

ARK: <https://n2t.net/ark:/87558/tekhne.27.2.5>

Estudio bitemporal de la vegetación en los Llanos Centro-Orientales de Venezuela

Enrique Martínez¹, Julián García², Víctor Vilachá³, Gustavo Montes[†]

comartinez@gmail.com¹, julian@cartogeo.com², vvilacha@gmail.com³

<https://orcid.org/0009-0007-4767-7122>¹, <https://orcid.org/0009-0001-4444-9913>²,

<https://orcid.org/0009-0007-5940-9694>³,

Ingeoambiente, C.A¹, Cartogeo, C.A^{2,3}

Resumen

Mediante el análisis espacial de imágenes satelitales multiespectrales se estudiaron los cambios cualitativos y cuantitativos ocurridos entre abril de 1990 y enero de 2003 en la cobertura vegetal de un sector de los Llanos Centrorientales (52.111 ha) en el suroeste del estado Anzoátegui. La selección, procesamiento y análisis de imágenes de archivo o adquiridas; la producción y verificación de mapas de imágenes de vegetación a escalas muy detalladas; y la recolección e interpretación de información ecológica extraída de productos derivados de estos mapas se realizó de manera multidisciplinaria.

Se utilizaron técnicas de clasificación multitemporal utilizando imágenes de satélite de media resolución (Landsat), estableciendo como línea base abril de 1990 y comparándola con la situación de enero de 2003. Así, se detectaron y cuantificaron cambios en la vegetación entre ambas fechas. Además, se utilizaron imágenes satelitales de alta resolución (Ikonos) para validar áreas importantes de la imagen de enero de 2003, lo que permitió la producción de mapas detallados de la infraestructura actual. La inspección de campo incluyó un vuelo en helicóptero para verificar visualmente el resultado de la clasificación supervisada y obtener un registro fotográfico georreferenciado de las áreas que eran de especial interés para la verificación.

Palabras clave: Vegetación, imágenes Landsat, análisis multitemporal, detección de cambios, clasificación multiespectral.

Bitemporal study of vegetation in the Central-Eastern Plains of Venezuela

Abstract

Through spatial analysis of multispectral satellite images, the qualitative and quantitative changes that occurred between April 1990 and January 2003 were studied in the vegetation cover of a sector of the Central-Eastern Plains (52.111 ha) in the southwest of the Anzoátegui state. The selection, processing, and analysis of archival or acquired images; the production and verification of vegetation image maps at very detailed scales; and the collection and interpretation of ecological information extracted from products derived from these maps were carried out in a multidisciplinary manner.

Multi-temporal classification techniques were used using medium-resolution satellite images (Landsat), establishing April 1990 as a baseline and comparing it with the situation in January 2003. Thus, changes in vegetation between the two dates were detected and quantified. Additionally, high-resolution satellite imagery (Ikonos) was used to validate significant areas of the January 2003 image, enabling the production of detailed maps of the current infrastructure. The field inspection included a helicopter flight to visually verify the result of the supervised classification and obtain a georeferenced photographic record of the areas that were of special interest for verification.

Keywords: Vegetation, Landsat images, multitemporal analysis, change detection, multispectral classification.

Estudo bitemporal da vegetação nas planícies centro-orientais da Venezuela

Resumo

Através da análise espacial de imagens multiespectrais de satélite, foram estudadas as mudanças qualitativas e quantitativas ocorridas entre abril de 1990 e janeiro de 2003 na cobertura vegetal de um setor da Planície Centro-Leste (52.111 ha) no sudoeste do estado de Anzoátegui. A seleção, processamento e análise de imagens de arquivo ou adquiridas; a produção e verificação de mapas de imagens de vegetação em escalas muito detalhadas; e a coleta e interpretação das informações ecológicas extraídas dos produtos derivados desses mapas foram realizadas de forma multidisciplinar.

Foram utilizadas técnicas de classificação multitemporal utilizando imagens de satélite de média resolução (Landsat), estabelecendo abril de 1990 como linha de base e comparando-o com a situação de janeiro de 2003. Assim, foram detectadas e quantificadas alterações na vegetação entre as duas datas. Além disso, foram utilizadas imagens de satélite de alta resolução (Ikonos) para validar áreas importantes da imagem de Janeiro de 2003, permitindo a produção de mapas detalhados da infraestrutura actual. A inspeção de campo incluiu um voo de helicóptero para verificar visualmente o resultado da classificação supervisionada e obter registro fotográfico georreferenciado das áreas de especial interesse para verificação.

Palavras-chave: Vegetação, imagens Landsat, análise multitemporal, detecção de alterações, classificação multiespectral.

i. INTRODUCCIÓN

La región de los Llanos ocupa aproximadamente un tercio del territorio de Venezuela y a nivel fisiográfico han sido clasificados en Llanos Occidentales, Llanos Centrales y Llanos Orientales [1]. En el caso de los Llanos Orientales la característica fundamental que los diferencia de los llanos occidentales y centrales es la presencia de cuencas petrolíferas de gran producción [2], [3], [4].

A nivel geomorfológico el paisaje predominante en los Llanos Orientales son las altiplanicies, cuya vegetación natural está constituida por un mosaico de sabanas y bosques estacionalmente secos [5], [6]. Estas altiplanicies mismas han sido asiento de actividades agropecuarias, agroindustriales, forestales y petroleras [7], las cuales han modificado gran parte del paisaje y de la vegetación natural de esa región [8]. Los bosques secos deciduos y semideciduos de esas planicies orientales se presentan cubriendo pequeñas superficies [5]. Existe muy poca información sobre esos bosques [9], lo cual es particularmente llamativo si se toma en cuenta que los bosques secos a nivel tropical han sido incluidos entre los ecosistemas más amenazados del planeta y de Venezuela [10], [11].

Esta situación de deterioro de los bosques secos fue apreciada por la gerencia ambiental de empresa Sincor de Oriente, S.A. (Sincor), desde el comienzo de sus operaciones en el área de exploración y producción Zuata de la Faja Petrolífera del Orinoco en 1997, por lo que se tomaron acciones para contribuir con la conservación del ambiente y la biodiversidad [12]. En tal sentido se contrató a la empresa Tecnologías y Servicios Ambientales Geoclean, C.A., en asociación con Cartogeo, C.A., a lo fines de conocer y evaluar los cambios cualitativos y cuantitativos experi-

mentados por la vegetación natural de ese bloque de

producción, desde el inicio de las actividades de Sincor en 1997 hasta el año 2004 empleando imágenes satelitales.

La teledetección y sobre todo los datos de satélites multiespectrales, han sido utilizados como valiosas herramientas, determinantes a la hora de evaluar los cambios en las coberturas de la vegetación [13], [14]. En Venezuela también se han empleado las imágenes satelitales para estudiar la vegetación de los llanos a nivel regional y local [15]-[17] incluyendo las altiplanicies llaneras del estado Anzoátegui [8], [18]-[20].

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1.- Área de estudio

La investigación se realizó en el bloque de producción Sincor del área de producción Zuata de la Faja Petrolífera del Orinoco, ahora denominados Petrocedeño y Junín respectivamente [21]. El mismo está localizado al suroeste del pueblo de San Diego de Cabrutica, en el municipio Monagas al sur del estado Anzoátegui, Venezuela (8° 18' 09" – 8° 21' 48" N y 64° 56' 51" - 65° 01' 35" W), 130-164 m s.n.m., y abarca una extensión de 520 km² (Figura 1).

De acuerdo a la clasificación de Thornthwaite, el clima del área se define como semiárido-cálido (DdA'a') típico de la sabana tropical, biestacional con un periodo de 6 meses de lluvias (mayo a octubre) y 6 meses de sequía (noviembre a abril). La temperatura media anual es 26,2° C, correspondiente a un clima isotérmico de sabana Awí y la precipitación total media anual es de 890 mm, características de una zona de vida de Holdridge correspondiente al bosque seco tropical [12], [23], [24].

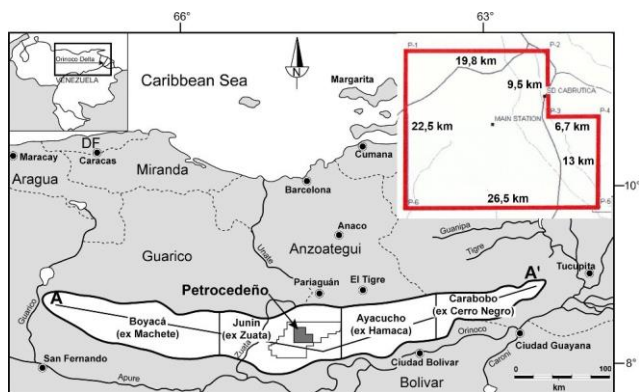


Figura 1. Ubicación del bloque de producción Petrocedeño (Sincor). Fuente: [22].

Desde el punto de vista geológico, la región está conformada por sedimentos de la Cuenca de Venezuela, de origen Terciario superior y Pleistoceno inferior [25]. El paisaje geomorfológico asociado a la zona de estudio está representado por altiplanicies disectadas de los llanos centro-orientales [26], [27] y el relieve característico es el de la Formación Mesa, donde predominan terrenos surcados por cárcavas activas y estabilizadas [1], de gravas ferruginosas endurecidas que coronan las llamativas formas fisiográficas que dan nombre a la unidad [2]. Los suelos son ácidos, con bajo contenido de materia orgánica, niveles muy bajos de bases intercambiables, baja retención de humedad y baja fertilidad natural, debido a una intensa pedogénesis y a una lixiviación prolongada [1], [6], [28]. Por otra parte, la hidrografía del bloque está conformada por: el morichal San Antonio, los ríos Claro, Mapipe, Negro, Quebradón, San Diego y las quebradas Canjilones y Palo a pique, entre los cuerpos de agua más relevantes [29].

En lo que respecta a la vegetación de acuerdo con el mapa de Huber y Alarcón [5], en la zona estudiada coinciden formaciones vegetales de diferentes ecosistemas de sabanas tales como los Llanos Centrales Altos, Mesas Orientales y Llanos Orientales. A nivel de campo se ha podido confirmar que dentro de la vegetación natural se encuentran bosques ribereños siempreverde y semisempreverde, palmares, morichales, bosques deciduos, matorrales deciduos, sabanas arboladas, y sabanas no arboladas [6], [12], [28], siendo los bosques de galería la formación vegetal que se encuentra en mejor estado de conservación [30]. Por otra parte, el bloque Petrocedeño se caracteriza por ser un complejo mosaico de sectores con diferentes grados de intervención antropogénicas, entre las que podemos mencionar: la infraestructura petrolera (pozos, estaciones de flujo, vialidad y demás corredores de servicios) y la ganadería extensiva [12].

2.2.- Obtención de datos y selección de imágenes

El éxito de muchas aplicaciones de la teledetección mejora considerablemente si se adopta un enfoque de múltiples vistas para la recopilación de datos [31]. En tal sentido para estudiar los cambios de uso y cobertura del suelo (LULC) acontecidos desde el inicio de operaciones del bloque Sincor, hasta la fecha del estudio, se consideró apropiado el enfoque multitemporal, donde los datos sobre un sitio son recopilados en más de una ocasión [32]. El método empleado en este trabajo fue el del análisis de detección de cambios [33], [34], el cual se define como "el proceso de identificar diferencias en el estado de un objeto o fenómeno observándolo en diferentes momentos". El marco de trabajo de la detección de cambios utiliza conjuntos de datos multitemporales para analizar cualitativamente los efectos temporales de los fenómenos y así cuantificar los cambios.

Para la detección de cambios en la vegetación se seleccionó la técnica de comparación posterior a la clasificación, la cual proporciona información cuantitativa del cambio entre dos momentos determinados [35], [36], [37]. En esta técnica

las imágenes bitemporales se rectifican y clasifican primero. Luego, las imágenes clasificadas se comparan para generar una matriz de cambios (Figura 2). Las clases para ambas imágenes deben ser idénticas para permitir la comparación uno a uno [38].

La selección de las imágenes satelitales fue realizada bajo criterios ecológicos y que fundamentalmente permitieran analizar el comportamiento de la vegetación [12], escogiéndose para tal propósito al sensor TM/ETM de la serie Landsat [39].

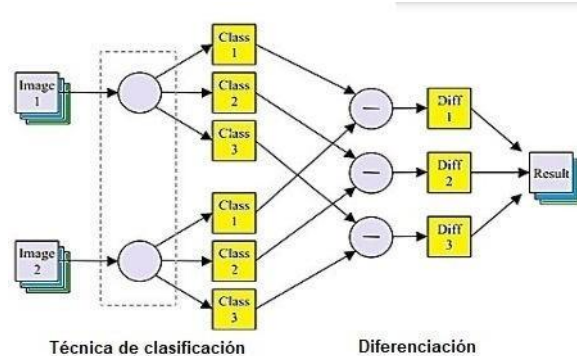


Figura 2. Diagrama de detección de cambios en la comparación posterior a la clasificación Fuente:[36].

Se seleccionaron las imágenes a ser utilizadas bajo estas siguientes consideraciones (Figura 3):

- Fecha: aquellas que representaron de una manera confiable las variaciones que puedan

existir entre las fechas de interés para el estudio bitemporal (1997 y 2004).

- Cobertura de nubes: aquellas que presentaron un mínimo de nubosidad.
- Calidad de la imagen: en mayo de 2003, el satélite Landsat 7, comenzó a presentar problemas técnicos que desmejoraban la calidad de las imágenes tomadas. Por tal motivo, para este estudio, se seleccionó una imagen del estado actual, anterior a mayo de 2003.
- Época del año: se escogió la época de sequía, ya que en ésta, se discriminan fácilmente los diferentes tipos de vegetación que existen en el área. Se seleccionó una imagen de 1990, por ser la más cercana a 1997 y con un comportamiento pluviométrico similar.

Estas consideraciones fueron analizadas conjuntamente siendo seleccionadas las siguientes imágenes (Figura 4):

- Imagen del estado actual o mas cercana a la fecha del estudio: Landsat 7 PATH/ROW: 002/054 Fecha: 17/01/2003.
- PATH/ROW: 002/054 Fecha: 19/04/1990.
- Imagen de estado inicial: Landsat 5

Además de las imágenes multispectrales Landsat, se utilizaron imágenes satelitales de alta resolución, a escala 1:5.000, (Ikonos 1m Pan+4m MS Dic 2004-Ene 2005) cuyas características espaciales y multispectrales permitieron en primer término efectuar el análisis de vegetación de detalle en áreas críticas de interés [40].

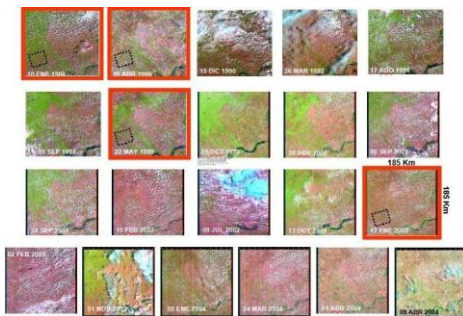


Figura 3. Preselección de imágenes Landsat, a través de la página del Servicio Geológico de Estados Unidos (<https://www.usgs.gov/>).

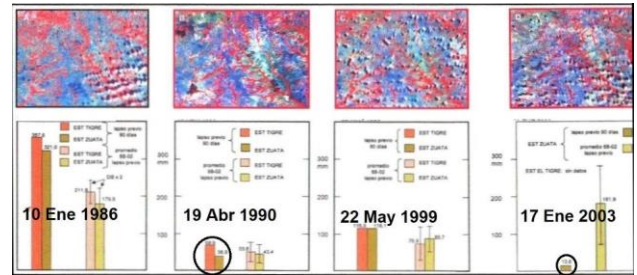


Figura 4. Selección de imágenes Landsat.

Continuando con el enfoque de múltiples vistas para la recopilación de datos [32], se analizó la información aerofotográfica y de campo obtenida en estudios anteriores [12] para complementar la información satelital (Figura 5).

2.3.- Procesamiento digital de imágenes Clasificación de la imagen Landsat 7 ETM 17/01/2003

Las imágenes satelitales seleccionadas fueron sometidas a correcciones radiométricas y geométricas antes de su clasificación multispectral [41]-[43]. Posteriormente, y con el propósito de obtener un mapa preliminar de tipos de vegetación actual, se realizó una Clasificación No Supervisada de la imagen del 2003 [42], [44]-[47]. Para ello se utilizó el algoritmo ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique), empleando el software ArcView GIS 3.2.

A partir de la clasificación no supervisada antes descrita, se realizó una Clasificación Supervisada Preliminar de la imagen 2003. Para este propósito se empleó el algoritmo de Clasificación de Máxima Verosimilitud (MLC) o Máxima Probabilidad [42], [47].

Para evaluar la fiabilidad de la clasificación supervisada preliminar, al igual que la exactitud conseguida para cada una de las clases, así como los principales conflictos entre ellas, se elaboró una Matriz de Confusión Preliminar usando las reglas de decisión de mínima distancia. La efectividad de la discriminación de las clases se verificó por medio de un Análisis de Separabilidad.

A continuación se eliminaron los polígonos, o áreas clasificadas; demasiado pequeños para constituir la Unidad Mínima Cartográfica (UMC), con un análisis de contigüidad.

Para la validación de campo de la Clasificación Supervisada Preliminar se planificó una ruta de vuelo en helicóptero, de cuatro horas de duración, con el objeto de constatar y obtener evidencia fotográfica georeferenciada de las áreas que representaran interés para su verificación. Los vuelos fueron complementados con un recorrido terrestre.

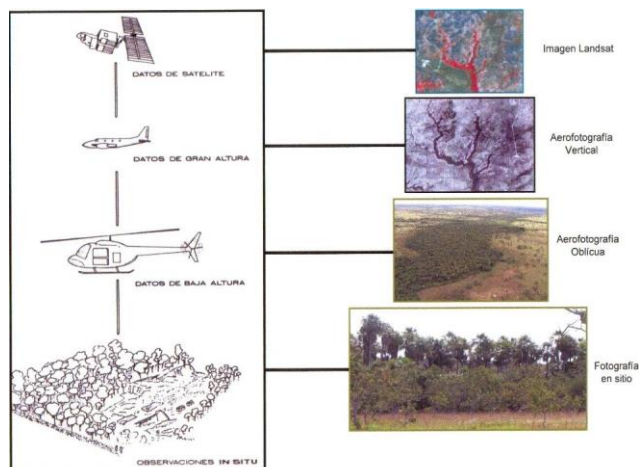


Figura 5. Métodos de captura de imágenes empleados en el estudio de vegetación (Río Mapire).

Clasificación de la imagen Landsat 5 ET 19/04/1.990)

Para la realización de la comparación espectral de las imágenes Landsat seleccionadas, se realizó una clasificación supervisada sobre la imagen de 1990, para así comparar ambas de una manera lógica y estadísticamente completa, utilizando como base las firmas espectrales utilizadas en la del 2003. Sin embargo, debido a que las imágenes comparadas fueron tomadas con sensores ligeramente diferentes (Thematic Mapper y Enhanced Thematic Mapper), las firmas espectrales se ajustaron para lograr la correspondencia con la realidad en la superficie. Adicionalmente, hubo que considerar diferencias importantes entre ambas imágenes como lo son:

- La ausencia de nubes y sombras en la imagen del 1990.
- La ausencia de infraestructuras en la imagen del 1990.

Imágenes de alta resolución Ikonos (Dic. 2004 – Ene 2005)

Se analizaron imágenes Ikonos disponibles en el bloque, para conocer con mayor detalle las características del terreno con énfasis en la cobertura vegetal. En ese sentido sobre dichos sectores se generaron cinco ventanas de estudio con sus respectivos mapas de vegetación a escala 1:10.000, lo que permitió evaluar su uso al validar este producto con la inspección de campo anteriormente citada.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.- Clasificación No Supervisada Landsat 2003

Se obtuvieron 14 clases correspondientes a diferentes tipos de coberturas (Tabla I).

La correspondencia de los tonos (colores) con los tipos de cobertura se muestra a continuación:

- Grises: sombras de nubes.
- Verdes oscuros: bosques.
- Verdes claros y amarillos: sabanas y suelos con poca vegetación.
- Blancos: nubes y suelos desnudos.

Reagrupando las clases encontradas como bosques, sabanas y otras coberturas, se puede representar en forma gráfica su comportamiento en las diferentes bandas (longitudes de onda), obteniendo así, las firmas espectrales de cada clase encontrada (Figuras 6, 7 y 8).

3.2.- Clasificación Supervisada Landsat 2003

Clasificación Supervisada Preliminar

Los resultados de la clasificación supervisada preliminar se muestran en la tabla II, y la asignación de los colores correspondientes a las diferentes clases se muestran en la tabla III. En la selección de muestras para la clasificación, no se logró discriminar las nubes del suelo desnudo altamente reflectante.

La figura 9 representa las clases identificadas con poco ó ningún contenido vegetal evidenciado en la poca reflexión en la banda 4. Por esta razón se identifica una clase como *NUBES SU_De 2*.

La característica predominante entre todas las firmas del gráfico, es una gran reflectividad en las bandas correspondientes al visible (elementos claros), poca reflectividad en la banda 4 (poco porcentaje de vegetación) y elevada reflectancia en las bandas 5 y 7 evidenciando poco contenido de humedad exceptuando las nubes, las cuales deben su alta reflectancia a efectos de refracción atmosférica (scattering).

Los resultados de la clasificación supervisada preliminar por cada clase identificada se muestran en la tabla IV

En la tabla V se muestra la matriz de confusión de la clasificación supervisada preliminar. En la misma se puede evidenciar lo siguiente:

- Las clases *Sa_Ar_Ga*, *NUBES / Su_De_2* y *SOMBRAS* no discriminan completamente la clase que representan ya que se observan confusiones con las demás. El caso de las *SOMBRAS* es de esperarse debido a que esta clase comprende las sombras sobre cualquier tipo de cobertura, lo que la hace muy amplia.
- Existe confusión entre las clases *B_P_Ri_SV* y *B_Ri_SSV*, *B_De_V_Se* y *V_Se_1*, y por último *B_De_V_Se* y *Veg_Que*.

Tabla I. Clasificación No Supervisada de la imagen Landsat 2003

Coberturas	Color	R	G	B	Orden	Muestra Píxeles	Muestra Km2	BANDA 1			BANDA 2			BANDA 3			BANDA 4			BANDA 5			BANDA 7		
								x	Mn	Max	x	Mn	Max	x	Mn	Max	x	Mn	Max	x	Mn	Max	x	Mn	Max
Class 1		192	192	192	1	36,282	29.47	68	58	82	46	36	68	41	27	59	27	15	62	38	19	55	25	11	41
Class 2		192	192	192	2	33,594	27.29	75	64	122	55	45	137	56	37	163	34	24	67	58	23	82	39	16	76
Class 3		0	102	0	3	14,054	11.42	72	62	96	54	43	99	51	33	123	50	34	80	70	40	86	39	19	61
Class 4		0	153	0	4	76,139	61.84	70	62	86	54	44	76	47	34	68	74	53	114	81	50	107	40	21	56
Class 5		204	179	0	5	118,527	96.27	74	66	102	58	50	112	58	45	144	60	29	104	94	54	114	54	30	80
Class 6		217	204	0	6	193,861	157.46	77	68	111	62	51	114	67	50	149	57	29	111	107	54	126	66	33	98
Class 7		217	204	0	7	246,682	200.37	80	71	122	66	53	125	75	55	148	57	33	105	117	53	141	76	34	117
Class 8		255	255	102	8	225,388	183.07	84	73	125	72	56	129	85	60	158	59	35	97	126	46	153	85	31	125
Class 9		255	255	102	9	160,940	130.72	88	75	131	77	60	115	93	66	143	63	41	104	136	89	167	94	58	153
Class 10		255	255	102	10	93,749	76.15	92	78	133	83	61	112	102	68	166	66	49	102	146	95	185	103	60	177
Class 11		255	255	102	11	47,904	38.91	97	78	131	90	63	112	112	67	141	70	49	98	155	104	204	111	74	237
Class 12		255	255	102	12	29,878	24.27	109	82	137	101	80	124	125	102	172	75	50	104	161	94	222	117	64	175
Class 13		255	255	102	13	30,661	24.90	141	92	190	127	102	164	148	114	211	86	52	112	164	46	254	122	36	227
Class 14		255	255	102	14	22,119	17.97	210	104	255	193	124	255	214	164	255	116	79	191	203	135	255	165	84	255

- Las clases correspondientes a cuerpos de agua visibles desde el satélite, se confunden entre sí, lo que resulta predecible por las dimensiones de los mismos.

A partir de la matriz de confusión se calcularon las estadísticas que validaron la clasificación. La fiabilidad global de la clasificación fue del: 72,76 %. Con un nivel de significación de 0,05 (probabilidad del 95%), el error del muestreo resulto en 0.0029, por lo que la fiabilidad real se encuentra entre 72,48 y 73,04%. Es importante destacar que los valores esperados en las Clasificaciones Supervisadas son entre 60 y 80.

Con el objeto de analizar que tan efectiva fue la discriminación de las clases, se realizó un Análisis de Separabilidad cuyos resultados se presentan en la tabla VI. En la misma observan clases que no evidencian una separación promedio suficiente como lo son *Su_De_1_Sa_In_Po*, *NUBES 2*, *NUBES / Su_De_2* y *SOMBRAS*.

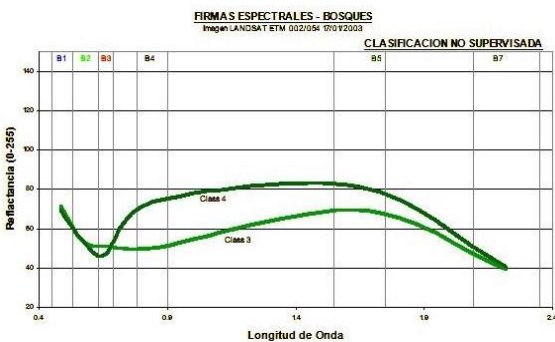


Figura 6. Firmas espectrales correspondientes a bosques en la clasificación no supervisada.

Seguidamente se realizó el Análisis de Contigüidad para eliminar los polígonos demasiado pequeños (Figura 10). Considerando que la escala de trabajo para el mapa de vegetación es 1:50.000, la UMC es el área equivalente a nueve (9) píxeles ó 256,5 m².

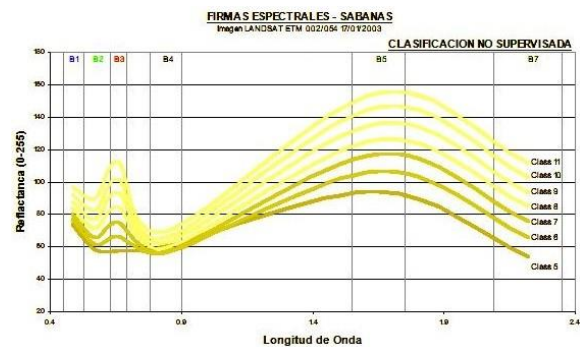


Figura 7. Firmas espectrales correspondientes a sabanas en la clasificación no supervisada.

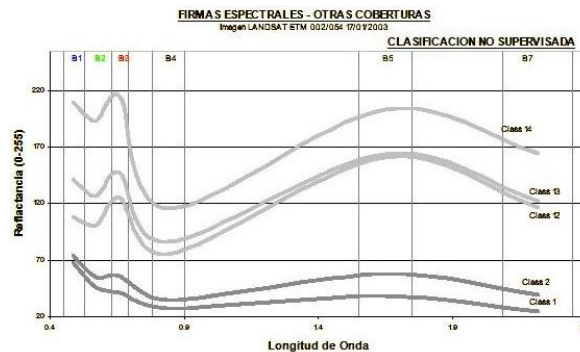


Figura 8. Firmas espectrales correspondientes a otras coberturas en la clasificación no supervisada.

Tabla II. Clasificación Supervisada Preliminar de la imagen Landsat 2003

Coberturas	Color	R	G	B	Orden	Muestra Píxeles	Muestra Km2	BANDA 1			BANDA 2			BANDA 3			BANDA 4			BANDA 5			BANDA 6		
								x	Mn	Max	x	Mn	Max	x	Mn	Max	x	Mn	Max	x	Mn	Max	x	Mn	Max
B_P_Ri_SV_Pi_Fo_De		0	102	0	1	2,217	1.86	69	80	73	56	46	82	44	35	51	73	48	100	84	46	84	31	22	
B_Ri_SSV		0	163	0	2	3,602	2.92	69	88	76	62	47	82	46	39	58	88	80	130	81	82	89	42	29	
B Incog		0	77	0	3	43	0.04	38	70	113	73	58	86	86	43	88	86	72	82	102	74	127	58	33	
V_Se_1		128	179	0	4	4,442	3.71	74	70	92	69	54	70	81	61	71	82	68	85	107	91	123	81	49	
B_De_V_Se_2		204	179	0	5	3,879	3.07	77	70	90	61	54	86	87	64	77	53	44	81	121	86	138	73	62	
Sa_Ar_Ga		217	204	0	6	26,481	22.12	85	78	93	73	60	85	96	87	108	81	43	80	130	88	172	90	86	
Su_De_1_Sa_In_Po		266	265	102	7	4,282	3.58	98	94	132	94	74	142	123	82	100	70	47	87	183	112	228	121	87	
Veg_Que		163	102	0	8	8,484	6.42	77	70	91	68	50	82	82	46	70	43	31	66	104	80	124	80	46	
INFRAESTRUCTURA		179	81	102	9	1,410	1.18	104	86	120	92	74	110	105	82	128	50	40	69	101	84	118	83	78	
NUBES 2		266	265	266	10	417	0.36	122	94	149	103	77	129	114	86	142	78	88	88	142	126	167	100	82	
NUBES Su_De_2		266	265	266	11	16,296	12.73	180	98	267	168	90	260	188	104	269	105	86	144	160	132	248	148	89	
SOMBRAS		138	138	138	12	23,469	18.69	89	58	125	47	34	110	43	22	126	30	4	66	43	8	126	28	7	
AGUA 1		0	0	266	13	20	0.02	88	88	100	74	86	90	82	73	96	41	36	66	76	81	121	83	61	
AGUA 2		0	0	266	14	22	0.02	86	78	86	86	86	103	91	89	112	50	29	87	86	27	160	43	16	

Tabla III. Asignación de colores y nomenclatura de las clases

Nomenclatura	Color	Descripción
B_Ri_SV_SSV		Bosques Ribereños Siempre Verdes y Semi Siempre Verdes
B_De		Bosques Deciduos
Ma_De		Matorrales Deciduos
Pa		Palmares
Sa_Ar_Po		Sabanas Arboladas y Potreros
Sa_IAr_Po_Cu		Sabanas Inarboladas, Potreros y Cultivos
Ve_Que		Vegetación Quemada
Su_De		Sustrato Desnudo
Inf		Infraestructura
Nu		Nubes
S		Sombras

Tabla IV. Superficie cubierta por clase en la clasificación supervisada preliminar de la imagen Landsat 2003

Clase	Color	Total Píxeles	Total Km2
B_P_Ri_SV_Pi_Fo_De		12,648	10.27
B_Ri_SSV		34,631	28.13
B Incog		3,866	3.14
V_Se_1		37,789	30.69
B_De_V_Se_2		98,570	80.06
Sa_Ar_Ga		274,092	222.63
Su_De_1_Sa_In_Po		113,393	92.10
Veg_Que		12,076	9.81
INFRAESTRUCTURA		1,806	1.47
NUBES 2		2,636	2.14
NUBES Su_De_2		12,835	10.43
SOMBRAS		37,767	30.68
AGUA 1		145	0.12
AGUA 2		428	0.35
TOTAL CLASIFICACIÓN =		642,682	522.02

Tabla V. Matriz de Confusión - Clasificación Supervisada Preliminar

Cobertura	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Total
Bosque pantano ribereño siempre verde	517	411	1	0	0	0	0	0	0	0	0	330	0	0	1259
Bosque ribereño semisiempre verde	26	414	2	98	1	5	0	0	0	0	0	47	0	0	593
Bosque incógnito	1	0	40	1	0	95	0	0	0	0	28	2	0	0	167
Vegetación secundaria 1	2	24	0	553	7	78	0	2	0	0	9	22	0	1	698
Bosque decíduo verde secundario	0	26	0	450	821	421	0	588	0	0	13	41	0	0	2360
Sabana arbolada ganadería	0	5	0	52	84	4036	1	26	0	1	140	75	1	0	4421
Sustrato desnudo sabanas	0	0	0	0	0	1621	1092	0	37	81	718	2	1	1	3553
Vegetación quemada	0	0	0	4	2	107	0	1015	0	0	1	149	0	0	1278
Infraestructura	0	0	0	0	0	86	6	0	292	0	10	6	0	0	400
Nubes	0	0	0	0	0	8	0	0	0	29	121	0	0	0	158
Nubes sustrato desnudo	0	0	0	0	0	7	0	0	0	8	2871	0	0	0	2886
Sombras	39	2	0	0	0	7	0	0	3	0	83	5528	17	15	5694
Agua 1	0	0	0	0	0	14	0	0	24	0	3	18	1	0	60
Agua 2	0	0	0	2	0	93	0	0	4	0	11	15	0	5	130
Total	585	882	43	1160	915	6578	1099	1631	360	119	4008	6235	20	22	23657

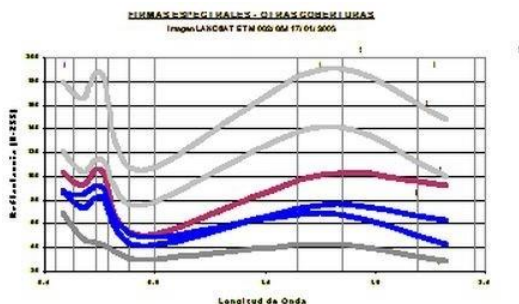


Figura 9. Firmas espectrales correspondientes a otras coberturas en la clasificación supervisada preliminar.

Validación de campo de la Clasificación Supervisada

Los ajustes realizados en la imagen clasificada se basaron principalmente en la caracterización taxonómica y fisonómica, así como la reasignación y agrupación de clases, apoyándose en los ajustes estadísticos de las firmas espectrales, y la medición *in situ* de la reflectancia del suelo para ajustar la corrección radiométrica de las imágenes. El recorrido para la validación en campo se muestra en la figura 11.

Entre los ajustes de reasignación y agrupación se obtuvieron las siguientes clases:

A. Clase Agua

Fue eliminada debido principalmente a que los cuerpos de agua comprendidos en el área del Bloque son de escasa dimensión respecto a las dimensiones de resolución de las imágenes Landsat (15 m en pancromático), y que la mayoría se presentan cubiertos por herbazales. Por tal motivo, resulta más apropiado que los cuerpos de agua sean delimitados con las imágenes Ikonos que ofrecen una resolución espacial

considerablemente mas fina (1 m) y con fotografías aéreas (Figuras 12, 13 y 14).

B. Clases Bosques, Matorrales, Sabanas, Potreros y Cultivos

Luego de la verificación de campo, las clases Bosques, Matorrales, Sabanas, Potreros y Cultivos, fueron reagrupadas según criterios taxonómicos (Figura 15).

C. Clase Palmares

Se pudo identificar en la imagen áreas específicas de las cuales se extrajo la firma característica de palmares, generando así una clase particular que los identifique (Figura 16).

D. Clase Sustrato desnudo

Esta se encontraba incluida en la clase denominada Nubes debido a que las firmas espectrales son similares. Por esta razón de identificaron visualmente mediante la selección de polígonos que no tenían una sombra asociada (Figura 17).

Ajuste de Firmas Espectrales

Agrupando las diferentes clases según la información estadística y similitud taxonómica, se presentan a continuación los gráficos que describen el comportamiento de cada una de ellas según los parámetros ajustados luego de la visita de campo. En la figura 18 se presentan las firmas espectrales de las clases correspondientes a vegetación que guardan relación con bosques.

Del análisis de sus curvas espectrales podemos inferir lo siguiente:

- Las tres tienen un componente rojo (B3) comparativamente muy bajo con respecto al azul (B1) y al verde (B2), por lo que se espera tengan colores verdes intensos.

Tabla VI. Índice de Separabilidad – Clasificación Supervisada Preliminar

Coberturas	B_P_Ri_SV_Pi_Fo_De	B_Ri_SSV	B Incog	V_Se_1	B_De_V_Se_2	Sa_Ar_Ga	Su_De_1_Sa_In_Po	Veg_Que	INFRAESTRUCTURA	NUBES 2	NUBES Su_De_2	SOMBRAS	AGUA 1	AGUA 2
B_P_Ri_SV_Pi_Fo_De	0	21	81	57	78	102	163	73	110	145	275	49	65	64
B_Ri_SSV	21	0	48	37	58	84	145	54	97	130	262	56	56	60
B Incog	81	48	0	32	44	52	106	52	66	86	216	96	53	56
V_Se_1	57	37	32	0	22	48	111	27	72	100	233	82	48	61
B_De_V_Se_2	78	58	44	22	0	32	94	22	63	88	221	97	53	70
Sa_Ar_Ga	102	84	52	48	32	0	83	45	46	59	191	124	65	79
Su_De_1_Sa_In_Po	163	145	106	111	94	83	0	106	73	42	138	184	118	128
Veg_Que	73	54	52	27	22	45	106	0	63	99	231	84	43	65
INFRAESTRUCTURA	110	97	66	72	63	46	73	63	0	54	178	122	52	64
NUBES 2	145	130	86	100	88	59	42	99	54	0	134	167	100	106
NUBES Su_De_2	275	262	216	233	221	191	138	231	178	134	0	297	228	230
SOMBRAS	49	56	96	82	97	124	184	84	122	167	297	0	70	73
AGUA 1	65	56	53	48	53	65	118	43	52	100	228	70	0	27
AGUA 2	64	60	56	61	70	79	128	65	64	106	230	73	27	0
Promedio	97	85	74	71	73	76	113	74	82	101	218	116	75	83

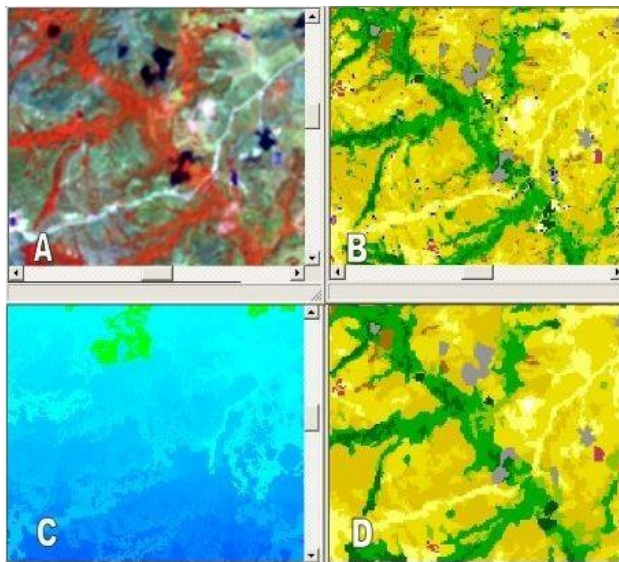


Figura 10. Proceso de eliminación de polígonos. A: sector de la imagen original en combinación de bandas RGB 453. B: resultado de la clasificación supervisada preliminar. C: análisis de contigüidad. D: imagen clasificada después de eliminar los polígonos inferiores a 256,5 m².

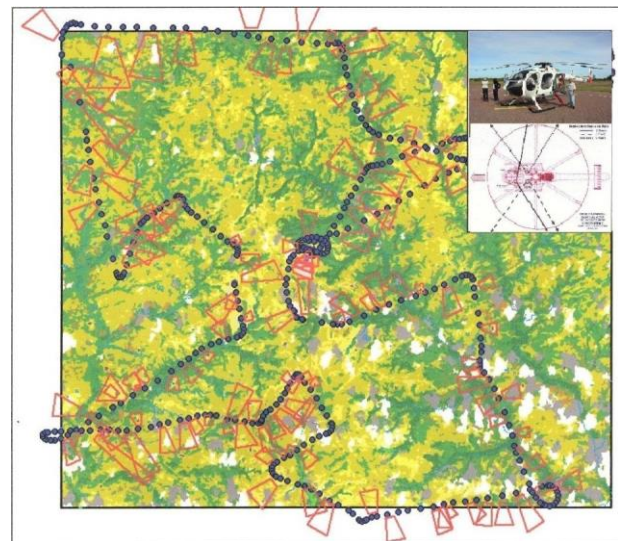


Figura 11. Recorrido en campo para la verificación de la clasificación supervisada.

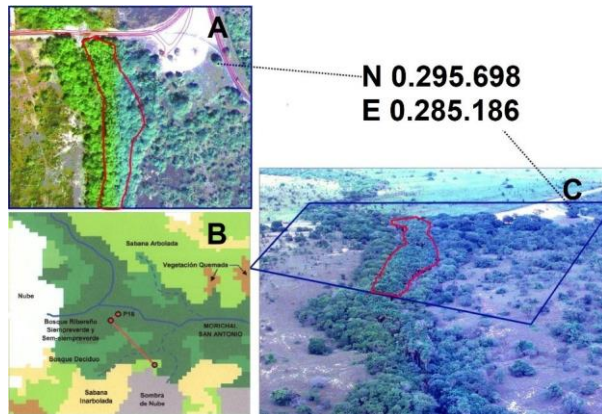


Figura 12. Morichal San Antonio. A: Imagen Ikonos. B. Verificación terrestre. C. Verificación aérea.

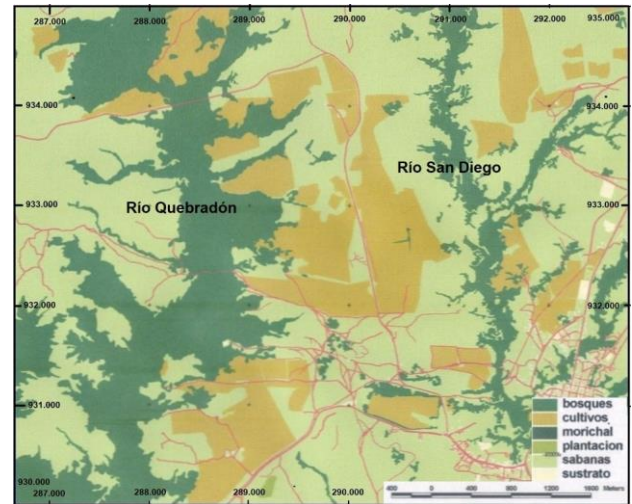


Figura 14. Mapa preliminar de cobertura a escala 1:10.000 elaborado a partir de una imagen Ikonos.

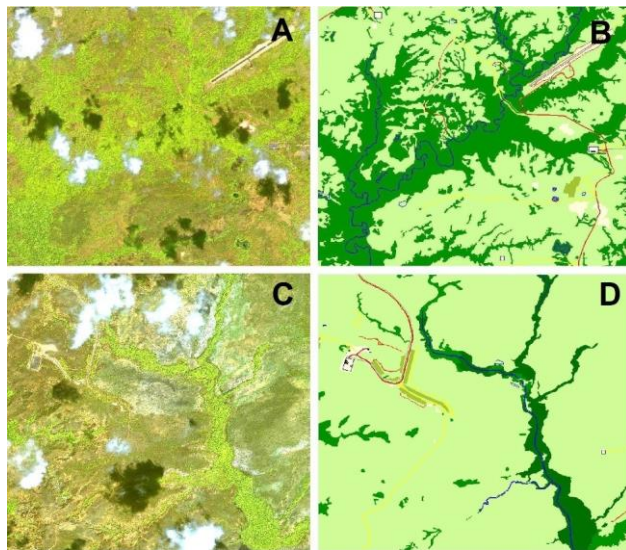


Figura 13. Quebrada Palo a pique. A. Imagen Ikonos. B. Mapa preliminar. Río Mapire. C. Imagen Ikonos. D. Mapa preliminar.

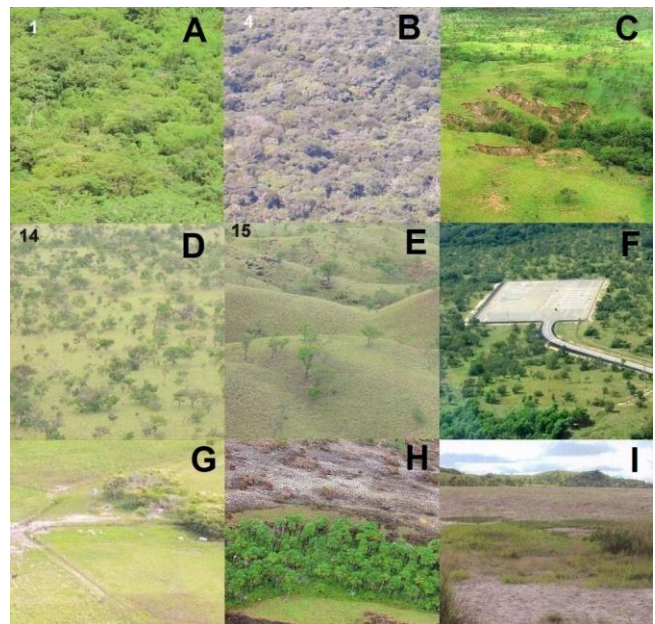


Figura 15. Fotografías aéreas de los diferentes tipos de vegetación y otras coberturas. A. Bosque siempre verde y semisempre verde. B. Bosque deciduo. C. Matorral deciduo. D. Sabana arbolada. E. Infraestructuras. G. Potreros. H. Vegetación quemada. I. Despeje de vegetación.



Figura 16. Fotografía aérea de un palmar.



Figura 17. Fotografía aérea del sustrato desnudo (sin vegetación).

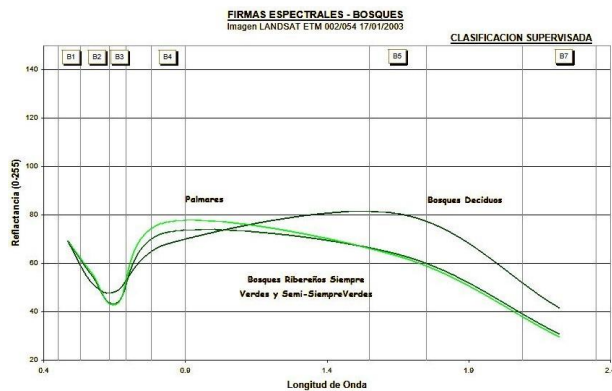


Figura 18. Firmas espectrales ajustadas correspondientes a bosques.

- Las altas respuestas en el infrarrojo cercano (B4) en comparación a las respuestas en el Rojo (B3) denotan una alta actividad fotosintética por lo que se espera posean gran vigor. La que presenta un mayor vigor

entre ellas es la clase identificada como Palmares.

- La banda del infrarrojo medio (B5) la cual responde a la estructura de la hoja, evidencia en el gráfico anterior que las clases con una mejor estructura celular en la hoja (capaces de retener mejor el contenido de humedad de la hoja) son los correspondientes a las clases de bosques ribereños y palmares, quedando con relativa desventaja estructural los bosques deciduos.
- De manera similar, la banda del infrarrojo lejano (B7), la cual refleja en gran proporción el contenido de humedad de la superficie reflejada, apoya el punto anterior, indicando como la clase más desfavorecida a Bosques deciduos.

El siguiente grupo analizado corresponde a las clases relacionadas con vegetación de sabanas y matorrales y cuyas principales características son las siguientes (figura 19):

- Este segundo cuadro agrupa coberturas que poseen un alto nivel de reflectancia en el rojo (B3) con relación a las bandas azul (B1) y verde (B2) por lo que se deduce colores que tienden a ser amarillentos.

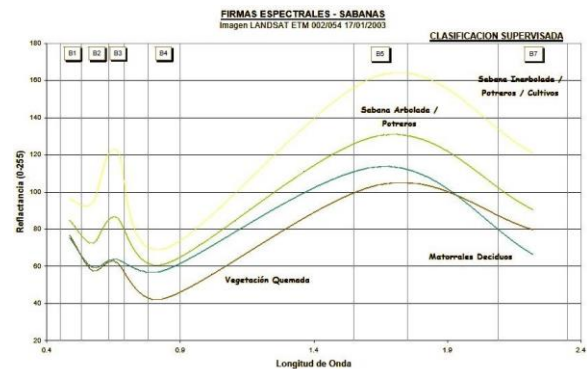


Figura 19. Firmas espectrales ajustadas correspondientes a sabanas.

- Resulta evidente también que la clase Vegetación quemada reporta la mínima actividad fotosintética al tener el menor gradiente (negativo) entre las bandas roja (B3) e infrarrojo cercano (B4).
- Entre las clases Sabanas y Matorrales, se observa como es de esperarse que, la primera presenta una estructura celular menos eficiente (B5) para preservar la humedad que la segunda, y consecuentemente menor contenido de humedad (B7)

En la figura 20 se representan las clases identificadas con poco ó ningún contenido vegetal evidenciado en la poca reflectancia en la banda del infrarrojo cercano (B4).

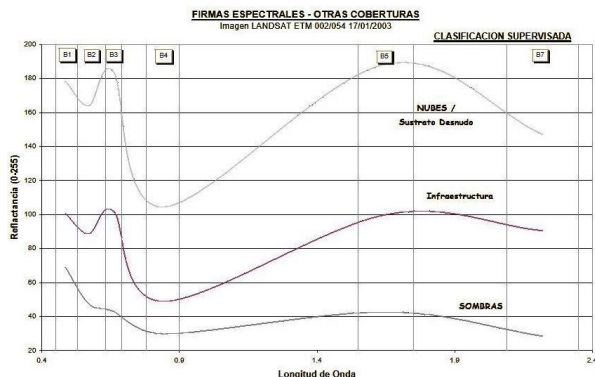


Figura 20. Firmas espectrales ajustadas correspondientes a otras coberturas.

En la clasificación multispectral realizada no se logró discriminar las nubes del suelo desnudo altamente reflectivo. La discriminación se realizó mediante la técnica de selección por presencia o ausencia de sombras asociadas.

La característica predominante entre todas las firmas del gráfico, es una gran reflectividad en las bandas correspondientes al visible (elementos claros), poca reflectividad en la banda 4 y elevada reflectancia en las bandas 5 y 7 evidenciando poco contenido de humedad exceptuando las nubes, las cuales deben su alta reflectancia a efectos de refracción atmosférica (scattering).

Matriz de Confusión de la Clasificación Supervisada

A continuación se muestra la nueva matriz de confusión a partir de una muestra de 24.550 píxeles de 5 x 5 m, equivalente a 61,4 ha (Tabla VII). La fiabilidad global de esta clasificación fue del: 71,5 %, con un nivel de significación de 0,05 (probabilidad del 95%), y el error del muestreo en 0,0029, por lo que la fiabilidad real se encuentra entre 71,21 y 71,79%.

Tabla VII. Matriz de Confusión - Clasificación Supervisada

Cobertura	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total
Bosque ribereño siempre verde y semisiempre verde	198	791	94	99	5	0	0	0	2	386	1575
Bosque deciduo	6	87	1441	0	525	1	328	0	21	167	2576
Matorral deciduo	1	1	437	0	373	0	1	0	63	29	905
Palmares	341	0	0	500	0	0	0	0	0	21	862
Sabanas arboladas	0	3	46	0	4716	273	21	6	147	133	5345
Sabanas inarboladas, potreros y cultivos	0	0	1	0	868	1051	0	95	258	3	2276
Vegetación quemada	0	0	56	0	29	0	1281	0	1	92	1459
Infraestructura	0	0	0	0	16	0	0	338	15	2	411
Nubes	0	0	0	0	46	74	0	0	3601	26	3747
Sombras	39	0	0	0	0	0	0	0	19	5336	5394
Total	585	882	2075	599	6578	1399	1631	439	4127	6235	24550

Analizando la tabla observamos lo siguiente:

- Se presenta un alto índice de confusión entre las clases Bosques ribereños y Palmares lo cual es debido a que los palmares se comportan espectralmente de manera similar a los bosques ribereños y se encuentran ubicados en lugares con características similares.
- De igual manera las clases Matorrales deciduos y Bosques deciduos se confunden evidenciándose que la primera se comporta como una subclase de la segunda.
- El mismo caso ocurre entre las clase Sabanas arboladas y Sabanas inarboladas, potreros y cultivos.

Análisis de Separabilidad

En la tabla VIII se presenta el índice de separabilidad entre clases. De la misma se puede destacar que:

- Los índices que reflejan la mayor separabilidad son: Palmares vs. Sabanas inarboladas y potreros (164) y Bosques ribereños y Sabanas inarboladas (163).
- Los índices que reflejan la menor separabilidad son: Palmares vs. Bosques ribereños (5) y Bosques deciduos vs. Bosques ribereños (21).

Tabla VIII. Índice de Separabilidad - Clasificación Supervisada

Coberturas	B_De	B_Ri_SV_SSV	S	Ve_Que	Sa_Ar_Po	Sa_IAr_Po_Cu	Ma_De	Nu	Inf	Pa
B_De	0	21	56	54	84	145	46	259	91	24
B_Ri_SV_SSV	21	0	49	73	102	163	67	271	105	5
S	56	49	0	84	124	184	89	294	117	52
Ve_Que	54	73	84	0	45	106	23	228	57	76
Sa_Ar_Po	84	102	124	45	0	63	40	187	43	104
Sa_IAr_Po_Cu	145	163	184	106	63	0	103	134	76	164
Ma_De	46	67	89	23	40	103	0	224	61	69
Nu	259	271	294	228	187	134	224	0	181	271
Inf	91	105	117	57	43	76	61	181	0	106
Pa	24	5	52	76	104	164	69	271	106	0
Promedio	66	73	90	62	63	93	59	172	68	74

3.3.- Clasificación de la imagen Landsat 1990

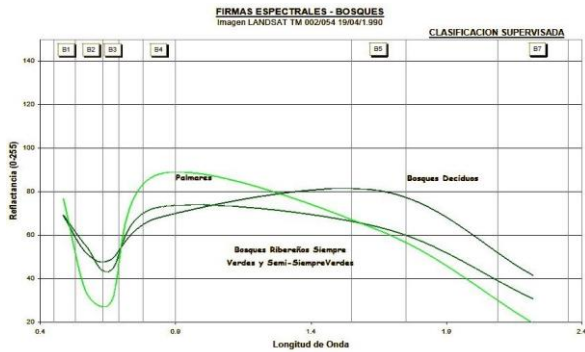


Figura 21. Firmas espectrales correspondientes a bosques y palmares en la imagen Landsat 1990.

Para la realización de la comparación espectral de las imágenes Landsat seleccionadas, se realizó una clasificación supervisada sobre la imagen de 1990, utilizando como base las firmas espectrales utilizadas en la del 2003. Sin embargo, debido a que las imágenes comparadas fueron tomadas con sensores ligeramente diferentes (Thematic Mapper y Enhanced Thematic Mapper), las firmas espectrales deben ser ajustadas para lograr la correspondencia con la realidad en la superficie. Adicionalmente, hubo que considerar diferencias importantes entre ambas imágenes como la ausencia de nubes, sombras e infraestructuras en la imagen de 1990. Luego de considerar los puntos anteriores se obtuvieron las firmas espectrales para la imagen de 1990 (Tabla IX, Figuras 21 y 22).

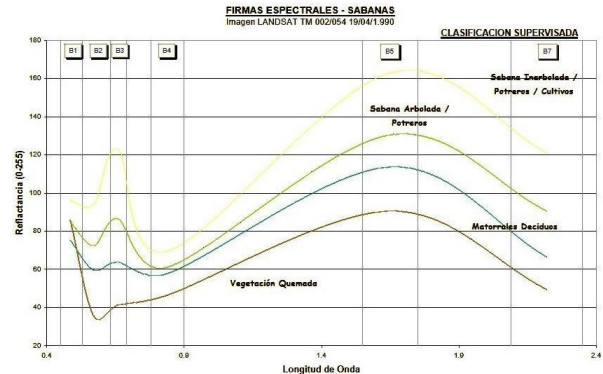


Figura 22. Firmas espectrales correspondientes a sabanas y otros tipos de vegetación rala en la imagen Landsat 1990.

3.4.- Comparación espectral Landsat TM Bi-Temporal

El análisis comparativo realizado se basa fundamentalmente en estudiar las variaciones en área de cada cobertura encontrada en ambas imágenes. Para tal fin a cada una de las imágenes clasificadas se les asignó a cada clase y por imagen un valor numérico, de manera tal que al realizar la diferencia aritmética entre ambas imágenes temáticas, cada color resultante resultara único según la combinación de "Clase Inicial" y "Clase Final" (Tabla X).

El valor resultante de cada píxel se calculó de la siguiente manera:

$$\text{Valor resultante} = Vn2003 - Vn1990$$

De esta manera, por ejemplo, un píxel que pase de Sabana inarbolada (Sa_Iar_Po_Cu) a Sabana arbolada

da (Sa_Ar) resultaría $140 - 4 = 136$. Entonces en la imagen resultante todos los valores en la imagen resultante con éste valor tendrán ese comportamiento.

Los tipos de cobertura identificados en la clasificación multispectral de la imagen del 2003 son 11 en total,

a diferencia del año 1990 que son 8. Las clases que no están presentes en la imagen del 1990 son Infraestructura, Nubes y Sombras.

Los resultados de la comparación por tipo de cobertura se muestran en la tabla XI.

Tabla IX. Clasificación Supervisada de la imagen Landsat 1990

Coberturas	Color	Orden	BANDA 1			BANDA 2			BANDA 3			BANDA 4			BANDA 5			BANDA 7		
			x	Mn	Max	x	Mn	Max	x	Mn	Max	x	Mn	Max	x	Mn	Max	x	Mn	Max
B_De			89	74	92	52	24	60	49	19	86	88	63	87	81	86	130	42	14	66
B_RJ_SV_SSV			89	71	91	56	23	42	44	15	46	73	66	112	64	67	106	31	9	60
Ve_Que			86	80	96	36	30	40	41	30	48	47	26	68	91	48	107	49	32	70
Sa_Ar_Po			86	81	105	73	36	63	86	28	90	61	47	80	130	88	186	90	60	107
Sa_IAr_Po_Cu			96	88	140	94	43	93	123	65	138	70	63	97	163	112	207	121	65	141
Ma_De			76	81	108	80	35	63	64	35	67	68	67	107	114	87	145	86	33	74
Pa			77	74	79	34	30	36	29	24	33	68	80	116	62	55	70	20	15	20

Tabla X. Valores asignados a cada cobertura en las imágenes Landsat

Cobertura	Valor numérico 1990	Valor numérico 2003
Bosque ribereño siempre verde y semi siempre verde	2	20
Bosque deciduo	3	40
Matorral deciduo	10	60
Palmares	7	200
Sabana arbolada	4	120
Sabana inarbolada, potreros y cultivos	11	140
Vegetación quemada	1	160
Infraestructura	0	100
Nubes	0	240
Sombras	0	80

Tabla XI. Variaciones por tipo de cobertura 1990-2003

Cobertura	1990		2003		Variación	
	Area (ha)	%	Area (ha)	%	Area (ha)	%
Bosque ribereño siempre verde y semi siempre verde	4912,5	9,4	4387,7	8,4	-524,8	-1,0
Bosque deciduo	9322,4	17,9	12817,7	24,6	3495,3	6,7
Matorral deciduo	7462,4	14,3	2467,7	4,7	-4994,7	-9,6
Palmares	50,1	0,1	67,2	0,1	17,1	0,0
Sabana arboladas	23749,4	45,6	22190,9	42,6	-1558,5	-3,0
Sabana inarbolada, potreros y cultivos	6020,9	11,6	4452,1	8,5	-1568,8	-3,0
Sustrato desnudo	140,8	0,3	160,7	0,3	19,9	0,0
Vegetación quemada	452,8	0,9	318,4	0,6	-134,3	-0,3
Infraestructura			55,3	0,1	55,3	
Nubes			2573,6	4,9	2573,6	
Sombras			2619,18	5,0	2619,18	
Total	52111,3	100,0	52111,3	100,0		

Con el objeto de acercar el análisis lo más posible a la realidad, resulta necesario considerar de manera especial las áreas que, en la imagen del año 2003 ocupan las nubes y sombras.

Para evaluar cómo las nubes y sombras afectan las estadísticas de cada tipo de cobertura, se muestra en la Tabla XII la contribución de los 8 tipos de cobertura

de la imagen de 1990 para cada tipo de cobertura en la imagen de 2003.

Tabla XII. Contribución por cobertura (ha) de la imagen de 1990 en la imagen de 2003

Cobertura	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
Bosque ribereño siempre verde y semisiempre verde	2752	1130	272	15	148	57	0	14	4388
Bosque deciduo	1233	4806	3064	0	3218	344	12	141	12818
Matorral deciduo	1233	4806	3064	1	732	144	12	64	2468
Palmares	33	0	0	34	0	0	0	0	67
Sabana arbolada	111	1348	2329	0	15029	3188	60	126	22191
Sabana inarbolada, potreros y cultivos	25	105	312	0	2230	1740	28	13	4452
Sustrato desnudo	0	16	26	0	55	63	0	0	161
Vegetación quemada	2	98	84	0	106	23	1	4	318
Infraestructura	0	3	11	0	35	6	0	0	55
Nubes	321	573	328	0	1045	247	2	58	2574
Sombras	283	581	338	0	1152	207	26	32	2620
Total	4912	9322	7642	50	23749	6021	141	453	52111

De la tabla anterior, se pueden observar los siguientes comportamientos:

- 2752 ha de las 4388 ha de los bosques ribereños siempre verdes y semisiempre verdes provienen de la misma clase, 1130 ha de bosques deciduos y 272 ha de matorral deciduo. Las 234 ha restantes corresponden a tipos de cobertura con características fisonómicas más disímiles.
- El total de los palmares provienen de 33 ha de bosques ribereños siempre verdes y semisiempre verdes y 34 ha de la misma clase. Lo que confirma la interrelación que existe entre ambas tipos de cobertura.
- La vegetación quemada en la imagen del 2003 corresponde principalmente a 98 ha de bosques deciduos, 84 ha de matorrales deciduos y 106 ha de sabanas arboladas. También se aprecia que tan sólo 2 ha de bosques ribereños resultaron quemados, y 4 ha fueron quemadas recurrentes.
- La mayoría de las áreas de Infraestructura fueron realizadas en 11 ha de matorrales deciduos y 35 ha de sabanas arboladas.
- Existe un aparente intercambio de áreas de cobertura entre bosques ribereños siempre verdes y semisiempre verdes y bosques deciduos (1130 ha pasan de una cobertura a otra y 1233 ha en sentido contrario). Sin embargo, esto puede deberse a limitaciones del satélite para discriminar entre estas clases. La heterogeneidad espectral que presentan el área de estudio, y específicamente en los bosques de galería debido a la convivencia de especies diferente en un mismo hábitat, hace que la discriminación de las mismas resulte imprecisa.
- El cubrimiento de nubes y sombras está de acuerdo con las proporciones de cada cobertura con respecto al área total.

- Considerando que el comportamiento de distribución de las nubes corresponde de una manera representativa de la distribución general en el área de estudio, y estimando que las variaciones en dichas áreas es baja, se puede asumir que las áreas cubiertas por sombras y nubes corresponderán de manera proporcional a cada una de los tipos de coberturas existentes en el 1990. En tal sentido, es posible obtener las variaciones por tipo de cobertura entre 1990 y 2003 ajustando las clases Nubes y Sombras como áreas sin cambio (Tabla XIII).

Los gráficos de las figuras 23 y 24 muestran el porcentaje de la cobertura de cada tipo de vegetación en los años 1990 y 2003, y el cambio en las mismas ocurrido en ese lapso de tiempo.

3.5.- El mapa de vegetación

A continuación se muestran los distintos mapas utilizados durante el proceso de elaboración del mapa definitivo de vegetación. En la figura 25 se muestra el ortofotomapa de levantamiento de la zona de 1997, y en la figura 26 el mapa base elaborado a partir del ortofotomapa, donde los tipos de vegetación se discriminaron solamente en base a criterios fisonómicos. En la figura 27 se presenta el mapa de vegetación preliminar elaborado a partir de la Clasificación No Supervisada de la imagen Landsat 2003, y por último la figura 28 muestra el mapa definitivo correspondiente al año 2003.

Tabla XIII. Variaciones por tipo de cobertura 1990-2003 (ajustadas por las clases Nubes y Sombras)

Cobertura	1190		2003		Variación	
	Area (ha)	%	Area (ha)	%	Area (ha)	%
Bosque ribereño siempre verde y semi siempre verde	4912,5	9,4	4991,7	9,6	79,2	0,2
Bosque decíduo	9322,4	17,9	13971,7	26,8	4649,3	8,9
Matorral decíduo	7462,4	14,3	3133,9	6,0	-4328,5	-8,3
Palmares	50,1	0,1	67,6	0,1	17,5	0,0
Sabana arboladas	23749,4	45,6	24387,5	46,8	638,1	1,2
Sabana inarbolada, potreros y cultivos	6020,9	11,6	4906,1	9,4	-11147,7	-2,1
Sustrato desnudo	140,8	0,3	188,6	0,4	47,8	0,1
Vegetación quemada	452,8	0,9	408,9	0,8	-43,9	-0,1
Infraestructura			55,3	0,1	55,3	
Total	52111,3	100,0	52111,3	100,0		

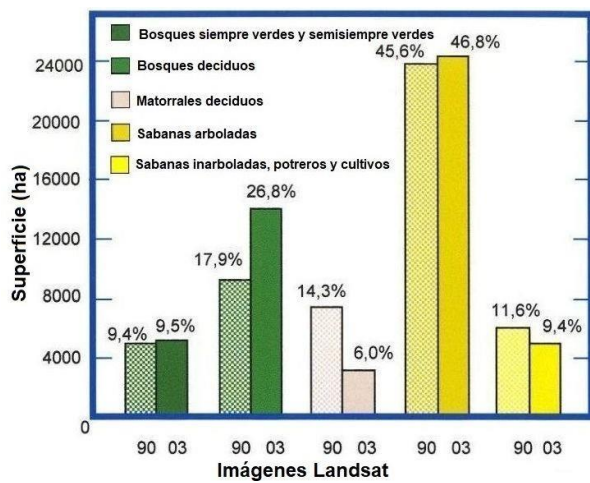


Figura 23. Porcentaje de la cobertura para cada tipo de vegetación en los años 1990 y 2003.

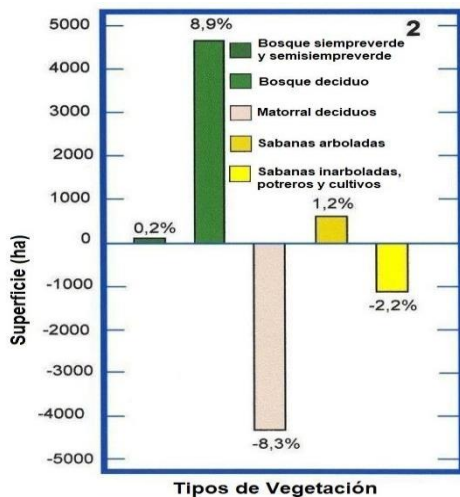


Figura 24. Cambios en la cobertura de los distintos tipos de vegetación ocurridos entre los años 1990 y 2003.



Figura 25. Ortofotomapa del año 1997. 1. Río Quebradón. 2. Río San Diego. 3. Morichal San Antonio. 4. Río Mapire. 5. Río Negro. Fuente: [12].

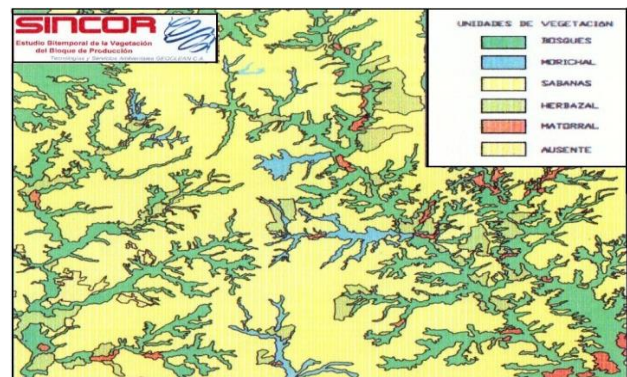


Figura 26. Mapa de vegetación base del bloque Sincor a escala 1:50.000.

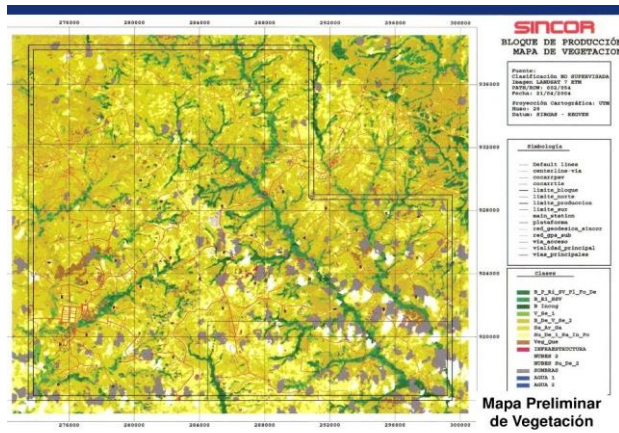


Figura 27. Mapa de vegetación preliminar a escala 1:50.000.

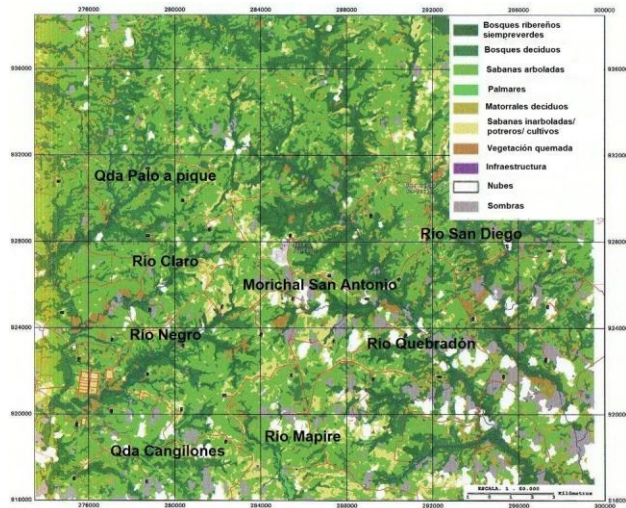


Figura 28. Mapa de vegetación definitivo a escala 1:50.000. Los tonos en color verde decreciente corresponden a: bosques ribereños siempreverdes, bosques deciduos, sabanas arboladas, palmares, matorrales, sabanas inarboladas y tierras con uso agropecuario. Los tonos restantes corresponden a vegetación quemada, infraestructuras, nubes y sombras.

3.6.- Importancia ecológica de la vegetación del bloque Sincor

Al igual que en el resto de la Faja Petrolífera del Orinoco, la combinación de un clima con una marcada bioestacionalidad, conjuntamente con suelos ácidos de baja fertilidad y texturas arenosas asociados a paisajes geomorfológicos de altiplanicie erosionados y disectados, ha determinado que la vegetación natural prevaleciente sea del tipo sabana, dominadas florísticamente por especies de gramíneas del género *Tra-*

chypogon con diferentes grados de arborización [19]. En este bioma las formaciones boscosas se restringen mayoritariamente a los valles de ríos de poco caudal.

La diversidad y los endemismos de la región son menores en comparación a otros tipos de vegetación presentes en el país como los bosques húmedos y nublados [48]. Los detalles de la descripción florística del sector pueden encontrarse en trabajos específicos [6], [8], [9], [19], [49].

En lo que respecta al estado de conservación de los ecosistemas naturales del bloque, tal y como se mencionó en la introducción, la región de los llanos ha estado sujeta a una fuerte intervención antrópica con propósitos agropecuarios principalmente, pero en el caso del estado Anzoátegui, los ambientes naturales también han sido afectados por la actividad agroindustrial, forestal y petrolera [5], [7], [8], [11]. Sin embargo, en la planicie aluvial del río Quebradón, que atraviesa el bloque Sincor, se ha notado que el proceso de arborización de las sabanas se acelera en áreas donde coinciden la ausencia de pastoreo, una menor incidencia de fuegos y varios años consecutivos con lluvias anuales por encima del promedio [19]. Esto se pudo corroborar en el presente estudio, donde se pudo apreciar el crecimiento del componente arbóreo.

Acerca de la relevancia particular de los bosques del bloque Sincor, los mismos constituyen un hábitat importante para diversas especies entre las que sobresale el babo morichalero (*Paleosuchus palpebrosus*). Este pequeño y elusivo cocodrilo, muestra preferencia por cursos de agua donde la vegetación provea de sombra como los presentes en el área estudiada [30], [55].

Por último, la situación actual de la vegetación del bloque se desconoce

, luego del abandono de los programas de conservación ambiental que tuvo lugar después de la estatización de la empresa Sincor.

v. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos en la clasificación, permitió indicar claramente que, en la vegetación en el bloque de Sincor, ocurrió un vigoroso proceso de sucesión ecológica, que se intensificó desde el año 1997 hasta el 2004. El mismo se caracterizó por una evidente conservación de los bosques y palmares ribereños, además de una notable expansión de los bosques deciduos a costa de una reducción proporcional de los matorrales deciduos.
- La visita de campo efectuada, resultó de vital importancia para la validación y ajustes en la

comprobación de los resultados de esta clasificación para obtener, luego de realizar las adaptaciones y ajustes necesarios, el mapa de vegetación definitivo.

- Analizando las características visuales de la imagen del 2003 en sus combinaciones RGB 453 y 753, se detectaron otros tipos de cobertura, que no se lograron discriminar en la clasificación no supervisada como posibles áreas de vegetación quemada y pequeños cuerpos de agua.
- Los mapas de vegetación a escala 1:10.000 generados con las imágenes de alta resolución (Ikonos) permitieron evaluar la capacidad de estas imágenes para apoyar el monitoreo e inspección de zonas críticas y sensibles desde el punto de vista ambiental, de manera regular y continua.

IN MEMORIAM: GUSTAVO MONTES URDANETA

Gustavo Montes Urdaneta, Barquisimeto, 9/4/1946 - Caracas, 24/07/2020, biólogo (UCV, 1971), PhD (Kings College, 1976), fue un docente e investigador de reconocido prestigio en universidades y centros de investigación como la UCV, USB, IVIC, UNEG, UNEFA, DIGECAFA, donde ejerció su especialidad en fisiología y ecología vegetal. También se destacó como pionero en los estudios de impacto ambiental, así como en el monitoreo de vegetación, teledetección, cartografía temática y análisis espacial mediado por Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Formó parte como socio fundador y directivo de la empresa consultora Tecnologías y Servicios Ambientales Geoclean, C.A., hasta su cese de operaciones en 2010. Sus últimos años los dedicó al seguimiento de problemáticas ecológicas asociadas a los pasivos ambientales de la industria petrolera, así como el almacenamiento de lodos rojos en de CVG-Bauxilum en Guayana [51] y la destrucción ambiental asociada a la explotación irregular de oro y otros minerales en el Arco Minero del Orinoco.



Figura. El Dr. Gustavo Montes Urdaneta en una salida de campo durante la ejecución del Proyecto Reserva Biológica Delta del Orinoco en 2004.

REFERENCIAS

- [1] R. Schargel. "Geomorfología y suelos", en *Catálogo anotado e ilustrado de la flora vascular de Los Llanos de Venezuela*, R. Duno de Stefano, G. Aymard y O. Huber, Editores. Caracas: FUDENA - Fundación Polar - FIBV, 2006, pp. 21-42.
- [2] C. González de Juana, J. M. Iturralde De Arozena y X. Picard. *Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas*, Tomo II. Caracas: Ediciones FONINVES, 1980.
- [3] A. R. Martínez. "The Orinoco Oil Belt, Venezuela", *Journal of Petroleum Geology*, vol. 10, no. 2, pp. 125-134, April 1987. DOI: 10.1111/j.1747-5457.1987.tb00204.x
- [4] R. Manduca. "La regionalización de Venezuela y su división geográfica político-administrativa", en *GeoVenezuela, Tomo 5, Geografía de la división político-territorial del país*, P. Cunill, Coordinador. Caracas: Fundación Empresas Polar, 2008, pp. 32-105.
- [5] Huber, O. y C. Alarcón. *Mapa de Vegetación de Venezuela. 1:2.000.000*. Caracas: MARNR - The Nature Conservancy, 1988.
- [6] G. A. Aymard y V. González. "Consideraciones generales sobre la composición florística y diversidad de los bosques de Los Llanos de Venezuela", en *Catálogo anotado e ilustrado de la flora vascular de Los Llanos de Venezuela*, R. Duno de Stefano, G. Aymard y O. Huber, Editores. Caracas: FUDENA - Fundación Polar - FIBV, 2006, pp. 59-71.
- [7] N. Cilento. "Estado Anzoátegui", en *GeoVenezuela, Tomo 5, Geografía de la división político-territorial del país*, P. Cunill, Coordinador. Caracas: Fundación Empresas Polar. 2008, pp. 240-343.
- [8] N. Dezzio, S. Flores, S. Zambrano-Martínez, L. Rodgers y E. Ochoa. "Estructura y composición florística de bosques secos y sabanas en los Llanos Orientales de Venezuela"

- tales del Orinoco, Venezuela”, *Interciencia*, vol. 33, no. 10, pp. 733-740, Octubre 2008.
- [9] G. A. Aymard, J. A. Farreras y R. Schargel. “Bosques secos macrotérmicos de Venezuela”, *BioLlania*, Edición Especial, vol. 10, pp. 155-177, Julio 2011.
- [10] D. H. Janzen. “Tropical dry forests: The most endangered major tropical ecosystem”, in *Biodiversity*, E. O. Wilson y F. M. Peter, Editors. Washington DC: National Academy Press. 1988, pp. 130-138.
- [11] M. Oliveira-Miranda, O. Huber, J. P. Rodriguez, F. Rojas-Suárez, R. Oliveira-Miranda, S. Zambrano-Martinez, y D. Giraldo, D. “Riesgo de eliminación de los ecosistemas terrestres en Venezuela”, en *Libro Rojo de los Ecosistemas Terrestres de Venezuela*, J. P. Rodriguez, F. Rojas-Suárez y D. Giraldo, Editores. Caracas: Provita, 2010, pp. 257-262.
- [12] Geoclean. “Estudio ecológico bi-temporal de la vegetación del Bloque de Producción de Sincor, Volumen II: Aspectos ecológicos”, *Tecnologías y Servicios Ambientales Geoclean C.A.*, Caracas, Inf. Téc., 2005.
- [13] N. Pettorelli, H. Schulte to Bühne, A. C. Shapiro, A. C. and P. Glover-Kapfer. “Satellite Remote Sensing for Conservation”, *WWF Conservation Technology Series*, vol. 1, no. 4, 2018. DOI: 10.13140/RG.2.2.25962.41926
- [14] R. Almalki, M. Khaki, P. M. Saco and J. F. Rodriguez. “Monitoring and mapping vegetation cover changes in arid and semi-arid areas using remote sensing technology: A review”, *Remote Sensing*, vol. 14, art. no. 5143, October 2022. DOI: 10.3390/rs14205143
- [15] E. J. Chacón. “Ecological and spatial modeling. Mapping ecosystems, landscape changes, and plant species distribution in Llanos del Orinoco, Venezuela”, Ph.D. dissertation, Wageningen University, the Netherlands, 2007.
- [16] I. Rincón. “Análisis espacial de la cobertura del bosque en Venezuela. Caso de estudio: Región norte del río Orinoco”, Trabajo de grado de licenciatura, Universidad Central de Venezuela, Caracas, 2011.
- [17] J. L. Millano-Tudare, F. J. Paredes-Trejo, E. Jaimes, N. Pineda, J. G. Mendoza, Y. Garcés e I. Pineda. “Patrones fenológicos de cinco tipos de cobertura en bosque seco tropical, Sur-Cojedes, Venezuela”, *Revista Agrollanía*, vol. 14, pp. 106-112, Enero-Diciembre 2017.
- [18] J. A. García, V. M. Vilachá y G. Montes. “Estudio ecológico bi-temporal 1990-2003 de la vegetación en un sector de los Llanos Centro-Orientales de Venezuela”, presentado en *II Jornadas Nacionales de Geomática*, Fundación Instituto de Ingeniería, Caracas, Octubre 2007.
- [19] V. González, M. Pietrangeli, M. Gutierrez, S. Rodriguez, G. De Martino, M. Rengifo y R. Durán. “Vegetación y uso actual”, en *Evaluación de los sistemas ecológicos de la faja petrolífera del Orinoco con base para la ordenación territorial*, M. Gutierrez, Editora. Caracas. CENAMB-UCV, 2008, 5.1-5.246.
- [20] B. Olivares-Campos, M. A. López-Beltrán y D. Lobo-Luján. “Cambios de usos de suelo y vegetación en la comunidad agraria Kashaama, Anzoátegui, Venezuela: 2001-2013”, *Revista Geográfica de América Central*, vol. 63, no. 2, pp. 224-246, Julio-Diciembre 2019. DOI: 10.15359/rgac.63-2.10
- [21] L. B. Pascal. “Developments in the Venezuelan Hydrocarbon Sector”, *Law and Business Review of the Americas*, vol. 15, no. 3, pp. 531-573, Summer 2009.
- [22] A. W. Martinius, J. Hegner, I. Kaas, R. Mjøs, C. Bejarano and X. Mathieu. “Geologic reservoir characterization and evaluation of the Petrocedeño Field, Early Miocene Oficina Formation, Orinoco Heavy Oil Belt, Venezuela”, in *Heavy-oil and Oil-sand Petroleum Systems in Alberta and Beyond*, AAPG Studies in Geology, vol. 64, F. J. Hein, D. Leckie, S. Larter and J. R. Suter, Editors. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2013, pp. 103-131.
- [23] R. Duno de Stefano y O. Huber. “Clima”, en *Catálogo anotado e ilustrado de la flora vascular de Los Llanos de Venezuela*, R. Duno de Stefano, G. Aymard y O. Huber, Editores. Caracas: FUDENA - Fundación Polar -FIBV, 2006, pp. 43-46.
- [24] J. Ferrer, R. Hernández y A. Ramos. “Clima, hidrología y aguas subterráneas”, en *Evaluación de los sistemas ecológicos de la faja petrolífera del Orinoco con base para la ordenación territorial*, M. Gutierrez, Editora. Caracas. CENAMB-UCV, 2008, 2.1-2.142.
- [25] L. F. Mogollón y J. Comerma. *Suelos de Venezuela*. Caracas: Palmaven, Petróleos de Venezuela, 1994.
- [26] MARNR. *Llanos disectados centrales, Región Natural 25*, Sistemas Ambientales Venezolanos, Proyecto VEN/79/001. Caracas: Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, 1983.
- [27] J. Paredes, Á. Valera, A. León, F. Contreras, J. Núñez, R. Durán, J. Martínez y R. Matheus. “Geología y geomorfología”, en *Evaluación de los sistemas ecológicos de la faja petrolífera del Orinoco con base para la ordenación territorial*, M. Gutierrez, Editora. Caracas. CENAMB-UCV, 2008, 3.1-3.107.
- [28] V. González. *Los Morichales de los Llanos Orientales. Un enfoque ecológico*. Caracas: Ediciones Corpoven, 1987.
- [29] Benthos. “Tercer monitoreo de la calidad del agua, los sedimentos y la biota, en el Componente de Producción de Sincor (Época de lluvia). Período

- 2004-2005", Benthos Estudios y Proyectos C.A., Caracas, Inf. Téc., 2005.
- [30] A. D. Pacheco. "Distribución, abundancia y estructura poblacional del babo morichalero (*Paleosuchus palpebrosus*) en los Llanos Orientales del Estado Anzoátegui", Trabajo de grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas, 2009.
- [31] T. M. Lillesand, R. W. Kiefer and J. W. Chipman. *Remote sensing and image interpretation*, 5th edition. New York: John Wiley and Sons, 2004.
- [32] T. M. Lillesand, R. W. Kiefer and J. W. Chipman. *Remote sensing and image interpretation*, 7th edition. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 2015.
- [33] A. Singh. "Digital change detection techniques using remotely-sensed data", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 10, no. 6, pp. 989-1003, 1989. DOI: 10.1080/01431168908903939
- [34] E. Chuvieco. "El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios", *Revista de Teledetección*, vol. 10, pp. 1-9, Diciembre 1998.
- [35] P. R. Coppin and M. E. Bauer. "Digital change detection in forest ecosystems with remote sensing imagery", *Remote Sensing Reviews*, vol. 13, no. 3-4, pp. 207-234, October 2009. DOI: 10.1080/02757259609532305
- [36] J. Al-doski, Sh. B. Mansor and H. Z. M. Shafri. "Change detection process and techniques", *Civil and Environmental Research*, vol. 3, no. 10, pp. 37-45, 2013.
- [37] M. Hussain, D. Chen, A. Cheng, H. Wei and D. Stanley. "Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 80, pp. 91-106, June 2013. DOI: 10.1016/j.isprsjrs.2013.03.006
- [38] G. M. Foody. 2002. "Status of land cover classification accuracy assessment", *Remote Sensing of Environment*, vol. 80, no. 1, pp. 185-201, April 2002. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00295-4
- [39] L. Ustin, Editor. *Remote Sensing for Natural Resource Management and Environmental Monitoring*. Manual of Remote Sensing, vol. 4. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004. ISBN-13: 978-0471317937
- [40] S. J. Goetz, R. K. Wright, A. J. Smith, E. Zinecker and E. Schaub. "IKONOS imagery for resource management: Tree cover, impervious surfaces, and riparian buffer analyses in the mid-Atlantic region", *Remote Sensing of Environment*, vol. 88, no. 1-2, pp. 195-208, November 2003. DOI: 10.1016/j.rse.2003.07.010
- [41] E. Chuvieco. *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madrid. Ediciones Rialp, S.A., 1996.
- [42] E. Chuvieco. *Fundamentals of Satellite Remote Sensing: An Environmental Approach*, 2nd edition. Boca Raton, FL: CRC Press, 2016.
- [43] J. R. Jensen. *Introductory digital image processing. A remote sensing perspective*, 4th edition. Glenview, IL: Pearson Education, 2015.
- [44] D. Lu, P. Mause, E. Brondízio and E. Moran, E. 2004 "change detection techniques", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, no. 12, pp. 2365-2407, June 2010. DOI: 10.1080/0143116031000139863
- [45] M. Khurana and V. Saxena. "Soft computing techniques for change detection in remotely sensed images: a review", *International Journal of Computer Science Issues*, vol. 12, no. 2, March 2015. DOI: 10.48550/arXiv.1506.00768
- [46] V. A. Didore, D. B. Nalawade and R. B. Vaidya. "Remote sensing data classification technique: a review", *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, vol. 11, no. 1, pp. 67-75, November 2021. DOI: 10.48175/IJARSCT-208467
- [47] E. H. E. Yasin and C. Kornel, "Evaluating satellite image classification: exploring methods and techniques", in *Geographic Information Systems: Data Science Approach*, R. Abdalla, Editor. London: IntechOpen, 2024. DOI: 10.5772/intechopen.111053.
- [48] R. Riina, R. Duno, G. Aymard, A. Fernández y O. Huber. "Análisis de la diversidad florística de los Llanos de Venezuela", en *Catálogo anotado e ilustrado de la flora vascular de Los Llanos de Venezuela*, R. Duno de Stefano, G. Aymard y O. Huber, Editores. Caracas: FUDENA - Fundación Polar - FIBV, 2006, pp. 107-122.
- [49] A. Fernández. "Los morichales de Los Llanos de Venezuela", en *Catálogo anotado e ilustrado de la flora vascular de Los Llanos de Venezuela*, R. Duno de Stefano, G. Aymard y O. Huber, Editores. Caracas: FUDENA - Fundación Polar - FIBV, 2006, pp. 91-98.
- [50] G. A. González. "Caracterización del hábitat y composición de la dieta del babo morichalero (*Paleosuchus palpebrosus*) en los Llanos Orientales, Estado Anzoátegui", Trabajo de grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas, 2010.
- [51] F. J. Velasco. "Los lodos rojos de Guayana: una bomba de tiempo socioambiental. Entrevista realizada al Dr. Gustavo Montes Urdaneta", *Territorios Comunes*, no. 3, pp. 38-45, Enero 2020.