	54		54		54		54	
Fiabilidad estimada (%)	42,59		46,30		55,56		42,59	
Error de muestreo	6,73		6,79		6,76		6,73	
Fiabilidad Global (intervalo de confianza)	29,40	55,78	33,00	59,60	42,30	68,81	29,40	55,78
Índice Kappa	0,36		0,39		0,49		0,33	
Índice Kappa (Calidad)	Razonable		Razonable		Buena		Razonable	
Índice Kappa (Comparación entre métodos)	Tercero		Segundo		Primero		Cuarto	
ASTER								
Clases bien estimadas	26		16		18		9	
Total de clases	49		49		49		49	
Fiabilidad estimada (%)	53,06		32,65		36,73		18,37	
Error de muestreo	7,13		6,70		6,89		5,53	
Fiabilidad Global (intervalo de confianza)	39,09	67,03	19,52	45,78	23,24	50,23	7,53	29,21
Índice Kappa	0,47		0,22		0,29		-0,02	
Índice Kappa (Calidad)	Buena		Razonable		Razonable		Pésima	
Índice Kappa (Comparación entre métodos)	Primero		Tercero		Segundo		Cuarto	

4.9 DISCUSIÓN, BONDADES Y LIMITANTES

Para establecer las fortalezas y deficiencias de los métodos de clasificación y sus diferentes algoritmos, a continuación se presentan en tablas las observaciones encontradas en cada clasificación, así como de forma gráfica indicadas con figuras, en donde se da ejemplos señalados con números; estos números están explicados anteriormente en dichas tablas.

4.9.1 DISCUSIÓN, BONDADES Y LIMITANTES EN LA IMAGEN IKONOS

En las tablas a continuación se da una descripción detallada de las observaciones encontradas a los diferentes algoritmos

En la Tabla IV.16, se indican las discusiones, bondades y limitantes del algoritmo de Máxima Probabilidad, para la imagen Ikonos.

Tabla IV.16. Discusiones, Bondades y Limitantes del algoritmo de Máxima Probabilidad, para la imagen Ikonos.

RESULTADOS	OBSERVACIONES	DESCRIPCIÓN
DISCUSIÓN	EN FORMA GENERAL	Visualmente existe una delimitación coherente de las clases, sin embargo al ser una clasificación por píxeles se obtienen píxeles aislados dentro de las diferentes coberturas.
	FORMATO RESULTADO DE LA CLASIFICACIÓN.	Se obtuvo en formato Raster.
	NÚMERO DE COBERTURAS CLASIFICADAS .	Se lograron clasificar las 19 coberturas temáticas para el nivel III de la leyenda temática.
BONDADES	1	Se discriminaron correctamente las siguientes clases: Bosque Nativo, Infraestructura Vial (Material de Asfalto), Piscícolas, Mosaico Agropecuario y Cuerpos de Agua Natural.
LIMITANTES	2	Se mezcla entre sí: Pasto Cultivado, Vegetación Arbustiva y Herbazales Inundables.
	3	Se mezcla entre sí: Maíz, Malanga, Palmito, Café,

		Cacao, Frutales y Palma Africana.
	4	Se mezcla entre sí: Suelo Desnudo, Zonas Pobladas, Infraestructura Vial (Material Lastre) e Infraestructura Metálica.
<p>RESULTADOS: Engloba DISCUSIÓN, BONDADES y LIMITANTES.</p> <p>DISCUSIÓN: Da los elementos que introducen al lector a los resultados obtenidos por el algoritmo en forma general, en que formato presenta los datos (Raster o Vector) y el número de coberturas clasificadas.</p> <p>BONDADES: Indica las coberturas mejor clasificadas por el algoritmo.</p> <p>LIMITANTES: Indica las coberturas que se mezclan claramente de la clasificación del algoritmo.</p> <p>OBSERVACIONES: Indicaciones encontradas en el algoritmo</p> <p>EN FORMA GENERAL: Da una explicación global de los resultados de la clasificación.</p> <p>FORMATO RESULTADO DE LA CLASIFICACIÓN: Modelo en que se representan los datos Raster o Vector.</p> <p>NÚMERO DE COBERTURAS CLASIFICADAS: Indica cuantas coberturas se presentarán mejor clasificadas por el algoritmo.</p> <p>NÚMEROS: Ejemplo de sectores de la imagen donde se observan BONDADES o DISCUSIONES.</p> <p>DESCRIPCIÓN: Explicación detallada de las OBSERVACIONES.</p>		

En la Figura IV.9, se indican las observaciones encontradas al algoritmo de Máxima Probabilidad, en la imagen Ikonos. Se puede observar con mayor detalle en el mapa ANEXO 12.

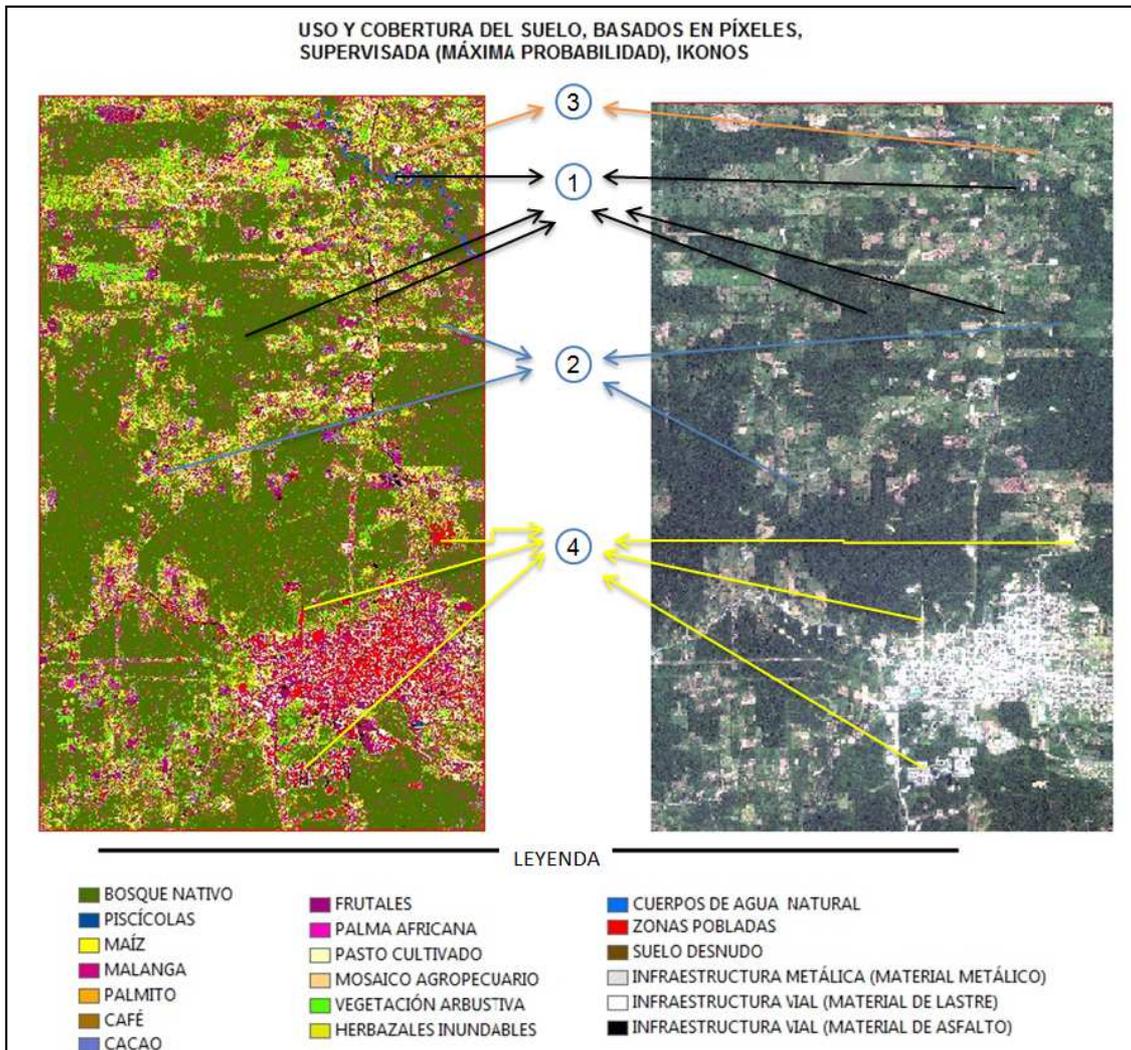


Figura IV.9. Observaciones encontradas del algoritmo de Máxima Probabilidad, en la imagen Ikonos.

En la Tabla IV.17, se indican las discusiones, bondades y limitantes del algoritmo Isodata, para la imagen Ikonos.

Tabla IV.17. Discusiones, Bondades y Limitantes del algoritmo Isodata, clasificación no supervisada por píxeles en la imagen Ikonos.

RESULTADOS	OBSERVACIONES	DESCRIPCIÓN
DISCUSIÓN	EN FORMA GENERAL	Visualmente existe una delimitación coherente de las clases, sin embargo al ser una clasificación por píxeles se obtuvieron píxeles aislados dentro de las diferentes coberturas. Este método permite el ingreso del número de coberturas para su clasificación; no obstante al momento de asignar el nombre a cada una de ellas, algunas se agruparon, quedando un número menor de las clases iniciales.
	FORMATO RESULTADO DE LA CLASIFICACIÓN.	Se obtuvo en formato Raster.
	NÚMERO DE COBERTURAS CLASIFICADAS .	Se lograron clasificar 8 coberturas temáticas para el nivel III de la leyenda temática.
BONDADES	5	Se discriminaron correctamente Bosque Nativo.
LIMITANTES	6	Se mezcla entre sí: Cuerpos de Agua Natural, Infraestructura Vial (Material de Asfalto) y Piscícolas.
	7	Se mezcla entre sí: Mosaico Agropecuario, Maíz, Malanga, Palmito, Café, Cacao, Frutales, Palma Africana, Vegetación Arbustiva, Herbazales Inundables y Pasto Cultivado.
	8	Se mezcla entre sí: Suelo Desnudo, Zonas Pobladas y Material Metálico.
<p>RESULTADOS: Engloba DISCUSIÓN, BONDADES y LIMITANTES. DISCUSIÓN: Da los elementos que introducen al lector a los resultados obtenidos por el algoritmo en forma general, en que formato presenta los datos (Raster o Vector) y el número de coberturas clasificadas. BONDADES: Indica las coberturas mejor clasificadas por el algoritmo. LIMITANTES: Indica las coberturas que se mezclan claramente de la clasificación del algoritmo. OBSERVACIONES: Indicaciones encontradas en el algoritmo EN FORMA GENERAL: Da una explicación global de los resultados de la clasificación. FORMATO RESULTADO DE LA CLASIFICACIÓN: Modelo en que se representan los datos Raster o Vector. NÚMERO DE COBERTURAS CLASIFICADAS: Indica cuantas coberturas se presentarán mejor clasificadas por el algoritmo. NÚMEROS: Ejemplo de sectores de la imagen donde se observan BONDADES o DISCUSIONES. DESCRIPCIÓN: Explicación detallada de las OBSERVACIONES.</p>		

En la Figura IV.10, se indican las observaciones encontradas del algoritmo Isodata, en la imagen Ikonos. Se puede observar con mayor detalle en el mapa ANEXO 13.

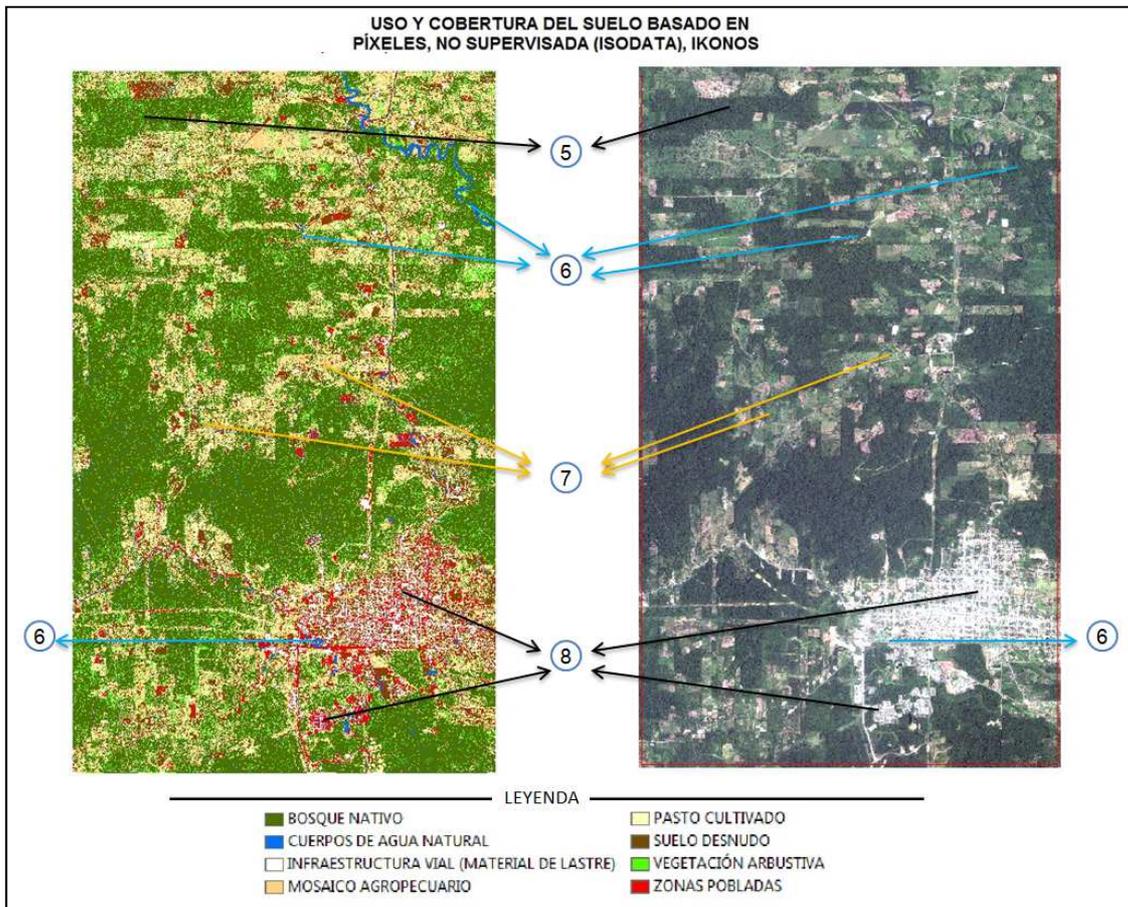


Figura IV.10. Observaciones del algoritmo Isodata, clasificación no supervisada por píxeles en la imagen Ikonos.

En la Tabla IV.18 se indican las discusiones, bondades y limitantes del algoritmo de Bhattacharya, para la imagen Ikonos.

Tabla IV.18. Discusiones, Bondades y Limitantes del algoritmo de Bhattacharya, clasificación supervisada por objetos en la imagen Ikonos.

RESULTADOS	OBSERVACIONES	DESCRIPCIÓN
DISCUSIÓN	EN FORMA GENERAL	Visualmente existe una delimitación coherente de las clases, sobre todo de las clases que difieren mucho en sus niveles digitales, por ejemplo Bosque Nativo, Zonas Pobladas y Cuerpos de Agua Natural. Esta clasificación no presenta píxeles aislados, al contrario las unidades de coberturas se presentan homogéneas y también son clasificadas por su textura (debido a la segmentación).

		Por la Unidad Mínima Mapeable escogida, no existen coberturas con superficie menor a 1 hectárea; además se observó que en algunos casos no se logra discriminar adecuadamente, coberturas alargadas y con poco ancho como por ejemplo Infraestructura Vial y Drenajes.
	FORMATO RESULTADO DE LA CLASIFICACIÓN.	Se obtuvo en formato Vector.
	NÚMERO DE COBERTURAS CLASIFICADAS .	Se lograron clasificar 16 coberturas temáticas para el nivel III de la leyenda temática.
BONDADES	9	Se discriminaron correctamente: Bosque Nativo, Vegetación Arbustiva, Pasto Cultivado y Cuerpos de Agua Natural.
LIMITANTES	10	Debido al área seleccionada en la segmentación (1 hectárea o 625 píxeles), algunas coberturas no lograron ser segmentadas y por ende clasificadas como: Piscícolas, Infraestructura Metálica (Material Metálico) y Herbazales Inundables.
	11	Se mezcla entre sí: Infraestructura Vial Material de Asfalto, Material de Lastre, Suelo Desnudo y en pequeña proporción con Zonas Pobladas
	12	Se mezcla entre sí: Malanga, esta cobertura se confunde con cultivos como Palma Africana y Mosaico Agropecuario, debido a que sus niveles digitales son muy parecidos. Tampoco se logran discriminar completamente claro, cultivos con superficies pequeñas como son Maíz, Palmito, Café, Cacao y Frutales.
<p>RESULTADOS: Engloba DISCUSIÓN, BONDADES y LIMITANTES.</p> <p>DISCUSIÓN: Da los elementos que introducen al lector a los resultados obtenidos por el algoritmo en forma general, en que formato presenta los datos (Raster o Vector) y el número de coberturas clasificadas.</p> <p>BONDADES: Indica las coberturas mejor clasificadas por el algoritmo.</p> <p>LIMITANTES: Indica las coberturas que se mezclan claramente de la clasificación del algoritmo.</p> <p>OBSERVACIONES: Indicaciones encontradas en el algoritmo</p> <p>EN FORMA GENERAL: Da una explicación global de los resultados de la clasificación.</p> <p>FORMATO RESULTADO DE LA CLASIFICACIÓN: Modelo en que se representan los datos Raster o Vector.</p> <p>NÚMERO DE COBERTURAS CLASIFICADAS: Indica cuantas coberturas se presentarán mejor clasificadas por el algoritmo.</p> <p>NÚMEROS: Ejemplo de sectores de la imagen donde se observan BONDADES o DISCUSIONES.</p> <p>DESCRIPCIÓN: Explicación detallada de las OBSERVACIONES.</p>		

En la Figura IV.11, se indican las observaciones encontradas del algoritmo de Bhattacharya, en la imagen Ikonos. Se puede observar con mayor detalle en el mapa ANEXO 14.

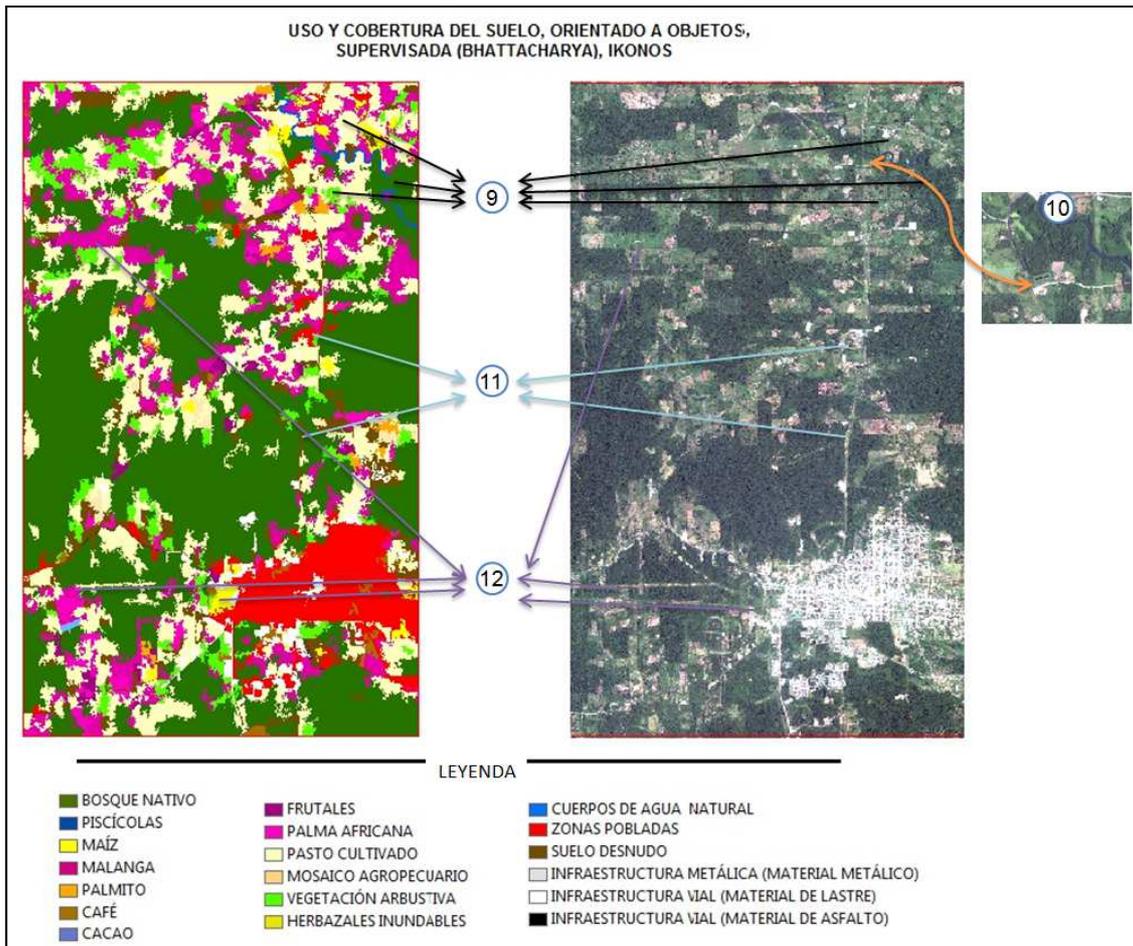


Figura IV.11. Observaciones del algoritmo de Bhattacharya, clasificación supervisada por objetos en la imagen Ikonos.

En la Tabla IV.19, se indican las discusiones, bondades y limitantes del algoritmo Ioseg, para la imagen Ikonos.

Tabla IV.19. Discusiones, Bondades y Limitantes del algoritmo Ioseg, clasificación no supervisada por objetos en la imagen Ikonos.

RESULTADOS	OBSERVACIONES	DESCRIPCIÓN
DISCUSIÓN	EN FORMA GENERAL	<p>Visualmente no existe una delimitación coherente de las clases. En esta clasificación no se tiene control del número de coberturas, y se agrupan en categorías muy generales que tienen niveles digitales muy similares.</p> <p>Por la Unidad Mínima Mapeable escogida, no existen coberturas con superficie menor a 1 hectárea.</p>

	FORMATO RESULTADO DE LA CLASIFICACIÓN.	Se obtuvo en formato Vector.
	NÚMERO DE COBERTURAS CLASIFICADAS .	Se lograron clasificar 5 coberturas temáticas para el nivel III de la leyenda temática.
BONDADES	13	Se observó que esta clasificación discrimina muy bien categorías a nivel muy generales como por ejemplo para el nivel I de la leyenda temática como pueden ser: Bosque, Áreas Agropecuarias y Zonas Antrópicas.
LIMITANTES	14	Se mezcla entre sí: Bosque Nativo, Vegetación Arbustiva y Herbazales Inundables.
	15	Todos los Cultivos Anuales, Permanentes y Mosaico Agropecuario, así como Vegetación Arbustiva son generalizados a Pasto Cultivado.
	16	Todo lo que es Infraestructura Vial (Material de Lastre, Material de Asfalto y Material Metálico), Suelo Desnudo y Zonas Pobladas Se mezcla entre sí.
	17	Cuerpos de Agua Natural se confundió con Material Vial (Material de Asfalto).
<p>RESULTADOS: Engloba DISCUSIÓN, BONDADES y LIMITANTES.</p> <p>DISCUSIÓN: Da los elementos que introducen al lector a los resultados obtenidos por el algoritmo en forma general, en que formato presenta los datos (Raster o Vector) y el número de coberturas clasificadas.</p> <p>BONDADES: Indica las coberturas mejor clasificadas por el algoritmo.</p> <p>LIMITANTES: Indica las coberturas que se mezclan claramente de la clasificación del algoritmo.</p> <p>OBSERVACIONES: Indicaciones encontradas en el algoritmo</p> <p>EN FORMA GENERAL: Da una explicación global de los resultados de la clasificación.</p> <p>FORMATO RESULTADO DE LA CLASIFICACIÓN: Modelo en que se representan los datos Raster o Vector.</p> <p>NÚMERO DE COBERTURAS CLASIFICADAS: Indica cuantas coberturas se presentarán mejor clasificadas por el algoritmo.</p> <p>NÚMEROS: Ejemplo de sectores de la imagen donde se observan BONDADES o DISCUSIONES.</p> <p>DESCRIPCIÓN: Explicación detallada de las OBSERVACIONES.</p>		

En la Figura IV.12 se indican las observaciones encontradas del algoritmo Iseseg, en la imagen Ikonos. Se puede observar con mayor detalle en el mapa ANEXO 15.

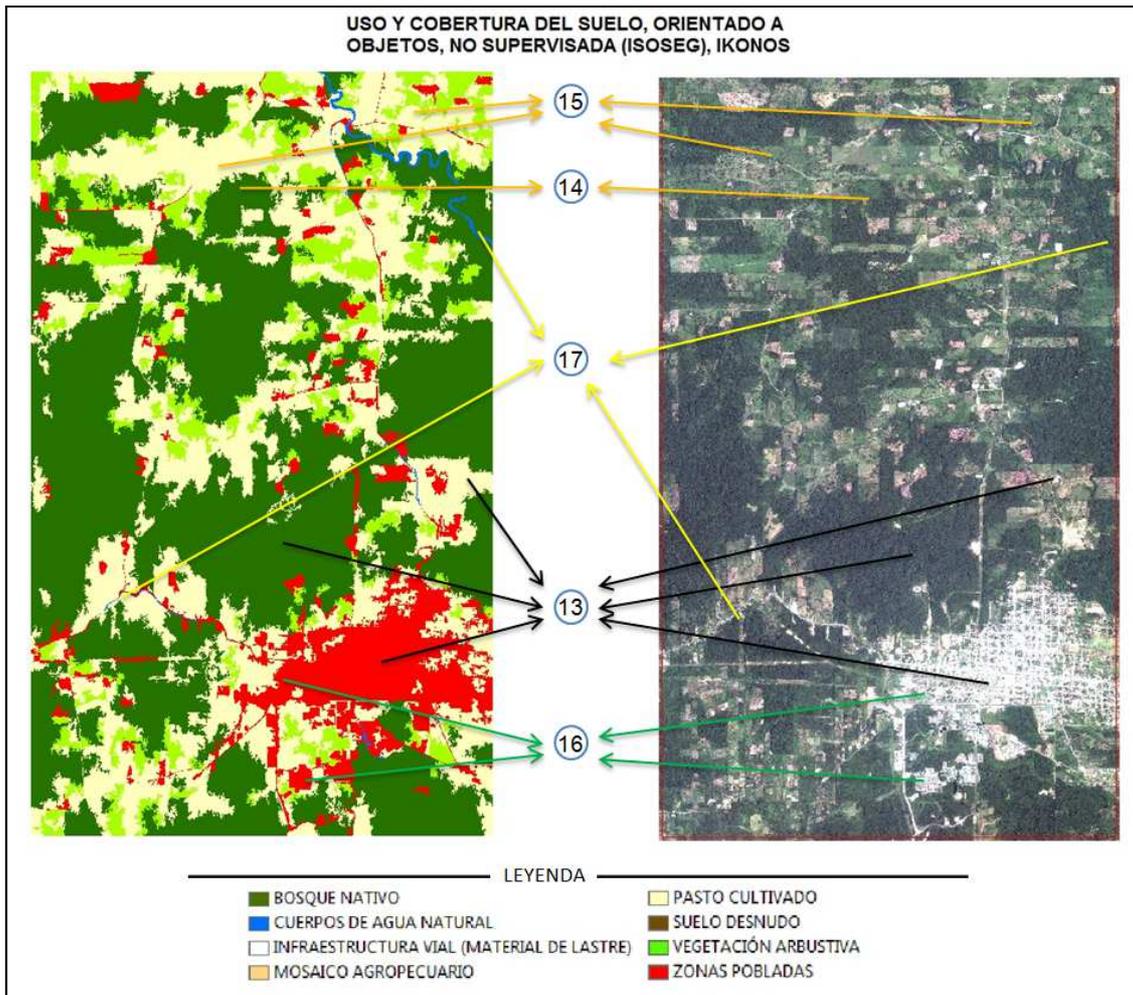


Figura IV.12. Observaciones encontradas del algoritmo Isoseg, en la imagen Ikonos.

4.9.2 DISCUSIÓN, BONDADES Y LIMITANTES, IMAGEN ASTER

En la Tabla IV.20, se indican las discusiones, bondades y limitantes del algoritmo de Máxima Probabilidad, para la imagen Aster.

Tabla IV.20. Discusiones, Bondades y Limitantes del algoritmo de Máxima Probabilidad, clasificación supervisada por píxeles en la imagen Aster.

RESULTADOS	OBSERVACIONES	DESCRIPCIÓN
DISCUSIÓN	EN FORMA GENERAL	Visualmente existe una delimitación coherente de las clases, sin embargo al ser una clasificación por píxeles se obtienen píxeles aislados dentro de las diferentes coberturas.
	FORMATO RESULTADO DE LA CLASIFICACIÓN.	Se obtuvo en formato Raster.
	NÚMERO DE COBERTURAS	Se lograron clasificar 10 coberturas temáticas para

	CLASIFICADAS .	el nivel II de la leyenda temática.
BONDADES	18	Se discriminaron correctamente las siguientes clases: Bosque Nativo, Cultivos Anuales, Mosaico Agropecuario, Vegetación Arbustiva, Cuerpos de Agua Natural y Suelo Desnudo.
LIMITACIONES	19	Se mezcla entre sí: Cultivos Permanentes, Pasto Cultivado, Infraestructura, Zonas Pobladas y en pequeña proporción con Suelo Desnudo.
	20	Dentro de la cobertura de Bosque Nativo se pueden encontrar píxeles aislados de Cultivos Permanentes y Pasto Cultivado.
	21	No se logró clasificar Piscícola y Herbazales Inundables.
<p>RESULTADOS: Engloba DISCUSIÓN, BONDADES y LIMITANTES.</p> <p>DISCUSIÓN: Da los elementos que introducen al lector a los resultados obtenidos por el algoritmo en forma general, en que formato presenta los datos (Raster o Vector) y el número de coberturas clasificadas.</p> <p>BONDADES: Indica las coberturas mejor clasificadas por el algoritmo.</p> <p>LIMITANTES: Indica las coberturas que se mezclan claramente de la clasificación del algoritmo.</p> <p>OBSERVACIONES: Indicaciones encontradas en el algoritmo</p> <p>EN FORMA GENERAL: Da una explicación global de los resultados de la clasificación.</p> <p>FORMATO RESULTADO DE LA CLASIFICACIÓN: Modelo en que se representan los datos Raster o Vector.</p> <p>NÚMERO DE COBERTURAS CLASIFICADAS: Indica cuantas coberturas se presentarán mejor clasificadas por el algoritmo.</p> <p>NÚMEROS: Ejemplo de sectores de la imagen donde se observan BONDADES o DISCUSIONES.</p> <p>DESCRIPCIÓN: Explicación detallada de las OBSERVACIONES.</p>		

En la Figura IV.13, se indican las observaciones encontradas del algoritmo de Máxima Probabilidad, en la imagen Ikonos. Ver el mapa ANEXO 16.

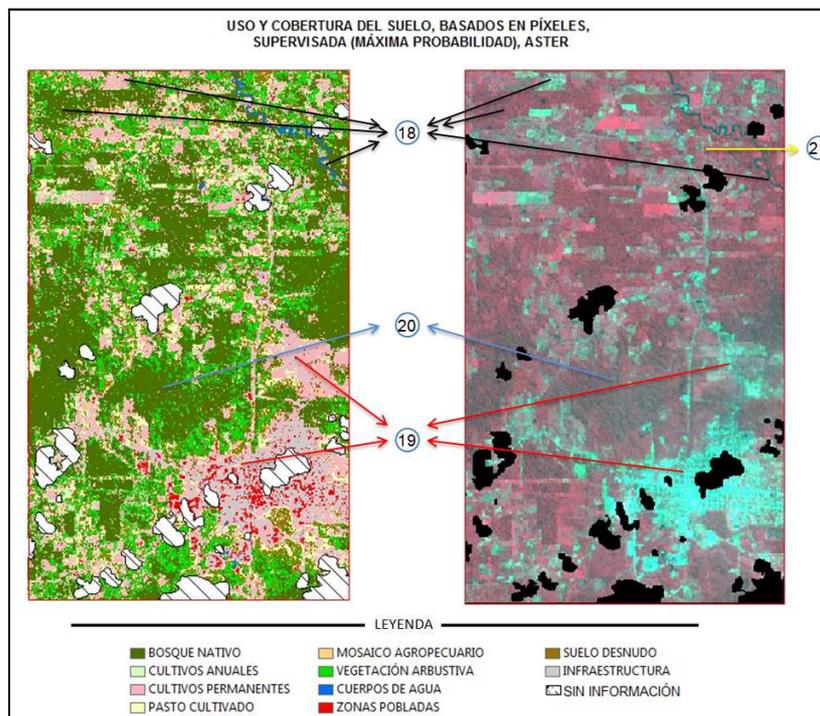


Figura IV.13. Observaciones del algoritmo de Máxima Probabilidad, clasificación supervisada por píxeles en la imagen Aster.

En la Tabla IV.21, se indican las discusiones, bondades y limitantes del algoritmo Isodata, para la imagen Aster.

Tabla IV.21. Discusiones, Bondades y Limitantes del algoritmo Isodata, clasificación no supervisada por píxeles en la imagen Aster.

ALGORITMO ISODATA, CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA POR PÍXELES EN LA IMAGEN ASTER.		
RESULTADOS	OBSERVACIONES	DESCRIPCIÓN
DISCUSIÓN	EN FORMA GENERAL	Visualmente existe una delimitación moderadamente aceptable de las clases, además ser una clasificación por píxeles se obtienen píxeles aislados dentro de las diferentes coberturas.
	FORMATO RESULTADO DE LA CLASIFICACIÓN.	Se obtuvo en formato Raster.
	NÚMERO DE COBERTURAS CLASIFICADAS .	Se lograron clasificar 6 coberturas temáticas para el nivel II de la leyenda temática.
BONDADES	22	Se discriminaron moderadamente bien Bosque Nativo, Cultivos Anuales, Pasto Cultivado, Suelo Desnudo, Infraestructura y Zonas Pobladas.
LIMITANTES	23	Infraestructura se mezcla mucho con Suelo Desnudo.
	24	Zonas Pobladas absorbió las clases de Infraestructura y Cuerpos de Agua Natural.
	25	Pasto Cultivado absorbió las clases de, Cultivos Permanentes, Mosaico Agropecuario, Piscícolas, Vegetación Arbustiva y Herbazales Inundables
<p>RESULTADOS: Engloba DISCUSIÓN, BONDADES y LIMITANTES. DISCUSIÓN: Da los elementos que introducen al lector a los resultados obtenidos por el algoritmo en forma general, en que formato presenta los datos (Raster o Vector) y el número de coberturas clasificadas. BONDADES: Indica las coberturas mejor clasificadas por el algoritmo. LIMITANTES: Indica las coberturas que se mezclan claramente de la clasificación del algoritmo. OBSERVACIONES: Indicaciones encontradas en el algoritmo EN FORMA GENERAL: Da una explicación global de los resultados de la clasificación. FORMATO RESULTADO DE LA CLASIFICACIÓN: Modelo en que se representan los datos Raster o Vector. NÚMERO DE COBERTURAS CLASIFICADAS: Indica cuantas coberturas se presentarán mejor clasificadas por el algoritmo. NÚMEROS: Ejemplo de sectores de la imagen donde se observan BONDADES o DISCUSIONES. DESCRIPCIÓN: Explicación detallada de las OBSERVACIONES.</p>		

En la Figura IV.14, se indican las observaciones encontradas del algoritmo Isodata, en la imagen Aster. Se puede observar con mayor detalle en el mapa ANEXO 17.

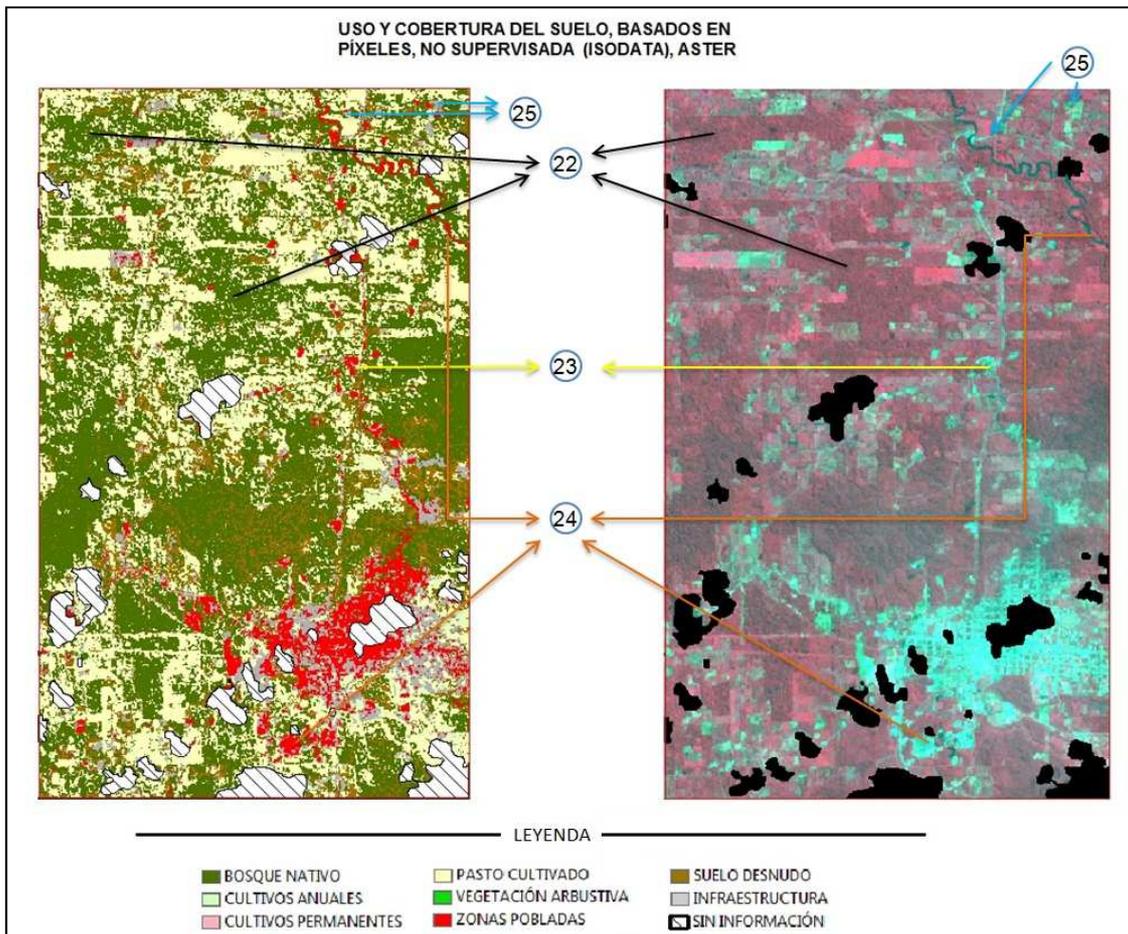


Figura IV.14. Observaciones del algoritmo Isodata, clasificación no supervisada por píxeles en la imagen Aster.

En la siguiente tabla, se indican las discusiones, bondades y limitantes del Algoritmo de Bhattacharya, para la imagen Aster.

Tabla IV.22. Discusiones, Bondades y Limitantes del algoritmo de Bhattacharya, clasificación supervisada por objetos en la imagen Aster.

RESULTADOS	OBSERVACIONES	DESCRIPCIÓN
DISCUSIÓN	EN FORMA GENERAL	<p>Visualmente existe una delimitación coherente de las clases, sobre todo de las clases que difieren mucho en sus niveles digitales, por ejemplo Bosque Nativo, Zonas Pobladas y Cuerpos de Agua Natural. Esta clasificación no presenta píxeles aislados, al contrario las unidades de coberturas se presentan homogéneas y también son clasificadas por su textura (debido a la segmentación).</p> <p>Por la Unidad Mínima Mapeable escogida, no existen coberturas con superficie menor a 4 hectáreas por lo tanto no se logró clasificar Piscícolas y Herbazales Inundables; además se observó que en algunos casos no se logra discriminar adecuadamente, coberturas alargadas y con poco ancho como por ejemplo Infraestructura Vial y Drenajes.</p>
	FORMATO RESULTADO DE LA CLASIFICACIÓN.	Se obtuvo en formato Vector.
	NÚMERO DE COBERTURAS CLASIFICADAS .	Se lograron clasificar 10 coberturas temáticas para el nivel II de la leyenda temática.
BONDADES	26	<p>Se discriminaron correctamente, Cuerpos de Agua Natural, Zonas Pobladas, Pasto Cultivado, Cultivos Anuales y Cultivos Permanentes.</p> <p>Moderadamente bien se lograron discriminar Bosque Nativo y Vegetación Arbustiva.</p>
LIMITANTES	27	Se mezcla entre sí: Suelo Desnudo, Infraestructura y en un pequeño porcentaje Zonas Pobladas.
	28	Infraestructura no se logró discriminar adecuadamente.
	29	Mosaico agropecuario se mezcla en un pequeño porcentaje con Pasto Cultivado y Cultivos Permanentes.
<p>RESULTADOS: Engloba DISCUSIÓN, BONDADES y LIMITANTES. DISCUSIÓN: Da los elementos que introducen al lector a los resultados obtenidos por el algoritmo en forma general, en que formato presenta los datos (Raster o Vector) y el número de coberturas clasificadas. BONDADES: Indica las coberturas mejor clasificadas por el algoritmo. LIMITANTES: Indica las coberturas que se mezclan claramente de la clasificación del algoritmo. OBSERVACIONES: Indicaciones encontradas en el algoritmo EN FORMA GENERAL: Da una explicación global de los resultados de la clasificación. FORMATO RESULTADO DE LA CLASIFICACIÓN: Modelo en que se representan los datos Raster o Vector. NÚMERO DE COBERTURAS CLASIFICADAS: Indica cuantas coberturas se presentarán mejor clasificadas por el algoritmo. NÚMEROS: Ejemplo de sectores de la imagen donde se observan BONDADES o DISCUSIONES. DESCRIPCIÓN: Explicación detallada de las OBSERVACIONES.</p>		

En la Figura IV.15, se indican las observaciones encontradas del Algoritmo de Bhattacharya, en la imagen Aster. Ver el mapa ANEXO 18.

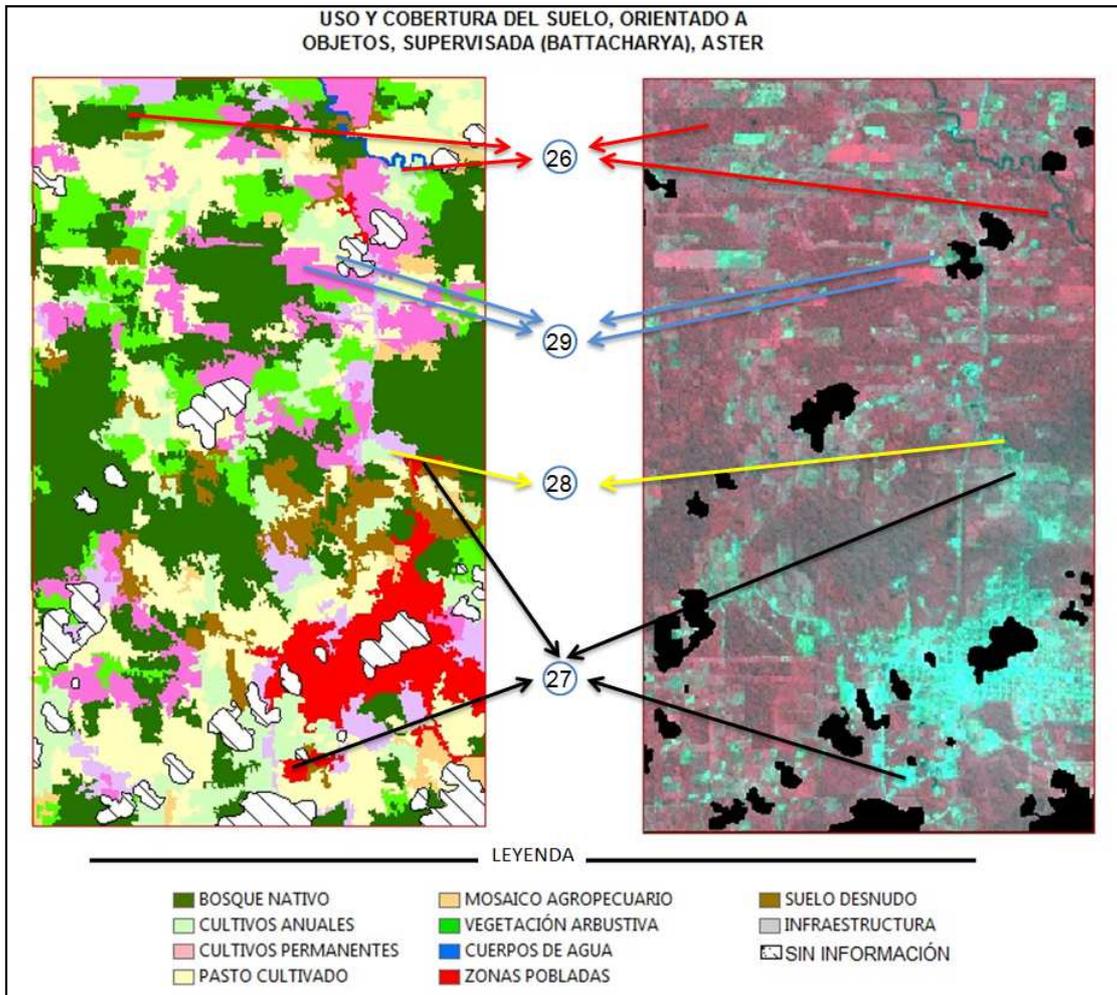


Figura IV.15. Observaciones del algoritmo de Bhattacharya, clasificación supervisada por objetos en la imagen Aster.

En la Tabla IV.23, se indican las discusiones, bondades y limitantes del algoritmo Ioseg, para la imagen Aster.

Tabla IV.23. Discusiones, Bondades y Limitantes del algoritmo de Bhattacharya, clasificación supervisada por objetos en la imagen Aster.

RESULTADOS	OBSERVACIONES	DESCRIPCIÓN
DISCUSIÓN	EN FORMA GENERAL	Visualmente no existe una delimitación coherente de las clases. En esta clasificación no se tiene control del número de coberturas, y las diferentes clases se mezclan entre sí.

		Por la Unidad Mínima Mapeable escogida, no existen coberturas con superficie menor a 4 hectáreas, por lo tanto no se logró clasificar Piscícolas y Herbazales Inundables.
	FORMATO RESULTADO DE LA CLASIFICACIÓN.	Se obtuvo en formato Vector.
	NÚMERO DE COBERTURAS CLASIFICADAS .	Se lograron clasificar 5 coberturas temáticas para el nivel II de la leyenda temática.
BONDADES	30	Se discriminaron medianamente Cultivos Permanentes.
LIMITANTES	31	Se mezcla entre sí: Bosque Nativo, Cultivos Anuales, Pasto Cultivado, Mosaico Agropecuario, Vegetación Arbustiva, Cuerpos de Agua Natural, Zonas Pobladas, Suelo e Infraestructura.
<p>RESULTADOS: Engloba DISCUSIÓN, BONDADES y LIMITANTES.</p> <p>DISCUSIÓN: Da los elementos que introducen al lector a los resultados obtenidos por el algoritmo en forma general, en que formato presenta los datos (Raster o Vector) y el número de coberturas clasificadas.</p> <p>BONDADES: Indica las coberturas mejor clasificadas por el algoritmo.</p> <p>LIMITANTES: Indica las coberturas que se mezclan claramente de la clasificación del algoritmo.</p> <p>OBSERVACIONES: Indicaciones encontradas en el algoritmo</p> <p>EN FORMA GENERAL: Da una explicación global de los resultados de la clasificación.</p> <p>FORMATO RESULTADO DE LA CLASIFICACIÓN: Modelo en que se representan los datos Raster o Vector.</p> <p>NÚMERO DE COBERTURAS CLASIFICADAS: Indica cuantas coberturas se presentarán mejor clasificadas por el algoritmo.</p> <p>NÚMEROS: Ejemplo de sectores de la imagen donde se observan BONDADES o DISCUSIONES.</p> <p>DESCRIPCIÓN: Explicación detallada de las OBSERVACIONES.</p>		

En la Figura IV.16, se indican las observaciones encontradas del algoritmo Isoleg, en la imagen Aster. Se puede observar con mayor detalle en el mapa ANEXO 19.

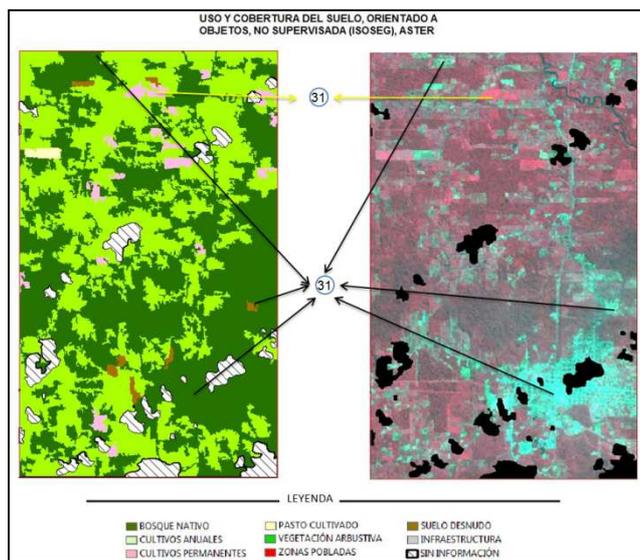


Figura IV.16. Observaciones del algoritmo Isoleg, clasificación supervisada por objetos en la imagen Aster.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Al finalizar el proyecto se ha logrado evaluar y contrastar los métodos de clasificación basados en píxeles con aquellos métodos orientados a objetos, de esta forma se han alcanzado los objetivos planteados en el tema de proyecto de grado, de buscar el método más apropiado para interpretar cobertura y uso del suelo, en imágenes de moderada y alta resolución.

Para la imagen Ikonos el mejor clasificador es el orientado a objetos, algoritmo de Bhattacharya obteniendo un valor de 0.49 en el índice Kappa, correspondiente a una clasificación buena. Los clasificadores de Isodata, Máxima Probabilidad e Isoseg, tuvieron un índice Kappa razonable obteniendo valores de 0.39, 0.36 y 0.33 respectivamente.

Para la imagen Aster el mejor clasificador es el de píxeles, algoritmo de Máxima Probabilidad obteniendo un valor de 0.47 en el índice Kappa, correspondiente a una clasificación buena. Los clasificadores de Bhattacharya e Isodata, tuvieron un índice Kappa razonable obteniendo valores de 0.29 y 0.22, mientras que el algoritmo Isoseg obtuvo un índice Kappa de -0.02 correspondiente a una clasificación pésima.

Se concluye que en relación a los avances tecnológicos y al apareamiento de imágenes satelitales de mayor resolución espacial, en las que se puede observar mayor detalle, se requiere el uso de nuevas metodologías de clasificación. Así se ha comprobado que para imágenes de alta resolución el método orientado a objetos, tiene un mejor ajuste. Mientras que para las imágenes de moderada resolución, el método por píxel es mejor.

Utilizando la metodología y las matrices de confusión, estas brindan una herramienta importantísima para la valoración de clasificaciones de imágenes satelitales.

Utilizando una unidad mínima visible de 4 x 4 mm, luego de realizar pruebas para la imagen Ikonos, en una escala 1:25.000, la mejor UMM es de 1 Ha; que corresponde a un parámetro de área en la segmentación de 625 píxeles y después de realizar pruebas, se determinó que el mejor valor de similitud es de 5. Mientras que para la imagen Aster, en una escala 1:50.000, la mejor UMM es de 4 Ha; que corresponde a un parámetro de área en la segmentación de 117 píxeles y después de realizar pruebas, se determinó que el mejor valor de similitud es de 1.

Se concluye que si se cambia el valor de la unidad mínima visible de 4 x 4 mm a otro, esto alterará el valor de la UMM, lo que cambiará a su vez, el parámetro de área en la segmentación. Luego de realizadas pruebas se confirmó que si se aumenta el valor de similitud, es decir se acerca a 1, los segmentos tienden a ser más detallados, mientras que si se aleja de 1 los segmentos tienden a generalizarse. Mientras que efectuadas pruebas para el parámetro del área en la segmentación, se confirmó que mientras tenga un valor menor los segmentos poseen más detalle, mientras que estén con un valor mayor las regiones son mayores y abarcan más coberturas.

Además se concluyó que de los programas comerciales como por ejemplo Erdas o PCI, existen nuevos programas libres, como por ejemplo Spring, y nuevos algoritmos para clasificar imágenes y obtener buenos resultados. Este tipo de herramientas son una alternativa que se puede utilizar para la generación de mapas de uso y cobertura del suelo a menor costo.

5.2 RECOMENDACIONES

Para clasificar imágenes de alta resolución espacial se recomienda utilizar la clasificación orientada por objetos, el algoritmo de Bhattacharya. Mientras que para clasificar imágenes de moderada resolución espacial se

recomienda utilizar la clasificación por píxeles, el algoritmo de Máxima Probabilidad.

Se sugiere hacer uso del Anexo 21, Lámina didáctica, donde se puede observar de una manera simple un resumen de las metodologías de clasificación y sus resultados..

Se sugiere realizar una buena planificación de campo tomando en cuenta todas las necesidades del proyecto, tales como: escala de trabajo, número de puntos para georreferenciación, control posicional, calibración y validación, selección del equipo GPS adecuado, búsqueda de la estación Base GPS más cercana y una apropiada organización logística.

Se recomienda utilizar la metodología para calcular la precisión GPS requerida aplicando la fórmula $PGPS = T \times 1/3$, que ayuda a seleccionar adecuadamente las características de los equipos GPS.

Para la validación de uso del suelo y cobertura de una imagen satelital, se sugiere la utilización de la fórmula dada por Chavez (2010), del Muestreo Aleatorio Estratificado, que ha dado buenos resultados. Es una fórmula universal que sirve para todo tipo de imágenes y para cualquier superficie de estudio. Se determinó que garantiza que todos los estratos de la clasificación sean muestreado y permite tener un control de donde se desea muestrear.

Se recomienda utilizar normas de control posicional, como por ejemplo la NMAS, que es una herramienta útil y necesaria para determinar la calidad cartográfica de los mapas de uso y cobertura del suelo, así como sus productos derivados.

Se sugiere estudiar la matemática de los diferentes algoritmos de clasificación para entender sus fortalezas y limitaciones.

Se recomienda utilizar la metodología descrita en este estudio para la planificación, estructuración y evaluación en la generación de mapas de uso y cobertura del suelo; en zonas que posean características similares a las de este proyecto, tales como pendiente baja a nula y con mucha variedad de

coberturas. Además se sugiere siempre hacer pruebas con los parámetros de similitud y área.

Luego de obtener un mapa de uso y cobertura utilizando cualquier tipo de algoritmo, se debe editar y depurar los resultados, para obtener un producto de mejor calidad; algunas herramientas que podrían ayudar a este fin son:

- Edición visual, donde visualmente se compara la clasificación, con la imagen, utilizando la experiencia del intérprete y otras fuentes de información (cartografía temática auxiliar, modelos digitales de elevación, fotografías aéreas, consulta a especialistas así como conocedores del área de estudio en campo).
- Llenar los vacíos de información de nubes y sombras de las mismas, con imágenes complementarias que permitan alcanzar la misma escala de trabajo.
- La utilización de filtros para eliminar los píxeles asilados por ejemplo un filtro modal y de filtros de suavizado, donde se suavisan los bordes de las coberturas.
- Para cuantificar la información se sugiere la ayuda de tablas dinámicas en torno a las coberturas de uso del suelo obtenidas, estas ayudan a realizar un análisis de la información resultante de forma más entendible y resumida para los procesos de análisis y toma de decisiones posteriores.

Es recomendable que no exista, mucho desfase entre la fecha de toma de una imagen satelital y las salidas de campo para minimizar el riesgo de cometer errores de interpretación.

Se recomienda la utilización y difusión de programas libres tales como Spring que poseen nuevos algoritmos de clasificación y permiten obtener buenos resultados en la generación de mapas de uso y cobertura del suelo.

Se sugiere hacer estudios ampliados de la UMM o tesis en coordinación con el Consejo Nacional de Geoinformática (CONAGE), para determinar estándares que se ajusten a la realidad nacional y que puedan ser usados para la

generación de los diferentes mapas de uso y cobertura del suelo a diferentes escalas de trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- Alves, D. S. Ajuste da média e da variancia das bandas espectrais. São José dos Campos, INPE, 1995.
- Ardizzone J, Curso Internacional para el Tratamiento Digital de Imágenes de Satélite con Aplicación Cartográfica, Instituto Geográfico Nacional de España, España, 1998.
- Ariza F, I Curso de Expertos Universitarios. Gestión y uso de la información geográfica en la administración pública, Universidad de Jaen, Sevilla, 2009.
- Ariza López, F; Atkinson Gordo, A, Metodologías de Control Posicional: Visión General y Análisis Crítico. Informe al CT-148 de AENOR, Universidad de Jaén, Jaén, Noviembre de 2006.
- Arozarena Villa, A, III Curso de Procesamiento Digital de Imágenes de Satélite, “Aplicaciones cartográficas de la Teledetección”, Antigua, Guatemala, 2004.
- Aster User Handbook, Version 2, Abrams, M, Hook, S, Jet Propulsion Laboratory 4800 Oak Grove Dr. Pasadena, CA 91109. Ramachandran B, EROS Data Center, Sioux Falls, SD 57198.
- Atapuma, F, “Diseño y construcción de un prototipo usando un acelerómetro tridimensional para la determinación de movimiento de un vehículo”, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2009.
- Atkinson, A.D.J.. Los diferentes test para el control de calidad posicional en cartografía. XII Congreso Int. de Ingeniería Gráfica, Badajoz, 2001.
- Ballar, D.H.; Brown, M.C. Region growing. In: Computer vision. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1992.
- Barret, E.C. y Curtis, L.F, *Introduction to Environmental Remote Sensing*, 4.^a ed, Cheltenham, Stanley Thornes Publishers Ltd, 1999
- Bins, L.; Fonseca, L.; Erthal, G. Satellite imagery segmentation: a region growing approach. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8, 1996, Salvador. Anais... INPE, 1996. p. 677-680. ISBN 85-17-00014-5.

- Borsotti, M.; Campadelli, P.; Schettini, R. Quantitative evaluation of color image segmentation results. *Pattern Recognition Letters*, v. 19, n. 8, p. 741-747, 1998.
- CAMPBELL, J.B. *Introduction to remote sensing*. New York, The Guilford Press, 1987. 551p.
- Cañadas Cruz, L. *El Mapa Bioclimático del Ecuador*. Banco Central del Ecuador, Quito 1983.
- Carnel, Y., Dean, D., and Flather, C. "Combining Location and Classification Error Sources for Estimating Multi-Temporal Data Base Accuracy". *PE&RS*, 2001.
- Carrillo, Carlos, Villagrán, Brither, "Implementación de un prototipo de una plataforma de tele-cuidado por medio de tele-ubicación de personas en riesgo (ancianos, discapacitados, epilépticos, enfermos del corazón, diabéticos, Alzheimer, etc.)", Junio 2008.
- Casanova, Leonardo, *Topografía Plana*, 1, Taller de Publicaciones de Ingeniería, ULA, Merida, 2002.
- Chuvieco Emilio, *Fundamentos de Teledetección Espacial*, 3ra edición revisada, Editorial Rialp, S.A. Alcala – España, 1996.
- Chuvieco, Emilio, *Teledetección Ambiental* tomo 1, 3ra edición, Editorial Ariel, S.A, Barcelona – España, 2007.
- Cialek et al., *Positional Accuracy Handbook*, Minnesota, U.S. Geological Survey, October, 1990.
- Cinge Cia. Ltda, *Diagnostico y Plan de Manejo ambiental de la Planta de Envasado de GLP de Petroproducción*, Ecuador, 2007.
- Cisneros, David, "Reporte anual CEPGE - REGME No. 002", Lima - Perú, noviembre, 2010. (Disponible en http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol15/10_Cisneros_et_al_Reporte_IGM_Ecuador.pdf)
- Colombia. Parte 3, Estándar nacional para la precisión de los datos espaciales (EPDE). Comité Técnico Incotec 34. 2006. (Disponible en <http://codazzi4.igac.gov.co/comite034/documentos/posicionamiento/parte3.pdf>)

- Congalton, R.G; Green, K. Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices. New York: Lewis Publishers, 1998. 137p.
- Cracknell, A.P, *The Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)*, Londres, Taylor & Francis, 1997.
- Cross, A.M.; Mason, D.C.; Dury, S.J. Segmentation of remotely-sensed images by a split-and-merge process. *International Journal of Remote Sensing*, 1988.
- De Oliveira, J.C. and da Silva, J.M.F. Influência da segmentação no proceso de classificação por região. 2005.
- De Rezende Nascimento, Paulo Sérgio, Avaliação de Técnicas de Segmentação e classificação por regiões em imagens Landsat – TM visando o mapeamento de unidades de paisagem na Amazônia. Tese (Mestrado em sensoriamento Remoto) - INPE, São José dos Campos, Fevereiro de 1997.
- Department of Transportation South Dakota State, Survey Manual, South Dakota, USA, 2007. Disponible en http://www.sddot.com/pe/roaddesign/survey_manual.asp
- DPI. Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas _ Spring, 2006. (Disponible en <http://www.dpi.inpe.br/spring/>)
- Estes, J. E. y Simonett , D. S.: “Fundamentals of image intgerpretation”, en R. G. Reeves (ed.), *Manual of Remote Sensing*, Falls Church, American Society of Photogrammetry, 1975.
- European Commission, *Corine Land Cover: Guide Technique*, Luxemburgo, Office for official publications of the European Union, 1993.
- Erdas Image, Field Guide, capítulo rectificación, Leica Geosystem, EE.UU, 2005.
- García, David, “Sistema GNSS (GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM)”, Universidad Autónoma de Madrid, Escuela Politécnica Superior, Proyecto de fin de Carrera, enero 2008.
- García E, Análisis visual de imágenes, Módulo VII: Sistemas de Información Geográfica y Teledetección , Departamento de Geología, Universidad de León, España, 2006.

- Gong, P.; Howart, PL J. An assessment of some factors influencing multispectral land-cover classification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Bethesda. V.56, n.5, p.597-603, 1990.
- Gonzales, R.C.; Wintz, P. *Digital image processing*. Proding, Addison Wesley, 1987.
- Halarick, R.M.; Shapiro, L.G. *Image Segmentation techniques*. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1985.
- Hofmann-Wellenhof, B. et al, *Global Positioning system, Theory and practice*. Springer-Verlag, Wien, New York, 1994.
- Huerta, Eduardo; Mangiaterr, Aldo; Noguera Gustavo, *Posicionamiento satélite*, tomo III, 1ª .ed, UNR Editora, Universidad Nacional de Rosario, 2005.
- INPE. Spring: Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas. Manual de ajuda, 2004.
- Jakobson y Vauglin, Report of a questionnaire on data quality in National Mapping Agencies. CERCO Working Group on Quality. Comité Europeen de Responsibles da la Cartographie Officielle. Marne-la-Vallée, 2002.
- Jensen, J.R. *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective*. New Jersey: Prentice-Hall, 1996. 316p.
- Kai, L.; Muller,J.P. Segmentation satellite imagery: a region growing scheme. In: 1991 International Geoscience Remote Sensing Symposium. 11., Helsink, 1991.
- Korthing T, *Classificação de imagens por regiões*. São José dos Campos, 2006.
- Landis, J; Kock, G.G. The measurements of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 1977.
- Lillesand, T. M.; Kiefer, R. W.; Chipman, J.W. *Remote sensing and image interpretation*. New York: John Miley & Sons. 5. Ed. 2004. 763 p.
- López Vizoso, J.M, *Cartografía automática de la ocupación del suelo en la comarca ferrolana*, Estudios territoriales, España, 1987.
- Mauger, A,J. Comparison of various remote sensing and spectral radiometer instruments, April 2003.

- (Disponível em http://eastfire.gmu.edu/EOS759_06/readings/Mauger2003.pdf)
- McGwire, K.C. "Cross-Validated Assessment of Geometric Accuracy". PE&RS, vol 62, 1996.
- Mergerson, J.W. (1981): "Crop area estimates using ground gathered and Landsat data: A multitemporal approach", *15th Intern. Symp. Rem. Sens. of Environment*, Ann Arbor, pp, 1211-1218.
- Mira de Espindola, Giovana, Ajuste de Parâmetros em algoritmos de segmentação de imagens por crescimento de regiões. . Tese (Mestrado em sensoriamento Remoto) - INPE, São José dos Campos, 2007.
- Moik, J.G. Digital processing of remotely sensed images. Washington, DC. NASA, 1980.
- Moreira, M.A. Fundamento do sensoriamento remoto e metodologías de aplicação. 2.ed. Viçosa: UFV, 2005. 307p.
- Morrison, J, "Spatial data quality". Elements of spatial data quality. Guptill, S.C. and Morrison, J.L. (eds). International Cartographic Association. Pergamon Press, Oxford, 1995.
- Novo, E. M. L. M. Sensoriamento remoto: principios e aplicações, Ed. Edgard Blucher LTDA, 307p, 1992.
- Pekkarinen, A. A method for the segmentation of very high spatial resolution images of forested landscapes. International Journal of Remote Sensing, v. 23, n. 14, p. 2817- 2836, 2002.
- Pereyra, F.X. Geomorfología Urbana de San Carlos de Bariloche y su Influencia en los Peligros Naturales, Dirección de Geología Ambiental y Aplicada, Buenos Aires, Argentina, 2007.
- Reuter, Fabian, "Sistemas de Información Geográfica (SIG) Modelos – Datos – Información – Base de Datos", *serie didáctica*, tomo 25, 79p, Mayo 2006.
- Reuter, Fabian, "Sistemas de Información Geográfica (SIG) Operaciones – Análisis – Desarrollo – Proyectos", *serie didáctica*, tomo 26, 50p, Mayo 2006.
- Ribeiro de Mendoza, L, Utilização de Algoritmos de classificação em uma imagem Ikonos para o Mapeamento de Feições. Tese (Mestrado em

- Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil, 2006.
- Ruano E, Control de la Exactitud Posicional en Cartografía, primer borrador, Instituto Geográfico Militar, Quito, Ecuador, 2008.
 - Santos, R, Princípios e aplicações de mineração de dados. Technical report, INPE. 2006.
 - Sarría, Francisco, *Técnicas de teledetección aplicadas a la gestión de los recursos hídricos*, Murcia, mayo – junio, 2008 (Disponible en <http://ocw.um.es/ciencias/herramientas-de-teledeteccion-aplicadas-a-la/material-de-clase>)
 - Schoenmakers, R.P.H.M.; Wilkinson, G.G.; Schouten, T.E. Segmentation of remotely-sensed images: a re-definition for operational applications. In: 1991 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'91, Espoo, Finland, June 3-6, 1991. Digest. Piscataway, IEEE, 1991.
 - Schowengerdt, R.A. (1983): *Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing*, Nueva York, Academic Press.
 - Sierra, R. et al. Propuesta preliminar de clasificación para el Ecuador continental. Pr. INEFAN. Quito, 1999.
 - Silva, J, “Generación del Modelo Matemático Ionosférico Local, Mediante Medidas de Falsa Distancia a partir de Estaciones de Monitoreo Continuo GPS”, Proyecto de Grado de la Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente, Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, Ecuador, Diciembre, 2009.
 - Simpson, J.J y Gobat, J. I, “*Improved Cloud Detection for Daytime AVHRR Scenes over Land*”, Remote Sensing of Environment, 55, pp. 21-49, 1996.
 - Suárez, W, “Generación de un Modelo de Retraso Troposférico a partir de Medidas Meteorológicas Superficiales y GPS en los Puntos ESPECIE-S061”, Proyecto de Grado de la Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente, Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, Ecuador, Octubre, 2009.

- Strahler, A.H. (1980): "The use of prior probabilities in maximum likelihood classification of remotely sensed data", *Remote Sensing of Environment*, 10, pp. 135-163.
- Subcommittee for Base Cartographic Data Federal Geographic Data Committee, Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy, EE.UU, 1998. (Disponible en <http://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-standards-projects/accuracy/part3/chapter3>)
- Swain, P.H. y Davis, S.M. (eds.) (1978): *Remote Sensing: The Quantitative Approach*, Nueva York, McGraw-Hill.
- Torrecillas, C, Introducción al Sistema de Posicionamiento Global, Sevilla, España, Mayo, 2008.
- Valerio, A. y Ledesma, L.L. (1981): "Natural Resources inventories by computer-satellite mapping techniques in Chaco state, Argentine Republic, South America", *15th Intern. Symp. Rem. Sens. of Environment*, Ann Arbor, pp. 1327-1338.
- Woodcock, C.; Harward, V. J. Nested-hierarchical scene models and image segmentation. *International Journal of Remote Sensing*, v. 13, n. 16, p. 3167-3187, 1992.
- Xu, Y.; Olman, V.; Uberbacher, C. A segmentation algorithm for noisy images: design and evaluation. *Pattern Recognition Letters*, v. 19, n. 13, p. 1213-1224, 1998.
- Zucker, S. W. Region growing: childhood and adolescence. *Computer Graphics and Image Processing*, v. 15, p. 382-399, 1976.

- **PAGINAS WEB**

- <http://www.aeroterra.com/p-IKONOS.html>, mayo del 2010.
- <http://asterweb.jpl.nasa.gov/bibliography.asp>, marzo del 2010.
- <http://www.astromia.com/glosario/geoestacionario.htm>, octubre 2011.
- http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/images/blsamp_e.gif, junio 2010
- http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/images/nnsamp_e.gif, junio 2010
- <http://www.dibujotecnico.com/saladeestudios/teoria/normalizacion/Escalas/Escalas.asp>, octubre, 2010.
- <http://www.eptisa.com/es/mercados/tecnologias-de-la-informacion>, mayo del 2010.
- http://www.geogra.uah.es/gisweb/1modulosespanyol/introduccion/gis/module/gist_raster.htm, junio 2010
- http://www.geoportaligm.gov.ec:8080/portal/articulos-tecnicos/regme-cepge-1/copy_of_red-gnss-de-monitoreo-continuo-del-ecuador-regmey, 28 Julio 2010.
- <http://www.inec.gob.ec/estadisticas/>, octubre 2011
- <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/ImgSatelite/resolucion.aspx>, abril 2010
- <http://jean-paul.cornec.pagesperso-orange.fr/gnss.htm>, junio, 2010.
- http://marswiki.jrc.ec.europa.eu/wikicap/images/6/63/Cc_resample.png, junio 2010
- http://ocw.upm.es/ingenieria-cartografica-geodesica-y-fotogrametria/topografia-cartografia-y-geodesia/contenidos/PRACTICAS/GPS/practicas_gps.pdf, mayo 2011.
- https://www.serina.es/empresas/riegosdelaltoaragon/JornadaTeledeteccion/01_Casterad.pdf, enero 2011.
- http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol15/10_Cisneros_et_al_Reporte_IGM_Ecuador.pdf, octubre 2011.
- <http://www.spacemaging.com/products/IKONOS>, Julio de 2006.

- <http://sopac.ucsd.edu/cgi-bin/dbDataBySite.cgi>, agosto 2010.
- http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Electromagnetic_spectrum-es.svg, 2011, Consultado 23 Agosto 2011.
- http://qorganicauce.wikispaces.com/spectro+electromagnetico_LRAC_Espectroscopia, octubre 2011

ANEXOS

ANEXO	NOMBRE
ANEXO 1	MAPA UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO
ANEXO 2	FICHA TÉCNICA DE LA ESTACIÓN DE MONITOREO CONTINUO GPS AUCA.
ANEXO 3	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS GPS
ANEXO 4	MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE PUNTOS PARA LA GEORREFERENCIACIÓN DE LA IMAGEN IKONOS
ANEXO 5	MONOGRAFÍAS DE PUNTOS DE GEORREFERENCIACIÓN
ANEXO 6	MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE PUNTOS PARA EL CONTROL POSICIONAL DE LA IMAGEN IKONOS
ANEXO 7	MONOGRAFÍAS DE PUNTOS DE CONTROL POSICIONAL
ANEXO 8	MAPA DE GEORREFERENCIACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE PUNTOS PARA EL CONTROL POSICIONAL DE LA IMAGEN ASTER
ANEXO 9	PROCEDIMIENTO PARA POST PROCESO DE DATOS GPS
ANEXO 10	MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE PUNTOS DE CALIBRACIÓN
ANEXO 11	MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE PUNTOS DE VALIDACIÓN
ANEXO 12	MAPA DE USO Y COBERTURA DEL SUELO BASADOS EN PÍXELES, SUPERVISADO, IKONOS
ANEXO 13	MAPA DE USO Y COBERTURA DEL SUELO BASADOS EN PÍXELES, NO SUPERVISADO, IKONOS
ANEXO 14	MAPA DE USO Y COBERTURA DEL SUELO ORIENTADOS A OBJETOS, SUPERVISADO, IKONOS
ANEXO 15	MAPA DE USO Y COBERTURA DEL SUELO ORIENTADOS A OBJETOS, NO SUPERVISADO, IKONOS
ANEXO 16	MAPA DE USO Y COBERTURA DEL SUELO BASADOS EN PÍXELES, SUPERVISADO, ASTER
ANEXO 17	MAPA DE USO Y COBERTURA DEL SUELO BASADOS EN PÍXELES, NO SUPERVISADO, ASTER
ANEXO 18	MAPA DE USO Y COBERTURA DEL SUELO ORIENTADOS A OBJETOS, SUPERVISADO, ASTER
ANEXO 19	MAPA DE USO Y COBERTURA DEL SUELO ORIENTADOS A OBJETOS, NO SUPERVISADO, ASTER
ANEXO 20	MATRICES DE CONFUSIÓN
ANEXO 21	LÁMINA DIDÁCTICA