



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI AGRARIA
DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI ED AMBIENTALI

DOTTORATO DI RICERCA IN
“Scienze Agrarie Alimentari ed Ambientali”

Coordinatore: Chiar.mo Prof. Bruno Mezzetti

**Implementación de Herramientas para la Evaluación y
Gestión Integrada de los Recursos Hídricos a Nivel de Paisaje en la Cuenca
Hidrográfica del Río Zaza. Provincia Sancti Spiritus, Cuba.**

Autore: Osmany Ceballo Melendres

Relatore: Prof. Andrea Galli (PhD)

XV ciclo Triennio Accademico 2013 - 2016

"El progreso o la decadencia de un pueblo se juzgan por la forma en que éste acepta y utiliza sus recursos naturales. Los suelos y las aguas pueden usarse de tal modo que constituyan bienes perdurables, capaces de rendir utilidades perpetuas. Hombre y naturaleza tienen que trabajar en armonía. Si se destruye el equilibrio de los recursos naturales se destruye también el equilibrio de la vida humana"

Person et al., 1949.

Dedicatoria. A "Manuel y Dalía", por su amor infinito.

Agradecimientos:

- . Al pueblo italiano, la Università Politecnica delle Marche y a los profesores del doctorado de investigación en Ciencias agraria, alimentaria y ambiente por darme la posibilidad de desarrollar mis estudios curriculares y el presente trabajo de investigación.*
- . Al profesor y tutor Andrea Galli y su esposa Antonietta por su estimable guía educativa, investigativa y académica; amabilidad, sustento y calidez.*
- . Al profesor Ernesto Marcheggiani y su esposa Elena por su apoyo y consideración.*
- . A los profesores Ben Somers, Laurent Tits y Wanda De Keersmaecker por su apreciable cooperación, en la Universidad Católica de Leuven, Bélgica.*
- . Al Catedrático Bartolomé Andreo Navarro, y a los profesores y estudiantes de pregrado, maestrías y doctorado de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Málaga, España.*
- . A los profesores y árbitros, Pablo Jiménez Garilán y Alfonso Fernández Manso, por permitirme con sus criterios y juicio, realizar un apropiado informe de tesis.*
- . A los investigadores Ezio Prestaz e Iban Ameztoy.*
- . A los estudiantes del xv ciclo de estudios de doctorado, por su empatía y simpatía.*
- . A Tamara, Luca, Mayte, Vincent, Dayana y Nadia por ser excelentes y espléndidos.*
- . A la familia y amig@s que hacen lo posible e imposible porque me sienta acompañado, motivado y protegido desde una conexión de internet; gracias a tod@s; especialmente a Jaimito y Alaennis.*

En Cuba:

- . Al Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, al Instituto de Meteorología, la Universidad de Sancti Spiritus, la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico, al Consejo de Ciencias Hidrográficas y al Sistema Provincial de Áreas Protegidas.*
- . A los especialistas y trabajadores del Sistema Meteorológico, Ambiental y de Ciencias.*
- . A los investigadores Reinaldo Rojas Consuegra y Vladimir Guerrera Velasco.*
- . A los profesores y expertos Julio P. García Lahera, Ernesto Pulido, Leonel Díaz, Jose Neira, Néstor Álvarez, Miguel García, Celia Pina, Fernando Medinilla, Magaly Torres, Félix Dentón, David Calzada, Katiuska Lemus, Ana Frías, Pablo Hernández, Jorge Pardo, Pablo Guellar, Esteban Acosta y Fordanis Puerta de Armas.*
- . A los espeleólogos Leonardo Cañizares, Osmany Rodríguez y Manuel Romero.*
- . A Alfredo Ruiz Arias y Alfredo Domínguez por su apreciable consideración y deferencia.*
- . A Ignacio, Omaidá y Tania por su hermandad, fraternidad, afecto y cariño de tantos años.*
- . A Manolito, Idalmis, Mabel, Maridalia y Lavel por su excepcional esfuerzo cotidiano.*
- . A mi Mamá, quien sostiene con su amor, optimismo y voluntad, mi vitalidad y fe.*

RESUMEN

Los límites naturales de la cuenca hidrográfica del río Zaza se enmarcan en la región central de Cuba, donde existe un fuerte desarrollo de sistemas hidráulicos y el paisaje está evaluado como un geosistema de categoría mediano a fuertemente modificado, determinado por el manejo de los recursos naturales en función del desarrollo agropecuario y en menor escala el industrial.

La investigación tuvo como objetivo proponer un modelo y herramientas de evaluación y planificación del agua en el marco de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos que logre el aprovechamiento óptimo de los paisajes de la cuenca desde la perspectiva del desarrollo sostenible y la adaptación al cambio climático. Además, optimizar la detección y cartografía para imágenes multiespectrales de las especies que conforman el bosque de mangle en la zona costera sur de la provincia Sancti Spíritus; como un enfoque de modelo para su uso en cualquier región con presencia de bosques de mangle en países tropicales y subtropicales.

La caracterización geohistórica de la cuenca Zaza y de los subsistemas ambiental, social y económico aportó una importante información línea base y de diagnóstico. El uso de la herramienta AQUATOOL+, permitió la edición, simulación, revisión y análisis de alternativas de gestión de los recursos hídricos.

Con la teledetección, a partir de imágenes multiespectrales LANDSAT 8 se obtuvieron imágenes multitemporales que garantizan mejor respuesta cuando se crean mapas utilizando la metodología MESMA, resultando óptimo para reconocer los impactos en las zonas costeras.

El uso de la metodología MESMA y la elaboración de información fenológica para la costa sur de la provincia permitió obtener por vez primera para el archipiélago cubano mapas para diferentes clases que incluyen el bosque de mangle y otros ecosistemas que presentan determinados impactos; estos mapas fueron validados y muestran resultados aceptables lo cual permitirá establecer y aplicar esta metodología en estudios futuros logrando conseguir la evolución de los ecosistemas de bosque de mangle, de la línea de costa y su posible aplicación a otros ecosistemas tanto costero como de interior y montaña.

RIASSUNTO

I limiti naturali del bacino idrografico del fiume Zaza si trovano nella regione centrale di Cuba. In questo bacino il sistema idrico è fortemente sviluppato ed il paesaggio è classificato come un geosistema da mediamente a fortemente modificato; questa classificazione dipende dalla gestione delle risorse naturali in funzione dello sviluppo agronomico, zootecnico e, in misura minore, industriale.

La ricerca ha perseguito l'obiettivo di proporre un modello ed alcuni strumenti di valutazione e pianificazione della gestione dell'acqua come parte di una "Gestione Integrata delle Risorse Idriche", per lo sfruttamento ottimale delle risorse territoriali del bacino secondo la prospettiva dello sviluppo sostenibile e dell'adattamento al cambiamento climatico. Inoltre, un secondo obiettivo è stato quello di ottimizzare la localizzazione e la rappresentazione cartografica, mediante l'elaborazione di immagini multispettrali da satellite, di specie arboree che formano il bosco di mangrovia nella zona costiera a Sud della provincia di Sancti Spíritus, per un utilizzo della metodologia in qualsiasi regione con presenza di boschi di mangrovia nei paesi tropicali e subtropicali.

La caratterizzazione geografica e storica del bacino del fiume Zaza, dei suoi sottosistemi ambientale, sociale ed economico, ha fornito un'importante informazione di base. L'utilizzo del modello AQUATOOL+ ha permesso la modifica, la simulazione, revisione ed analisi delle alternative di gestione delle risorse idriche nel bacino oggetto di studio.

Mediante tecniche di telerilevamento, a partire da immagini multispettrali LANDSAT 8, si sono ottenute immagini multitemporali che hanno permesso, utilizzando la metodologia MESMA, di ottenere ottimi risultati nella caratterizzazione delle formazioni boschive di mangrovie al fine di monitorare gli impatti che si generano in questi ecosistemi fragili delle zone costiere.

L'uso della metodologia MESMA e l'elaborazione dell'informazione fenologica per la costa meridionale della provincia hanno permesso di classificare per la prima volta per l'arcipelago cubano differenti tipologie che includono il bosco di mangrovia ed altri ecosistemi. I risultati delle classificazioni sono stati validati e sono stati valutati come decisamente accettabili, il che permette di applicare questa metodologia in studi futuri finalizzati a monitorare l'evoluzione degli ecosistemi del bosco di mangrovia, della linea di costa e di altri ecosistemi, sia costieri che interni e montani.

SUMMARY

Basin of Zaza River stands amongst key water reservoirs in Cuba. With a capillary and well-developed hydrological ash of streams and channels, the buffer of its natural edges cuts the central part of the island. The basin's river influence shaped the landscape, insofar as its classification ranges from average to strongly modified geosystem, accordingly to the Cuban system. The anthropic pressure, with heavily manned natural resources management schemes, has imprinted the major changes over the time, mainly due to agricultural needs and in a lesser extent to the industrial ones.

The main objective of this research is to propose a framework and a set of related water assessment and planning tools as components of an "Integrated Water Resources Management" as a whole. The overarching idea is to achieve an improved use of basin's resources, at landscapes scale, along with sustainable development and global climate changes issues and challenges.

The geographic and historical information profile of the Zaza basin have been the baseline to set the diagnostics taking into account main environmental, social and economic components. The model AQUATOOL+ is being used to simulating, analyzing and assessing the alternative water resources management scenarios. In particular, using remotely sensed satellite multispectral images it has been possible to optimize the detection and mapping of the focal species shaping the mangrove forest in the southern coastal zone of Sancti Spíritus province.

A first promising outcome outlines as applying remote sensing techniques and the MESMA method, over a set of multitemporal LANDSAT-8 images, it is possible to detect and classify the extent of mangrove forest canopy and some main aspects of its vegetational state. The combination with phenological data arrays allowed also, for the first time in the Cuba, to build a series of maps of the different typologies of mangrove forest, reporting also collateral impacts on different ecosystem components. The map validation moreover has shown good results in terms of accuracy, which challenges for testing the methodology in future experiments to monitoring the evolution of the mangrove forest ecosystems, as well as of other systems like coastline, inlands and mountain ecosystems for instance. These results strengthen the possibility of monitoring impacts on mangrove forest in the coastal tropical zones using -less expensive and easier to be collected- remote sensed information. Once operational the methodology shall be maiden available to all those who operates in tropical and subtropical mangrove forests.

LISTADO DE ACRÓNIMOS

ANPP	Asamblea Nacional del Poder Popular de Cuba
AzCuba	Grupo Azucarero de Cuba
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CITMA	Ciencia Tecnología y Medio Ambiente
CNCH	Consejo Nacional de Cuencas Hidrográficas
CNUMAD	Convención de las Naciones Unidas de Medio Ambiente y Desarrollo
DH	Demarcación Hidrográfica
DIHM	Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente
DMA	Directiva Marco Europea en materia de aguas
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GIRH	Gestión Integrada de los Recursos Hídricos
GWP	Global Water Partnership
I+D	Investigación + Desarrollo
INBO	International Network of Basin Organizations
INRH	Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MEP	Ministerio de Economía y Planificación
MINAGRI	Ministerio de la Agricultura
ONEI	Oficina Nacional de Estadística e Información
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PHC	Planes Hidrológicos de Cuencas
SNAP	Sistema Nacional de Áreas Protegidas
SPAP	Sistema Provincial de Áreas Protegidas
SSD	Sistema de Soporte a la Decisión
SGC	Simulación de la Gestión de Cuencas
SRH	Sistemas de Recursos Hídricos
TGS	Teoría General de los Sistemas
WEAP	Water Evaluation and Planning
WWAP	World Water Assessment Programme

ÍNDICE

RESUMEN.....	IV
RIASSUNTO	V
SUMMARY	VI
LISTADO DE ACRÓNIMOS	VII
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Motivación de la investigación.....	1
Objetivo general:	6
Objetivos específicos:.....	6
Bibliografía.....	7
Capítulo 2. Fundamentos teóricos metodológicos	8
2.1. Estado del arte.....	8
2.1.1. Antecedentes. Gestión integrada de los recursos hídricos	9
2.1.2. La gestión de los recursos hídricos en Cuba	14
2.1.3. Modelos matemáticos y computacionales.....	20
2.1.4. La teledetección	35
2.1.5. Teoría del paisaje	38
2.2. El desarrollo sostenible en la construcción de un modelo de gestión integrada de los recursos hídricos y costeros. Caso de estudio: Cuba	47
Bibliografía.....	60
Capítulo 3. Caracterización de los subsistemas ambiental, social y económico en la cuenca hidrográfica del río Zaza.....	67
3.1. Evolución geohistórica de la cuenca Zaza durante el proceso de antropización siglos XVI al XX	70
3.2. Caracterización del subsistema natural	75
3.2.1. Geología y tectónica.....	75
3.2.2. Relieve	86
3.2.3. Suelos.....	91
3.2.4. Clima.....	95
3.2.5. Hidrología e hidrogeología	102
3.2.6. Conocimientos del estado actual sobre vegetación, fauna y la conservación de la diversidad biológica.....	112
3.3. Caracterización del subsistema social	123
3.4. Caracterización del subsistema económico	124

Bibliografía.....	128
Capítulo 4. Uso de la herramienta AQUATOOL+ para la gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca hidrográfica del río Zaza	133
4.1. Metodología utilizada	133
4.1.1. Fundamentos del modelo Simges de Aquatool+.....	135
4.1.2. Criterios de garantía de abastecimiento	137
4.2. Construcción del modelo	138
4.2.1. Etapas del diseño y tratamiento de datos	138
4.3. Simulación ejecutada aguas abajo de embalse Zaza.....	147
4.3.1. Volumen almacenado.....	148
4.3.2. Aportaciones al embalse Zaza.....	150
4.3.3. Seltas en el embalse Zaza.....	151
4.3.4. Caudal sanitario.....	152
Bibliografía.....	154
Capítulo 5. Análisis espectral con imágenes Landsat y uso de la metodología MESMA. Caso de estudio bosque de mangle en la costa sur de la provincia de Sancti Spíritus, Cuba.....	156
5.1. Área de estudio.....	159
5.2. Características generales y fenológicas del bosque de mangle	167
5.2.1. Observaciones de campo.....	175
5.2.2. Series de tiempo de imágenes multiespectrales Landsat – 8 OLI.....	177
5.3. Relación entre el comportamiento fenológico del bosque de mangle y la reflectancia con imágenes multiespectrales Landsat – 8 OLI monotemporales	178
5.4. Interpretación cartográfica del bosque de mangle usando la metodología de Análisis de Mezcla Espectral de Múltiple Endmember con imágenes multiespectrales Landsat – 8 OLI.....	184
5.4.1. Análisis con la metodología MESMA para imágenes monotemporal y multitemporal	186
Bibliografía.....	196
CONCLUSIONES	200
RECOMENDACIONES	202
Anexo 1	203
Anexo 2	204

CAPÍTULO 1

Capítulo 1. Introducción

1.1. Motivación de la investigación

La República de Cuba es un archipiélago con una extensión territorial de 110 992 km², formado por la Isla de Cuba, la Isla de la Juventud y otras 1 600 isletas y cayos. Representa el 0,08% de las tierras emergidas del planeta, ocupando el decimoquinto lugar entre las mayores islas del mundo. El territorio cubano está distribuido, **Figura 1**, según la división político-administrativa de junio 1976, modificada en agosto del 2010, en 15 provincias y 168 municipios, incluyendo el municipio especial Isla de la Juventud.



Figura 1. División político-administrativa de la República de Cuba. **Fuente:** ANPP.

Geográficamente se encuentra situada en la región de Arcos Caribe Antillanos, entre los 18° y 24° de latitud norte y los 75° y 85° de longitud oeste; ocupando una posición que ejerce notable influencia sobre las características de las circulaciones atmosférica y marina de dicha región, **Figura 2**. Según la (clasificación climática de Köppen, modificada, Aw), predominan las condiciones tropicales marítimas, con una clara estacionalidad en el comportamiento de la precipitación; donde la configuración y la disposición de los sistemas montañosos, combinadas con las características locales de la circulación atmosférica, provocan que se transite a otros tipos y subtipos de clima en determinadas áreas. Dentro de la región existen dos subregiones, que han sido identificadas del modo siguiente (Nuevo Atlas Nacional de Cuba, 1989):

Caribe occidental: caracterizada por la alternancia de vientos estacionales y calmas, e influencia continental durante el invierno.

Caribe oriental: caracterizada por la influencia de vientos alisios relativamente húmedos y el efecto notable del régimen de montaña (sotavento y barlovento) y con pequeñas franjas semidesérticas en las zonas meridionales de las Antillas Mayores.

La frontera entre estas subregiones pasa sobre el territorio cubano, marcando una diferencia notable en el comportamiento del régimen climático e hidrológico de sus regiones occidental, central y oriental. De acuerdo a lo anterior, en estas regiones se distingue una disimilitud en el dominio de los patrones sinópticos que dan lugar a las precipitaciones en el transcurso del año y, en consecuencia, se observa un modo diferente de distribuirse espacial y temporalmente, la lámina de precipitación y el resto de las variables hidrometeorológicas.

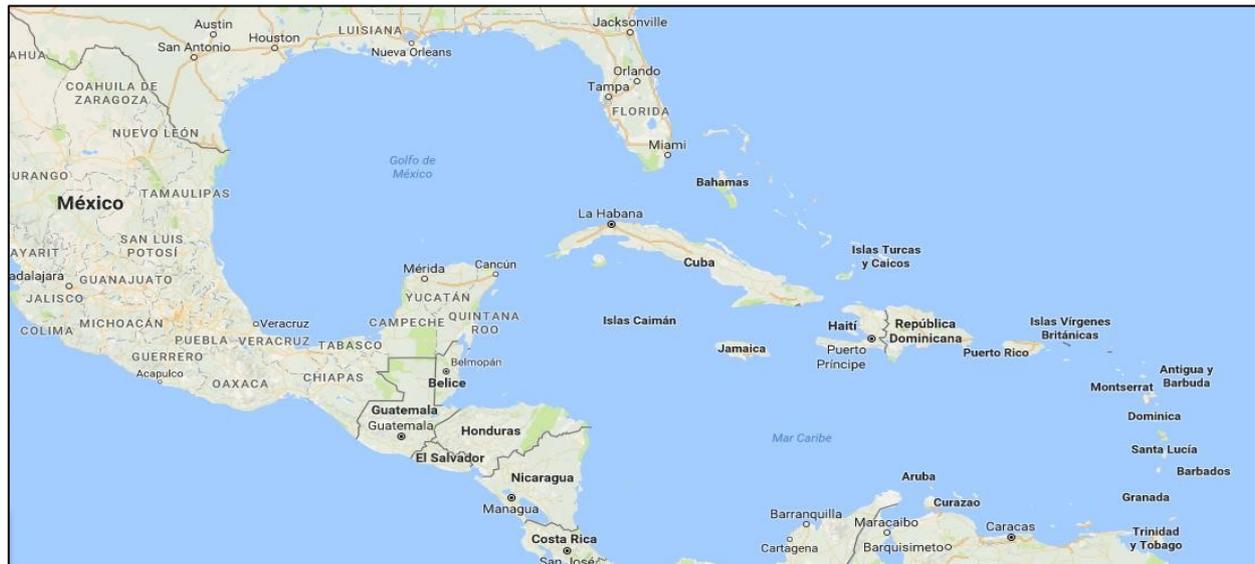


Figura 2. Cuba, en el entorno regional del Mar Caribe. **Fuente:** Google Maps.

Una particularidad que influye significativamente en las características del régimen hidrológico del país, es el contraste que se observa en su relieve, caracterizado por la alternancia de extensas llanuras y montañas, que por su disposición se interponen al paso de las masas de aire húmedo. En las regiones occidental y central predominan las llanuras y alturas bajas, aunque esta regularidad es interrumpida por la Cordillera de Guaniguanico y la Sierra de los Órganos, en la provincia de Pinar del Río y Montañas de Guamuhaya al sur de las provincias centrales (Villa Clara, Cienfuegos y Sancti Spiritus). En la región oriental predomina el relieve montañoso con llanuras que sufren intensamente el efecto de barrera orográfica. Otra característica notable es la apreciable acción reguladora del Carso sobre el escurrimiento superficial en las regiones occidental y central de Cuba.

Las precipitaciones constituyen la única fuente de alimentación de los procesos hidrológicos en el territorio. La lámina media anual de esta variable para el archipiélago ha sido estimada en 1 335 mm, según Mapa isoyético de la República de Cuba, versión 1961-2000 (INRH, 2006).

La distribución espacial de dicha lámina es muy irregular; en las regiones montañosas precipitan cada año más de 1 500 mm, llegando en las zonas más elevadas a valores promedios superiores a los

3 800 mm (macizo Sagua Baracoa, región oriental); mientras que en las llanuras la lluvia es del orden de 1 200 mm o menos. La zona de Tortuguilla (territorio de Maisí-Guantánamo, región oriental), reportada como la más árida de Cuba, recibe anualmente láminas inferiores a los 400 mm. El promedio de días con lluvia para un año, aumenta de 140 en las llanuras costeras a más de 200 en las zonas montañosas. La temporada lluviosa no comienza simultáneamente en todo el país, el inicio de este período oscila desde finales de abril a principios de junio, lo que contribuye a la diferencia que existe en el modo de manifestarse y distribuirse los fenómenos hidrológicos en las distintas regiones. En el tiempo se aprecia la alternancia cíclica de períodos de abundantes precipitaciones, con sequías de diferente intensidad y duración (Planos, 1997).

En Cuba la configuración alargada y estrecha de la isla mayor del archipiélago cubano, hace que la divisoria principal de las aguas superficiales coincida con su eje central, determinando dos vertientes hidrográficas mayores -una septentrional y otra meridional-, con 642 cuencas hidrográficas mayores de 5 km². Del total de cuencas hidrográficas: 308 (48%) en la vertiente norte y 334 (52%) en la vertiente sur; 561 (87%) están en el rango de 5 – 200 km², 66 (10%) en el rango de 201 – 1000 km² y solamente 15 cuencas hidrográficas superan los 1 000 km².

Es el sector de los recursos hídricos, por su dependencia del clima, uno de los más vulnerables a cualquier anomalía en el comportamiento de este elemento de la naturaleza. La ocurrencia de fenómenos extremos, como las sequías y las grandes precipitaciones, impactan directamente la distribución espacio-temporal de las variables hidrológicas y, por tanto, a todas las actividades relacionadas con el agua. Por esta razón, el manejo de este recurso tiene que hacerse con una visión integral, para lograr una solución armoniosa de la relación que se establece entre el clima, la disponibilidad de agua, su entrega y demanda, el desarrollo socioeconómico y la protección del medio ambiente (INSMET, 2000).

Las sequías son fenómenos de origen esencialmente meteorológico, cuyos efectos se transmiten luego a través de todos los componentes del ciclo hidrológico, de manera que las causas de estas deben buscarse en el comportamiento global de la atmósfera, las cuales no están del todo dilucidadas (Fernández, 2003).

En, Guía para la acción frente a la sequía (INRH-CENHICA, 2000), se plantea que en Cuba los factores fisiográficos tales como la forma de la cuenca, altitud media sobre el nivel del mar, topografía, suelos, etc., determinan las características del escurrimiento superficial y en general de su red fluvial, los cuales están relacionados directamente con el comportamiento de las precipitaciones como su única fuente de alimentación. Acorde con el área del archipiélago cubano y las

precipitaciones, en el país las lluvias aportan como promedio cada año 152 400 hm³ de agua, de la cual vuelve a la atmósfera una cantidad significativa en forma de vapor de agua y el resto se convierte en escorrentía superficial (31 683 hm³) que alimenta ríos, arroyos o lagos naturales y artificiales, se absorbe por las plantas o se infiltra en el suelo para formar parte de las reservas de agua subterráneas (6 400 hm³).

Los recursos hídricos disponibles a partir de la infraestructura hidráulica, según Rivero et *al.*, (2013), ascienden a 13 667 hm³, el desarrollo de la misma permite poner a disposición de las demandas económicas, sociales y ambientales, el 57% de los recursos aprovechables, **Figura 3**. La infraestructura hidráulica actual en Cuba cuenta con 239 grandes embalses (embalse Zaza: el mayor del país con una capacidad de 1020 hm³), los que almacenan cerca de 9 000 hm³. A ellos se unen 61 derivadoras, 805 pequeños embalses, 788,4 km de canales magistrales, 12 grandes estaciones de bombeo, 1 300,4 km de diques y 1 009,2 km de canales para la protección contra inundaciones.

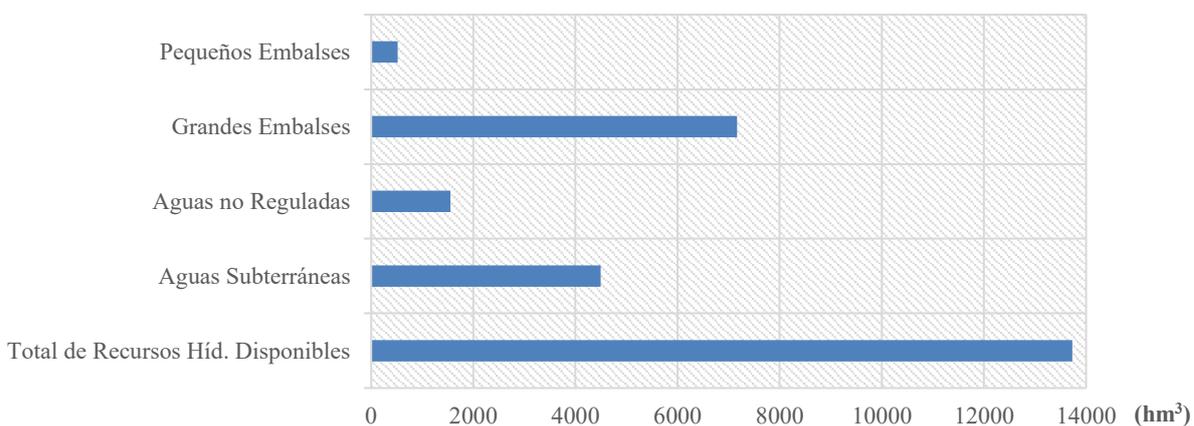


Figura 3. Recursos hídricos disponibles en Cuba (hm³). **Fuente:** INRH.

Los límites naturales de la cuenca hidrográfica del río Zaza se enmarcan en la región central de la Isla de Cuba, **Figura 4**, entre la zona hidrológica del norte de las “Alturas del Nordeste”, donde se desarrollan ríos y arroyos de poca longitud y caudal, muchos de ellos de carácter intermitente, hacia el extremo noroeste se distingue la red hidrográfica de la cuenca Sagua la Chica. Por el sur el límite está determinado por el mar Caribe; mientras que por el oeste limita con las cuencas de los ríos Agabama y Banao y la vertiente oeste de Montañas de Sancti Spíritus, al este con las cuencas Jatibonico del Sur y Naranjo (Puerta de Armas, 2004). Cuba se divide en tres zonas de demanda hídrica (INRH-CENHICA, 2000), la cuenca hidrográfica del río Zaza se encuentra en la (Zona 1), estando considerada como subhúmeda; y por lo tanto con demandas de riego moderadas.

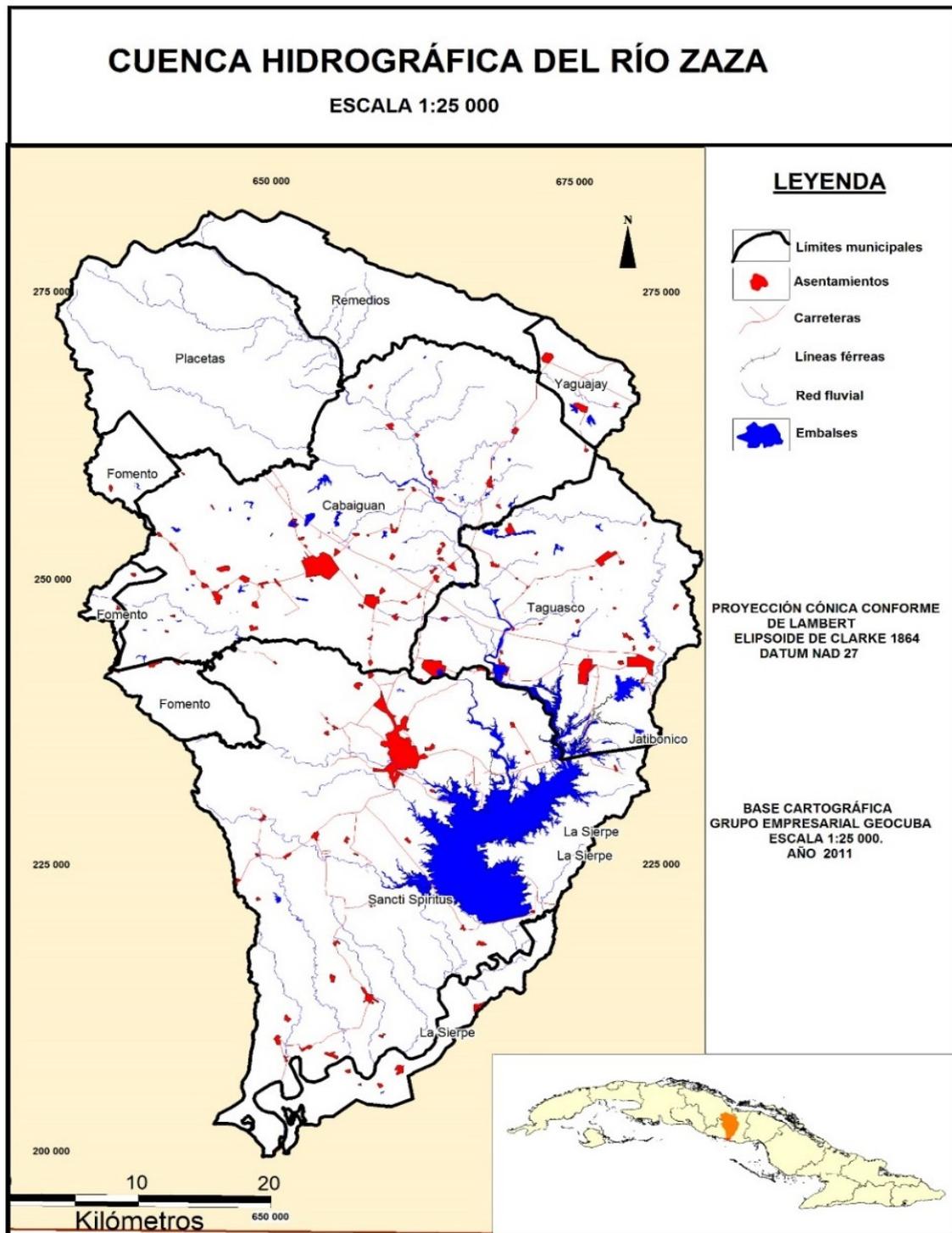


Figura 4. Cuenca hidrográfica del río Zaza.

Si las actuales tendencias de explotación de los paisajes en la cuenca del río Zaza continuaran durante mucho más tiempo, en un futuro cercano será ya demasiado tarde para su recuperación eficaz. La erosión del suelo, como algunas enfermedades del hombre no puede remediarse cuando se ha descuidado sus primeras etapas.

Es en este contexto, que anteriormente hemos descrito, en el que se desarrolla nuestro trabajo; teniéndose como objetivos de la investigación:

Objetivo general:

1. Proponer la implementación de un modelo y herramientas de evaluación y planificación del agua en el marco de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, para lograr el aprovechamiento óptimo de los paisajes de la cuenca hidrográfica del río Zaza desde la perspectiva del desarrollo sostenible y la adaptación al cambio climático.
2. Mejorar la detección y cartografía para imágenes multiespectrales de las especies que conforman el bosque de mangle en la zona costera sur de la provincia Sancti Spíritus, Cuba, como un enfoque de modelo para su uso en cualquier región con presencia de bosques de mangle en países tropicales y subtropicales.

Objetivos específicos:

1. Sistematizar los fundamentos teóricos referenciales sobre la Gestión Integrada de Recursos Hídricos en las Cuencas Hidrográficas.
2. Caracterizar los subsistemas: medioambiental, económico y social en la cuenca hidrográfica del río Zaza.
3. Implementar un Sistema de Soporte a las Decisiones “AQUATOOL+” para la gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca hidrográfica del río Zaza que permita la evaluación y planificación de la distribución de agua.
4. Utilizando imágenes multiespectrales Landsat – 8 OLI y la metodología de Análisis Espectral Múltiple de Endmember (MESMA, por sus siglas en inglés), obtener la separabilidad entre las especies del bosque de mangle y otros componentes naturales a partir de: a) evaluar en el periodo climático (2014-2015), la relación entre la fenología de las especies del bosque de mangle y la reflectancia para imágenes monotemporales. b) Obtener aplicando la metodología MESMA, la detección y cartografía de las especies que conforman el bosque de mangle diferenciando los principales componentes naturales; para imágenes monotemporales y multitemporales.

Bibliografía

Academia de Ciencias de Cuba; 1989; Nuevo Atlas Nacional de Cuba.

CITMA; 2013; Informe de diagnóstico para el ordenamiento ambiental de la cuenca del río Zaza. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Sancti Spíritus, Cuba. Inédito.

Fernández, Hugo W.; 2003; Sequías Meteorológicas en el Cono Sur de América. Asociaciones con El Niño Oscilación del Sur; Tesis Doctoral 2001; Publicada por EFU (2003) Editorial Fundación Universidad de San Juan, Santa Fe 198 Oeste-5400 San Juan, República Argentina.

INRH-CENHICA; 2000; Guía para la acción frente a la sequía. Inédito.

INRH; 2006; Resolución No. 4. Medias históricas alcanzadas en el Mapa Isoyético de la República de Cuba, versión 1961-2000. Gaceta Oficial de la República.

INSMET; 2000; Informe cambio climático. Inédito.

Person, H. S., Johnston Coil, E. y Beall, Robert T.; 1949; Las pequeñas fuentes fluviales; Publicación TC-244; Washington, D.C.

Planos Gutiérrez, Eduardo; 1997; La Hidrología Operativa: Base para el Desarrollo de la Hidrología Aplicada y de los Aprovechamientos Hidráulicos: Experiencia Cubana; ISBN: 92-9089-053-3. Edición Internet: abril de 1997; http://friend-amigo.org/t_stodomes.html

Puerta de Armas, Y. G.; 2004; Estudio ambiental para la planificación y gestión sostenible de la cuenca hidrográfica del río Zaza. (pp. 100). La Habana, Cuba: Tesis de Diploma. Facultad de Geografía. Universidad de La Habana. Inédito.

Rivero, O, Boquet Roque, A., Rodríguez C. M., Favier, L., Abreu Tamayo, M.; 2013; Cuba: geografía, economía y sociedad. En Planos, E., Vega, R. y Guevara, A. (Editores); 2013; Impacto del Cambio Climático y Medidas de Adaptación en Cuba. Instituto de Meteorología, Agencia de Medio Ambiente, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. La Habana, Cuba, 430 pp.

CAPÍTULO 2

Capítulo 2. Fundamentos teóricos metodológicos

2.1. Estado del arte

Según Global Water Partnership (GWP) e International Network of Basin Organizations (INBO), en su “Manual para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en Cuencas”, 2009, una cuenca hidrográfica o lacustre es el área delimitada por las divisorias de aguas de un sistema de arroyos y ríos que convergen en la misma desembocadura. En el caso de los ríos, esta desembocadura es generalmente el mar, pero puede ser un cuerpo de agua interior, como un lago o humedal. Una cuenca subterránea o acuífero es un cuerpo discreto de agua subterránea. Se ha reconocido que la cuenca es una unidad hidrológica práctica para la gestión de recursos hídricos.

La presión sobre los recursos hídricos pone de manifiesto las interdependencias hidrológicas, sociales, económicas y ecológicas que existen en las cuencas hidrográficas, lacustres y acuíferos. Esas interdependencias exigen enfoques más integrados para la gestión de los recursos naturales, especialmente el agua y el suelo. Esto ha llevado a una relación dinámica entre las partes interesadas de las cuencas y los gobiernos centrales, en el sentido de trabajar en forma conjunta para asegurar la viabilidad de sus decisiones con el fin de alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible (GWP & INBO, 2009).

Sea a nivel transfronterizo, nacional u otras escalas político-administrativas, los recursos hídricos se encuentran en interacción compleja con tres subsistemas -ambiental, social y económico- que convierten la toma de decisiones en un aspecto difícil y contradictorio; por esto, mantener políticas fragmentadas de gestión del agua, como aquellas orientadas solo al manejo de la demanda y oferta de agua para brindar servicios a cada uno de los subsistemas, es cada vez menos sostenible. La gestión hídrica debe ser holística, sistémica, integradora. En la actualidad la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) es el paradigma dominante utilizado por los países que más han avanzado en políticas eficientes de la gestión del agua dulce.

El enfoque integrado coordina la gestión de recursos hídricos en todos los sectores y grupos de interés, y a diferentes escalas, desde lo local a lo internacional. Pone énfasis en la participación en los procesos nacionales de formulación de leyes y políticas, estableciendo una buena gobernabilidad y creando acuerdos normativos e institucionales efectivos que permitan tomar decisiones más equitativas y sostenibles. Toda una gama de herramientas, tales como evaluaciones sociales y ambientales, instrumentos económicos, sistemas de información y monitoreo, respaldan este proceso (GWP & INBO, 2009).

2.1.1. Antecedentes. Gestión integrada de los recursos hídricos

Según, Gain et *al.*, (2013), la GIRH es una forma integrada de gestión sostenible del agua y los recursos asociados a escala de cuencas hidrográficas, que implica formas de gobernanza específicas orientadas a garantizar la participación de múltiples partes interesadas, el acceso equitativo y el uso eficiente de los recursos de agua. La pregunta crítica, según estos autores, es en qué medida estas dimensiones de la GIRH fortalecen la capacidad adaptativa frente al cambio climático.

Los recursos mundiales de agua están bajo presiones crecientes. El crecimiento de la población, el incremento en la actividad económica y la mejor calidad de vida llevan a conflictos y a una creciente competencia por los recursos limitados de agua dulce. La combinación de problemas como la inequidad social, marginalidad económica y falta de programas de superación de la penuria, obligan a las personas que viven en la extrema pobreza a sobreexplotar las tierras y los recursos forestales, lo que habitualmente resulta en impactos negativos sobre los recursos de agua. Paralelamente, las carencias de medidas de control contra la polución degradan aún más estos recursos (GWP, 2000).

De acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre Cambios Climáticos (IPCC, 1997), los impactos del cambio climático dependerán de: 1) el estado comparativo del sistema de abastecimiento de agua, y de la capacidad de los gestores de recursos hídricos para responder no sólo al propio cambio climático sino también al crecimiento de la población y a los cambios en la demanda, en las tecnologías y en las condiciones económicas, sociales y legislativas. 2) reducir la vulnerabilidad potencial de los sistemas hídricos frente al cambio climático, a través de varias líneas de actuación, entre las cuales se destacan: determinación de tarifas, iniciativas orientadas a la eficiencia hídrica, mejoras en las infraestructuras de suministro de agua, políticas agrícolas y planificación/gestión urbanística. 3) A nivel nacional/regional sería prioritario dar más preponderancia a la gestión integrada e intersectorial de los recursos hídricos, utilizar las cuencas fluviales como unidades de gestión de recursos, o fomentar prácticas de determinación de precios y de gestión apropiadas. El aumento de la demanda, la prevalencia y la sensibilidad de muchos sistemas de gestión de agua simples frente a las fluctuaciones de precipitación y escorrentía, y las considerables cantidades de tiempo y dinero que se requieren para poner en marcha muchas de las medidas de adaptación, hacen que el sector de los recursos hídricos sea, en numerosas regiones y países, vulnerable a los posibles cambios del clima.

Según GWP, (2000), la gestión integrada de los recursos hídricos es un proceso que promueve el manejo y desarrollo coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar

el bienestar social y económico resultante de manera equitativa, sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales.

En el ámbito internacional, un análisis histórico de la GIRH basada en múltiples publicaciones fue realizada por Gain et *al.*, (2013); en la obra “Can Integrated Water Resources Management Increase Adaptive Capacity to Climate Change Adaptation. *A Critical Review*”. De acuerdo con los autores, la GIRH tiene sus raíces en las tentativas de integrar los diferentes aspectos de la gestión del agua a escala de cuenca en Europa, América del Norte, Australia y otros países, en algunos de los cuales surgieron experiencias de gestión integrada del agua en cuencas hidrográficas desde la primera mitad del siglo XX, como es el caso de la “*Autoridad del Valle de Tennessee*” (TVA, por sus siglas en inglés), surgida en 1933 y caracterizada por presentar un enfoque tecnocrático en la planificación.

Los autores citados también referencian los casos de Gran Bretaña (donde en 1930 se establecieron los distritos de drenaje basados en cuencas individuales, y en 1945 se aprobó la Ley de Aguas, que estableció la cuenca como unidad fundamental de gestión de la pesca y la contaminación a nivel nacional), Francia (con la creación, en 1921, de la “*Compagnie Nationale du Rhône*” orientada a la generación de energía hidroeléctrica) y Australia (con la planificación regional de recursos naturales durante los años 1930 y 1940). También destacan que, a partir del éxito de la TVA, muchos países en desarrollo adoptaron el modelo de planificación de cuencas hidrográficas en sus proyectos de ingeniería de agua a gran escala; sin embargo, el centro de atención de esa planificación era el beneficio humano.

Continuando su análisis histórico, Gain et *al.*, (2013, op.cit.), resaltan que la década de 1970 marcó “...cierta pérdida del atractivo por el concepto de cuencas, sobre todo como una unidad para el desarrollo”, lo que llevó a una gestión del agua caracterizada por el enfoque de "predecir y proveer" para los servicios de agua.

Las experiencias acumuladas hicieron que, a finales de los años 1980 resurgiera la idea del enfoque integrado en el manejo de cuencas como respuesta a un gran desafío: el carácter multidimensional, multisectorial y transregional de los problemas asociados al agua. Como resultado, en la década de 1990 se gesta un nuevo paradigma para la planificación de cuencas hidrográficas y la gestión del agua: la GIRH, con énfasis en la protección ambiental, la participación, la equidad y la eficiencia, reflejando el discurso del desarrollo sostenible.

Es así que surgen directrices internacionales como los Principios de Dublín (Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente) y la Agenda 21 (Convención de las Naciones Unidas de Medio Ambiente y Desarrollo-CNUMAD, Río de Janeiro, 1992) para sustentar la

expansión global de la GIRH como concepto de gestión. Estas directrices fueron desde entonces promovidas por organismos multilaterales como el Banco Mundial, la Asociación Mundial del Agua (WWAP, por sus siglas en inglés), y Asociación Mundial del Agua de la Organización de las Naciones Unidas (GWP, por sus siglas en inglés).

En el año 2000, durante la realización del Foro Mundial del Agua en La Haya, 113 países adoptaron los principios de la gestión integrada de los recursos hídricos, haciendo que la GIRH experimentara una mayor expansión. Paralelamente, en ese año la Organización de las Naciones Unidas (ONU), aprobó la GIRH como parte de sus Objetivos de Desarrollo del Milenio y, surgió la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea, que introdujo planes hidrológicos de cuenca (PHC) dentro de las demarcaciones hidrográficas (DH) designadas. No obstante, Gain et *al.*, (2013, op.cit.) destacan que la expansión de los enfoques de tipo GIRH fue mayor en países no occidentales como algunos africanos (Sudáfrica, Malawi y Tanzania), y asiáticos (como Mongolia, Israel y otros).

La gestión de los recursos hídricos se expresa de manera teórica en los *Principios de Dublín* (GWP, 2000), en los *Tres Asuntos Críticos* de la gestión del agua (Moriarty et. *al.*, 2006), y el uso de la *Ética y la Moral*, bases fundamentales para asentar su praxis.

Principios de Dublín, según GWP, (2000):

- I- El agua dulce es un recurso vulnerable y finito, esencial para mantener la vida, el desarrollo y el medio ambiente.

Este principio, según GWP (2000), enfatiza la necesidad de un manejo holístico, reconociendo todas las características del ciclo hidrológico y su interacción con otros recursos naturales y ecosistemas. También reconoce que el agua se requiere para muchos propósitos, funciones y servicios; por tanto, un manejo holístico debe involucrar tanto las consideraciones de demanda sobre el recurso como las amenazas a éste. La noción de que el agua dulce es un recurso finito aparece a medida que, en promedio, el ciclo hidrológico produce una cantidad fija de agua por unidad de tiempo; esta cantidad global no puede ser significativamente alterada por las acciones humanas.

Los impactos antrópicos pueden afectar la producción del recurso hídrico de manera negativa o positiva, reduciendo la disponibilidad y la calidad del agua debido a acciones tales como: la actividad minera (que contamina las aguas superficiales y subterráneas; los cambios en el uso de la tierra (como la deforestación y la urbanización, que alteran los regímenes de flujos en los sistemas de agua superficiales).

Por otra parte, los impactos pueden ser positivos cuando la regulación temporal y espacial de la variabilidad de flujos naturales logra que el agua sea utilizada para propósitos no consumptivos e

involucra flujos de retorno; así, la reutilización planificada puede incrementar efectivamente los flujos de recursos y la cantidad total de servicios provistos. También se debe reconocer que el valor o el bienestar derivado de los activos de recursos hídricos variarán con los usos en donde los activos están situados (ibídem).

II- El desarrollo y el manejo del agua deben estar basados en un enfoque participativo, involucrando a usuarios, planificadores y realizadores de política a todos los niveles.

Un enfoque participativo es el único medio para alcanzar consensos duraderos y un acuerdo común. Sin embargo, para que esto ocurra, los interesados y funcionarios de las agencias de manejo de aguas tienen que reconocer que la sustentabilidad del recurso es un problema común y que todas las partes deberán sacrificar algunas de sus aspiraciones por el bien común. Participar es tener responsabilidad, reconociendo el efecto de acciones sectoriales sobre otros usuarios de agua y ecosistemas acuáticos, aceptando la necesidad de cambio para mejorar la eficiencia en el uso del agua y permitiendo el desarrollo sustentable del recurso. No siempre va a existir consenso sobre la participación, por lo que los procesos arbitrales y otros mecanismos de soluciones de conflictos, también deberán ser puestos en práctica (ibídem).

III- La mujer juega un papel central en la provisión, el manejo y la protección del agua.

Es ampliamente reconocido que la mujer juega un rol clave en la colección y la protección del agua para uso doméstico y, en muchos casos, uso agrícola; no obstante, ellas tienen un rol influyente mucho menor que los hombres en el manejo, el análisis de problemas y el proceso de toma de decisiones relacionado a los recursos hídricos. El hecho que las circunstancias sociales y culturales varían entre las sociedades, sugiere la necesidad de explorar distintos mecanismos para incrementar el acceso de la mujer a la toma de decisiones y ampliar el espectro de actividades a través de las cuales la mujer pueda participar en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (ibídem).

IV- El agua posee un valor económico en todos sus usos competitivos y debiera ser reconocida como un bien económico.

El agua es valorizada como un bien económico. Según GWP (2000), muchos fracasos en el manejo de los recursos de agua en el pasado se atribuyen al hecho que el agua ha sido tradicionalmente visualizada como un bien libre, o al menos, que su valor total no ha sido reconocido. En situación de competencia por la escasez de este recurso, esta noción puede llevar a una asignación de uso de aguas de menor valor, que no provea incentivos para tratar el agua como un activo limitado. Para extraer el máximo beneficio de los recursos hídricos disponibles, es necesario modificar las percepciones acerca

de los valores del agua y reconocer los costos de oportunidad involucrados en las pautas de asignación actuales.

Los Tres Asuntos Críticos de la GIRH, según Moriarty et. *al.*, (2006):

i. Asunto de Escala: Los asuntos relacionados con los recursos hídricos dependen mucho de escalas, tanto en términos de los procesos físicos que impulsan el ciclo hidrológico, como de los procesos socioeconómicos que controlan el uso del agua. Los conflictos potenciales y de competencia pueden tener lugar en un ámbito de escalas espaciales, desde internacionales hasta nacionales. Las demandas de las megaciudades pueden tener impactos que se extienden a través de las fronteras estatales o internacionales; no obstante, muchos conflictos (quizás la mayoría) son locales, centrados en acuíferos o cursos de agua locales.

Una escala clave es la zona de captación (o cuenca hidrológica), donde normalmente se centra la planificación de los recursos hídricos, aunque ella puede variar mucho de tamaño entre un país y otro. De esta forma, las soluciones en una escala pueden constituir problemas para otra escala; puede suceder que al adoptar el enfoque de ‘zona de captación’ en las cabeceras, no se tengan en cuenta los derechos y necesidades de los usuarios río abajo, en una escala mayor de la zona de captación.

ii. Asunto de Límites: Esta cuestión está estrechamente vinculada con la comprensión de la escala. Mientras que el primer principio de Dublín y un conjunto creciente de prácticas acepta que el agua debe ser administrada en base a las unidades hidrográficas (cuencas, zonas de captación y, en menor medida, acuíferos), estas raramente existen en la misma escala o dentro de los mismos límites. Normalmente el agua y el saneamiento se planifican en base a unidades administrativas como municipalidades, distritos y otras, por lo que un importante desafío es asegurar coordinaciones adecuadas entre los diferentes límites.

Con frecuencia el agua para uso doméstico se usa en una unidad hidrológica diferente a la de la fuente de donde proviene. Las zonas de captación y los acuíferos incluso pueden cruzar fronteras internacionales.

iii. Asunto de variabilidad temporal: La disponibilidad de agua raramente es constante debido a su dinámica estacional y multianual, haciendo que la cantidad disponible del recurso, oscile. Sin embargo, la demanda de agua, especialmente para uso doméstico, es más o menos constante en escalas de tiempo prolongadas (intensificándose en la estación poco lluviosa, como ocurre en Cuba). Por esto al planificarse las necesidades de agua debe considerarse tanto su disponibilidad temporal como su viabilidad.

La ética en la gestión integrada de los recursos hídricos

La ética puede brevemente definirse como la ciencia normativa de la rectitud de los actos humanos. El uso convierte a la ética en sinónimo de la moral. Sin embargo, el concepto de ética alude a enfoques filosóficos, mientras que el término moral tiene en cuenta aspectos sociales y religiosos. La moral es inseparable de las costumbres humanas, y por ende cambiante y relativo a determinadas prácticas culturales. La ética, que supone una reflexión teórica sobre cualquier moral, es en cambio universal. Más sucintamente, la ética es una “filosofía” de la moral (Usunoff, 2002).

El agua, además de ser esencial para la vida y tener valor económico o utilitario, tiene también un valor intangible que a veces es difundido como simbólico, cultural o religioso. Esta característica del agua hace prácticamente imposible que este recurso pueda ser tratado como un bien de consumo cualquiera.

Los factores emotivos juegan con frecuencia un papel muy decisivo en la toma final de decisiones en políticas relacionadas con el agua. La situación actual de la gestión del agua sugiere el establecimiento y difusión de una nueva cultura o ética del agua, tanto a nivel social como personal. Sí, es posible que la necesidad fundamental de los gestores del agua sea una formación ética orientada a la gestión ambiental del agua, la cual debe estar lejos del triunfalismo tecnológico (que confía casi todo a la construcción de infraestructuras) y del ultraconservacionismo de valor científico erróneo y dudosa aceptación social (Llamas, 2001).

Así, la ética del uso del agua es parte de un marco mayor de ética medioambiental con principios universalmente vigentes y estrechamente vinculados, que son la dignidad y la sociabilidad humanas: de la aceptación de la dignidad humana se deriva inmediatamente la solidaridad relacionada con la gestión de los recursos hídricos (obligación de proveer agua potable y saneamiento a los pares humanos que no lo poseen, por ejemplo). Tal solidaridad se refiere también a los derechos y deberes del hombre con respecto al entorno natural, que no sólo supone el ciclo natural de vida del hombre, sino que se proyecta a las generaciones futuras (ibídem).

2.1.2. La gestión de los recursos hídricos en Cuba

En la República de Cuba existe un Marco Legal Constitucional, Jurídico y Ambiental significativo que recoge y regula una gran variedad de procedimientos, aunque su incumplimiento fue común después de 1990 con el inicio del “Periodo Especial” cubano, debido a un marcado deterioro del respeto por la institucionalidad, la planificación y la gestión, signado por: 1) la pérdida del mercado principal para las relaciones económicas, comerciales y financieras 2) la obsolescencia tecnológica, 3) la no existencia de suficientes recursos económicos, financieros y materiales, 4) el impacto social,

económico y ambiental que genera por más de 50 años un bloqueo económico, comercial y financiero impuesto por la más grande potencia mundial, los Estados Unidos de América, 5) entre otros.

En el marco histórico, la interacción entre los recursos naturales y las actividades humanas en el espacio ocupado por las cuencas hidrográficas en Cuba, generó múltiples problemas ambientales relacionados tanto con el deterioro y agotamiento de los recursos -deforestación y pérdida de biodiversidad, degradación de los suelos, contaminación de las aguas-, como la pérdida de estabilidad de los sistemas ambientales -ecosistemas y paisajes naturales-, cuya estructura, funcionamiento y productividad, resultaron alterados de muy diversas maneras, y llegaron a comprometer la continuidad de la asimilación antrópica (González et *al.*, 2012).

Según, Díaz Duque (2011), el caudal ambiental es un importante indicador que no ha sido lo suficientemente estudiado y determinado para las principales cuencas hidrográficas cubanas, lo que conduce a un desajustado patrón de distribución de los recursos hídricos, en el que el ecosistema lleva la peor parte, siendo, sin embargo, el que sustenta el ciclo hidrológico y los medios de vida por intermedio de los bienes y servicios que reporta a la sociedad. Evidencias de estrés ecológico se han manifestado en importantes cuencas hidrográficas como las del Cauto, Ciénaga de Zapata y Cuyaguaje, en las que la actividad antrópica ha alterado el equilibrio ecológico en detrimento del desarrollo sostenible a mediano y largo plazo. El orden de prioridad establecido para el plan anual de asignaciones del agua (García, 2006), no identifica al caudal ambiental y solamente considera, en el quinto lugar, una categoría denominada otros, aunque reconoce la importancia del denominado gasto sanitario para el balance de cada embalse.

Caudal ecológico o ambiental (aplicado en la GIRH): *caudal que asegura el mantenimiento del patrimonio hidrobiológico y sociocultural del medio fluvial, compatible con la necesidad de abastecimiento doméstico y de suministro agrícola e industrial. Además, deberá ser representativo de la variabilidad natural del régimen de caudales del río y habrá de contemplar el correcto funcionamiento de las diversas componentes asociadas al ecosistema fluvial, entre las que cabe destacar la flora y fauna propias del mismo, la calidad físico-química de las aguas superficiales y subterráneas, el dinámico equilibrio geomorfológico del sistema o el conjunto de valores sociales, económicos, culturales y paisajísticos del río* (Magdaleno, 2004).

Gasto Sanitario o ecológico (aplicado en Cuba sólo aguas abajo de los embalses): *gasto mínimo que garantiza el desarrollo de una vida fluvial igual o al menos parecida a la que existía antes de regular el flujo natural del curso de agua* (Quintero et *al.*, 2013); (Ramos y Pérez, 1998).

La eficiencia hídrica es el factor más importante en el incremento de la disponibilidad del agua para la población cubana. El riego en la agricultura representa el mayor volumen de agua consumida anualmente (65%) y sin embargo los sistemas empleados distan mucho de ser eficientes. La introducción del riego localizado o por goteo, empleando la información agrometeorológica, posibilitará, no solo reducir el consumo innecesario de agua y elevar los rendimientos agrícolas, sino también proteger al suelo de la erosión y evitar la contaminación de los cuerpos de agua. Aunque con un peso menor, por el volumen total de agua consumida, la industria cubana, incluida la turística, tiene que replantearse obligatoriamente sus patrones de consumo por unidad producida o servicio brindado y acercarse a los mejores estándares internacionales (Díaz Duque, 2011).

Ante este escenario, surge la “ordenación de cuencas” en Cuba -como forma de introducir la dimensión ambiental en el proceso de planificación y ordenamiento territorial de los recursos existentes-, lo que convirtió a las cuencas en unidades de manejo ambiental considerándose desde entonces a las cuencas hidrográficas como la unidad básica funcional y ámbito de aplicación de programas y planes de manejo integral de los recursos naturales.

Los estudios sobre cuencas hidrográficas recibieron un gran impulso desde 1991, dirigidos a realizar investigaciones que sirvieran como referencia al país para la gestión de estos ecosistemas. En la región central de la isla de Cuba se inician estudios en la subcuenca del río Sipiabo, afluente del río Agabama, donde se realizó principalmente la ordenación forestal, y además la elaboración de un informe sintético acompañado de mapas a diferentes escalas, que representaba el primer diagnóstico ambiental realizado sobre geología, clima, suelos, hidrografía, geomorfología, fuentes contaminantes, población, vías de comunicación, economía y otras variables; marcando el inicio de los estudios de cuencas hidrográficas como estrategia local (González et *al.*, 2012).

Con la aprobación en 1997, del Consejo Nacional de Cuencas Hidrográficas (CNCH), mediante el acuerdo 3 139 del Consejo de Ministros, el manejo y gestión de cuencas recibió un nuevo impulso. El CNCH, con la función de coordinar, recomendar, evaluar y chequear las estrategias de desarrollo económico y social sostenible en las cuencas hidrográficas, pretendía iniciar un nuevo estilo de trabajo ambiental que como objetivos se trazó: definir las cuencas que, por su importancia económica, social y ambiental, debían considerarse de interés nacional; evaluar y aprobar los programas de ordenamiento y manejo integral de esas cuencas; evaluar la integración a nivel de cuencas de los esquemas de desarrollo elaborados por las provincias y ministerios; encomendar investigaciones que permitieran sustentar, científica y técnicamente, los programas y proyectos de desarrollo propuestos por los consejos de cuencas específicos; proponer vías para que la comunidad se mantuviera

informada y participara en la ejecución de planes y programas, así como promover los planes de educación y divulgación ambiental y evaluar el cumplimiento de la legislación vigente, proponiendo las nuevas reglamentaciones que se considerarán.

Para dar cumplimiento a los objetivos originarios del CNCH, diez años después se aprueba en el 2007 la Resolución 52 del Presidente del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, que pone en vigor el reglamento del Consejo Nacional, los Consejos Territoriales y los Consejos Específicos de cuencas hidrográficas.

Según la Resolución 52 del 2007, en su Artículo 8.- El Consejo Nacional tiene las funciones siguientes:

- a) Aprobar las cuencas del país que serán objeto de atención priorizada, dada su importancia económica, social y ambiental. Estas cuencas se denominan cuencas de interés nacional;
- b) Aprobar la creación de los nuevos Consejos Específicos de Cuencas en aquellas que sean compartidas por varias provincias, tomando en cuenta las opiniones de los Consejos Territoriales de las provincias involucradas;
- c) Crear los Consejos Territoriales de Cuencas en cada una de las provincias del país y en el municipio especial Isla de la Juventud;
- d) Coordinar, controlar y evaluar el funcionamiento de los Consejos Territoriales y Específicos de cuencas hidrográficas;
- e) Proponer al Comité Ejecutivo del Consejo de Ministros, las modificaciones sobre su integración, sus funciones y su reglamento, así como las de los Consejos Territoriales y Específicos;
- f) Coordinar la aplicación del enfoque ecosistémico en la gestión integrada del recurso hídrico, como eje articulador del manejo de las cuencas hidrográficas, con especial atención a las cuencas de interés nacional;
- g) Recomendar, coordinar y evaluar, los programas de manejo integrado que se ejecuten en las cuencas de interés nacional, que combinen el uso sostenible de los recursos naturales con las actividades económicas y sociales, ayudando a identificar los recursos económicos y financieros que los mismos demanden, en correspondencia con el Plan de la Economía Nacional;
- h) Controlar en las cuencas hidrográficas, con especial atención a las de interés nacional, el cumplimiento de los siguientes subprogramas de trabajo:
 - Inversiones para la protección del medio ambiente.
 - Redes de observación del ciclo hidrológico y coberturas de agua potable y de saneamiento.
 - Uso del Agua.

- Incremento de la superficie boscosa.
 - Mejoramiento y conservación de suelos.
 - Lucha contra incendios rurales.
 - Vigilancia cooperada de los recursos naturales.
 - Reducción de la carga contaminante.
 - Uso sostenible de la diversidad biológica.
 - Introducción de la ciencia y la innovación tecnológica.
 - Educación, concientización y divulgación ambiental.
- i) Evaluar en las cuencas del país, con atención particular a las de interés nacional el comportamiento y las tendencias de los indicadores económicos, sociales y ambientales seleccionados, para contribuir así al proceso de toma de decisiones sobre sus progresos, limitaciones y necesidades y las vías para su mitigación o solución;
- j) Recomendar, coordinar y evaluar, las vías que resulten apropiadas para que la comunidad se mantenga debidamente informada y participe en la ejecución de los planes y los programas que se desarrollen en las cuencas del país, con atención especial a las de interés nacional;
- K) Coordinar periódicamente sus actividades y programas, con la Comisión Nacional del Plan Turquino y la Comisión Nacional del Sistema de Reforestación.

De acuerdo con el informe “Recursos Hídricos en Cuba. Una Visión”, de Dorticós del Río et *al.*, (2012), en “Diagnóstico del Agua en las Américas”, Jiménez y Galizia (2012), la gestión integrada de los recursos hídricos en Cuba se expresa en los siguientes aspectos:

- i. Creación de Consejos de Cuencas Hidrográficas a niveles nacional y de provincias (Consejos Territoriales), además de seis (6) Consejos Específicos, todos los cuales permiten una mayor aproximación a la gestión integrada del agua, a través del vínculo entre los componentes ambientales, sociales y económicos.
- ii. Definición de nueve (9) Cuencas de Interés Nacional, incluyendo seis (6) cuencas compartidas y 53 cuencas de interés provincial, incluyendo la elaboración y control del Plan del Uso del Agua de estas cuencas.
- iii. Inicio de la constitución de Comunidades de Usuarios del Agua, las cuales podrán evitar posibles conflictos de intereses entre usuarios y contribuir para su mayor participación en la toma de decisiones.

La gestión del agua en Cuba cumple con los aspectos tratados por Dorticós del Río et *al.*, (2012), pero continúa teniendo un incipiente desarrollo en la GIRH en lo fundamental debido a: 1) la

prevalencia de los paradigmas ingenieril y de oferta y demanda, que fragmentan la planificación y manejo del agua; sustentando la gestión en la no utilización de las regulaciones referidas al uso del caudal ecológico en los ríos y ejecutando en su balance de agua por cuencas sólo el uso del gasto sanitario aguas abajo de los embalses; 2) el no cumplimiento en su totalidad de los principios de Dublín y de los tres asuntos críticos de la GIRH. Por tanto, para avanzar en la implementación del paradigma de gestión integrada de los recursos hídricos, el país deberá gestionar la cuenca hidrográfica en lo fundamental de manera holística, ecosistémica, integradora como aparece documentado con la creación del Consejo Nacional de Cuencas Hidrográficas y en la Nueva Política del Agua.

En el área de protección referida a: Aguas Terrestres y Marino Costeras en Cuba, se encuentra entre las más importantes legislaciones y regulaciones, el siguiente Marco Legal:

- Constitución de la República de Cuba.
- Ley Nª 81 Ley de Medio Ambiente.
- Ley Nª 85 Ley Forestal.
- Ley Nª 76 Ley de Minas.
- Decreto-Ley 138 De las Aguas Terrestres.
- Decreto-Ley 200 De las Contravenciones en Materia de Medio Ambiente.
- Decreto-Ley 212 Gestión de la Zona Costera.
- Decreto-Ley 201 Del Sistema Nacional de Áreas Protegidas.
- Decreto-Ley 230 de Puerto.
- Decreto 199 Contravenciones de las Regulaciones para la Protección y el Uso Racional de los Recursos Hidráulicos.
- Decreto 211 Contravenciones de la Regulaciones para los Servicios de Acueducto y Alcantarillados.
- Decreto 179 Protección, Uso y Conservación de los Suelos y sus Contravenciones.
- Decreto 274 Reglamento del Decreto-Ley de Puertos.
- Resolución 45/91 del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. Índices de Consumo de Agua para el Sector de la Economía no Agrícola.
- Resolución 73/92 del Ministerio de Transporte. Sobre el Control de Descarga y Vertimiento de Residuales Contaminantes en Costas y Puertos Originados por la Actividad Económica-Social.

- Resolución 211/97 del Ministerio de Transporte. Reglamento para el Manejo y Disposición Final de la Basura de los Buques en las Aguas Interiores (Puertos y Bahías), Aguas Territoriales y en la Zona Económica Marítima de la República de Cuba.
- Resolución 2/98 del Ministerio de Transporte. Reglamento para la Prevención de la Contaminación, estableciendo las Reglas de los Anexos I y II del Convenio MARPOL 73/78.
- Resolución 111/2002 del CITMA. Establece el Sistema Nacional de Monitoreo Ambiental.
- Norma cubana 93-02:85 Higiene Comunal. Agua Potable. Requisitos Sanitarios y Muestreo.
- Norma cubana 93-11:85 Higiene Comunal. Sistema de Abastecimiento Público de Agua. Requisitos Sanitarios.
- Norma cubana 93-11:86 Higiene Comunal. Fuentes de Abastecimiento de Agua. Calidad y Protección Sanitaria.
- Norma cubana 93-12:86 Higiene Comunal. Instalaciones Hidrosanitarias. Requisitos Higiénicos-Sanitarios Generales.
- Norma Cubana 24/1999 Eliminación de Contaminantes en Talleres Galvánicos. Parámetros de Vertimiento.
- Norma Cubana 27/2012 Vertimiento de Aguas Residuales a las Aguas Terrestres y al Alcantarillado. Especificaciones.
- Norma Cubana 521/2007 Vertimiento de Aguas Residuales a la Zona Costera y Aguas marinas. Especificaciones.

2.1.3. Modelos matemáticos y computacionales

Modelo matemático-estadístico de Box-Jenkins

La metodología de Box-Jenkins, (1976), es realmente un proceso multipaso e iterativo de análisis de series de tiempo y pronósticos, y consiste esencialmente de cuatro fases:

- | | |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| 1- Identificación del modelo. | 3- Chequeo diagnóstico. |
| 2- Estimación de parámetros. | 4- Pronóstico. |

La metodología ayuda no sólo a identificar un modelo sino a perfeccionarlo en varias de sus fases. Es importante comprender que para un juego de datos específico puede existir más de un modelo ARIMA que ajuste bien los datos. Por ello, el modelo puede perfeccionarse como consecuencia de cada fase. El chequeo diagnóstico incluye no sólo el estudio de la validez de un modelo, sino también la comparación de varios posibles. El propio rastreo del pronóstico con nuevos valores disponibles, hace que también una serie pueda mejorarse sucesivamente.

Un “diagrama de flujo” que muestra las fases y el carácter iterativo puede ser el siguiente:



- El examen visual de la serie permite descubrir tendencia, periodicidad o falta de estacionariedad.
- El uso de la **ACF** y la **PACF** permite identificar tendencia, periodicidad y estacionariedad.
- Las transformaciones y diferenciaciones permiten estabilizar la varianza y la media para alcanzar estacionariedad.
- El uso de la **ACF** y la **PACF** sobre una serie estacionaria permite identificar el modelo.
- La estimación de los parámetros se hace automáticamente con ayuda de un software estadístico.
- La parte más importante del chequeo diagnóstico se logra con el análisis de los residuales.
- El que los residuales estén no correlacionados implica la adecuación del modelo.
- El pronóstico puede lograrse para valores “s” instantes de tiempos después del último disponible.
- Los errores de pronóstico se pueden contrastar con observaciones reales disponibles.

Nota: *ACF* Función de Autocorrelación
PACF Función de Autocorrelación Parcial

En la fase de identificación del modelo, el ploteo de la serie y los residuales permiten descubrir e identificar tendencias a la periodicidad, además de tendencias lineales, polinómicas o violaciones del carácter estacionario de la serie por falta de homogeneidad de varianza. Las transformaciones y/o diferenciaciones, permiten muchas veces lograr carácter estacionario y esto explica el primer lazo. Los pasos sucesivos de la metodología de Box-Jenkins, (1976), parten de que se ha alcanzado estacionariedad de la serie.

Una vez que la serie es estacionaria, los correlogramas trazados permiten la identificación inicial del modelo. El proceso de identificación puede ser concebido como un proceso cíclico de aproximaciones sucesivas en el que intervienen en el primer nivel, las fases de identificación, estimación, y análisis de la autocorrelación de los residuales (ver “lazo” correspondiente en el diagrama de la metodología de Box-Jenkins, (1976)). En el segundo nivel, el ciclo abarca además el pronóstico y su contraste con valores reales.

La estimación de parámetros es la fase de construcción del modelo donde se calcula los valores específicos para cada uno de los parámetros $AR(i)$, $MA(j)$ y el μ (o δ , según el paquete); ya que la serie de tiempo que se modela es solamente una muestra o realización del proceso que ella representa, realmente se calcula estimaciones muestrales de los verdaderos parámetros.

El diagnóstico comienza prácticamente con las estadísticas que surgen en la fase de estimación, tiene su centro en el estudio de la correlación de los residuales y se extiende hasta la etapa de pronóstico en el sentido de: *reservar una parte de los datos (dígase la última cuarta parte) para validar el modelo y emprender todo el análisis, identificación, estimación y diagnóstico con la primera parte de los datos. El pronóstico sobre el período de validación y su cooperación con los valores reservados reales proporciona un criterio efectivo de cuán válidos son los pronósticos a partir del modelo estimado.*

En el período de validación pueden comprobarse tanto los pronósticos a corto plazo como los pronósticos a largo plazo. En el primer instante a pronosticar, el valor pre dicho se estima a partir de cierto número de valores anteriores a él. A partir del segundo instante, se tienen dos alternativas: utilizar el valor real (que está disponible) en el instante anterior, o utilizar el valor recién pronosticado para este punto. En general, si se pronostica utilizando valores reales de la serie anteriores al instante actual, aunque estén dentro del período de validación, los pronósticos serán más exactos y se valida con ello el pronóstico a corto plazo. Si para predecir el valor en un instante dado se utiliza sólo los valores reales que sirvieron de base en la estimación de la serie y los valores pronosticados de instantes anteriores al actual, se valida el pronóstico a largo plazo. En este último caso se obtiene un pronóstico mucho más grosero porque la información real se acabará al cabo de ciertos pasos (Grau, 1997).

En el pronóstico real, esto es, sobre un período para el cual no se tienen valores reservados, es imprescindible utilizar después del primer paso, la información previamente pronosticada.

El “*agotamiento*” de la información real disponible para el pronóstico a largo plazo es particularmente notable en los procesos autorregresivos en los cuales el valor actual depende apenas de p valores anteriores. En el caso de series de medias móviles y de modelos mixtos (equivalentes, si son invisibles a modelos autorregresivos de muy alto orden), la información real disponible tardará más en agotarse, pero en cualquier caso el pronóstico será mucho más impreciso. Los mejores pronósticos se pueden obtener en el caso de las series estacionales o periódicas, porque hay dependencia de información anterior mucho más lejana.

Es justo decir, que la metodología de Box-Jenkins, (1976), no es un “*algoritmo*” pues no garantiza siempre convergencia a una solución. De hecho, si la serie no es ARIMA o transformable a una, tal serie no puede ser modelada según estos criterios (Grau, 1997).

Es importante recordar de la teoría que, para obtener buenos pronósticos, es deseable que:

- i. Si hay componentes de media móvil, esta sea invertible y se tengan suficientes datos de base para hacer el pronóstico.
- ii. En cualquier caso, se tengan residuales independientes y de ser posible, distribuidos normalmente.

La metodología de Box-Jenkins, (1976), así formulada es válida también para el estudio de series estacionales o periódicas, a continuación, se hará referencia a ello.

El carácter periódico de una serie puede ser una propiedad muy buena con fines de pronóstico; para el análisis de Box-Jenkins, (1976), es imprescindible trabajar con series estacionarias. La periodicidad en una serie es otro tipo de violación del carácter estacionario y debe ser “*eliminado*” en la fase de identificación del modelo.

El análisis de una serie de tipo estacional ARIMA es una extensión del principio de identificación sucesiva. Salvo un detalle, se trata primero de identificar y ajustar los parámetros como si fuera una serie estacional pura $(P,D,Q)S$ y luego, estudiando los residuales, se identifican y estiman los parámetros de la posible componente regular (p,d,q) .

El modelo definitivo será $(p,d,q)(P,D,Q)S$.

Así, el orden de identificación usual es realmente:

d - diferenciación regular

S - estacionalidad de la serie

D - diferenciación estacional

Todo precedido posiblemente de transformaciones para alcanzar homocedasticidad y con el objetivo final de alcanzar estacionaridad (en este momento se podría estimar ya la constante μ). Una vez alcanzada la estacionaridad, se identifican sucesivamente.

(P,Q) - Ordenes autorregresivos y de medias móviles estacional a partir de la serie transformada y diferenciadas. La identificación de P y Q permite estimar los parámetros $\phi_i, i = 1, 2, \dots, P; \theta_j, j = 1, 2, \dots, Q$ y calcular los residuales E_t de un modelo estacional supuestamente puro.

(p,q) - Ordenes autorregresivos y de medias móviles regulares a partir de los residuales del preprocesamiento anterior. La identificación de p y q puede considerarse un afinamiento del modelo y permite estimar los parámetros $\phi_i, i = 1, 2, \dots, p; \theta_j, j = 1, 2, \dots, q$ y calcular e_t que se espera sea un ruido blanco.

De esta manera se mantiene válido el orden del flujo en el diagrama o metodología de Box-Jenkins, (1976).

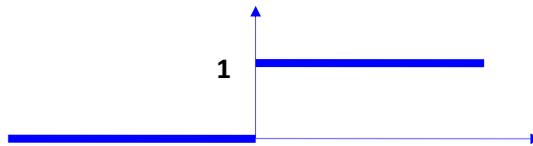
Hasta aquí, se ha tratado de forma general algunos aspectos teóricos de interés de la modelación de Box-Jenkins, (1976), sin embargo, el comportamiento histórico de un proceso hidrológico se ve afectado frecuentemente por la influencia de un factor externo en un instante de tiempo dado o en el intervalo comprendido entre dos ciertos instantes de tiempo, a continuación, se explica este tipo de comportamiento utilizando la modelación ARIMA.

Si tales procesos son modelables ARIMA, la serie correspondiente debe mostrar un “salto” o “cambio brusco” producto de esta intervención y es deseable “cuantificar” este salto, incluyéndolo en el modelo para que responda mejor a la realización, y en particular determinar hasta qué punto es significativo.

En matemática se utilizan frecuentemente las dos funciones siguientes para representar un salto discreto:

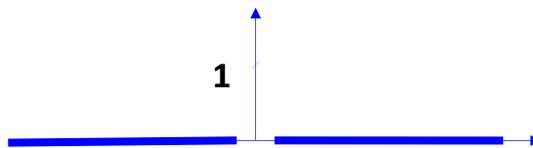
La función “paso” o “salto unitario” definida por:

$$u(t) = \begin{cases} 0, & \dots, t < 0 \\ 1, & \dots, t \geq 0 \end{cases}$$



La función “delta” o “pulso unitario” definida por:

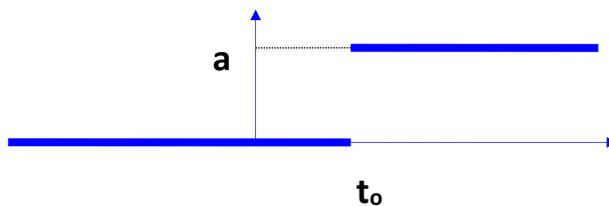
$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & \dots, t \neq 0 \\ 1, & \dots, t = 0 \end{cases}$$



Combinaciones lineales de estas funciones adecuadamente trasladadas a instantes de tiempos prefijados y con ciertos coeficientes permiten describir influencias discretas de magnitudes determinadas por los coeficientes, por ejemplo:

Una influencia de magnitud “a” y de carácter permanente a partir del instante t_a puede ser representada por $a \cdot u(t - t_0)$:

$$a \cdot u(t - t_0) = \begin{cases} 0, & \dots, t < t_0 \\ a, & \dots, t \geq t_0 \end{cases}$$



Box and Tiao (1975), generalizaron las series de tiempo ARIMA objeto de estudio, a series de la forma:

$$\left(1 - \varphi_1 \cdot B - \dots - \varphi_p \cdot B^p\right) \cdot (1-B)^d \cdot X_t = \left(1 - \Theta_1 \cdot B - \dots - \Theta_q \cdot B^q\right) \cdot e_t + \sum_{i=1}^n a_i \cdot r_i(t)$$

donde $r_i = r_i(t)$ son ciertas variables “regresoras” del tiempo para ciertos t_i conocidos ($i=1,2,\dots,n$) y “ a_i ” son nuevos parámetros a estimar.

Ceballos (2004), aplica la metodología de Box- Jenkins, (1976) a las series mensuales de caudales y precipitaciones en la cuenca hidrográfica del río Zaza con cierre en la Estación Hidrométrica Paso Ventura, y obtiene un modelo con la forma siguiente:

ARIMA (p,d,q)(P,D,Q)S

$$\left(1 - \varphi_1 \cdot B - \dots - \varphi_p \cdot B^p\right) \cdot \left(1 - \phi_1 \cdot B - \dots - \phi_p \cdot B^{P \cdot S}\right) \cdot (1-B)^d \cdot (1-B^S)^D \cdot X_t = \left(1 - \theta_1 \cdot B^S - \dots - \theta_S \cdot B^{Q \cdot S}\right) \cdot \left(1 - \Theta_1 \cdot B - \dots - \Theta_q \cdot B^q\right) \cdot e_t + \sum_{i=1}^n a_i \cdot r_i(t)$$

donde e_t es un ruido blanco $(0, \sigma^2)$.

Como en el caso regular, no se debe descartar la posibilidad de que la serie diferenciada tenga una media constante μ significativamente diferente de cero. Se incorpora esta posibilidad del modelo sustituyendo el término $(1-B)^d \cdot (1-B^S)^D \cdot X_t$ por $\left[(1-B)^d \cdot (1-B^S)^D \cdot X_t - \mu\right]$, donde μ es una constante que representa la media de la serie diferenciada, o equivalente, incluyendo en el miembro derecho una constante aditiva δ determinada por:

$$\delta = -\left(1 - \varphi_1 - \varphi_2 - \dots - \varphi_p\right) \cdot \left(1 - \phi_1 - \phi_2 - \dots - \phi_p\right) \cdot \mu$$

donde :

B : operador de retardo, definida para cualquier serie como:

$$B \cdot X_t = X_{t-1}; \quad B^2 \cdot X_t = B \cdot (B \cdot X_t) = X_{t-2} \quad \text{y en general} \quad B^h \cdot X_t = X_{t-h}$$

φ_i : Coeficiente autorregresivo regular de orden i

Θ_j : Coeficiente de media móvil regular de orden j

θ_i : Coeficiente autorregresivo estacional de orden i

ϕ_j : Coeficiente de media móvil estacional de orden j

En una primera aproximación puede suponerse una relación lineal entre la excitación a que se ve sometida una cuenca hidrográfica, representada por las precipitaciones, y su respuesta apreciable en la serie de caudales, o mejor aún la precipitación efectiva. Designando a $P_{v,\tau}$ y $Q_{v,\tau}$ la precipitación

total y la efectiva del año ν en el mes τ sobre la cuenca de interés; ellas corresponden a las series temporales que representan los recursos meteorológicos e hidrológicos respectivamente. Con el objetivo de remover la periodicidad, ambas series pueden ser estandarizadas periódicamente mediante las expresiones:

$$X_{12(\nu-1)+\tau} = \frac{P_{\nu,\tau} - m_{P\tau}}{S_{P\tau}} \quad \mathbf{1}$$

$$Y_{12(\nu-1)+\tau} = \frac{O_{\nu,\tau} - m_{Q\tau}}{S_{Q\tau}}$$

Donde: $\nu = 1,2,\dots,N$; $\tau = 1,2,\dots,12$, siendo N el número de años de interés, τ un índice del mes, $m_{P\tau}$ el promedio y $S_{P\tau}^2$ la varianza de las precipitaciones totales del mes τ y $m_{Q\tau}$ $S_{Q\tau}^2$ el promedio y la varianza de las precipitaciones efectivas de cada mes.

Como primera aproximación, la dependencia lineal entre las variables estandarizadas puede representarse mediante un modelo de función de transferencia, **FT** de orden (r, S, b) donde r es el número de términos autorregresivos, S el de términos de excitación y b el desfase entre excitación y respuesta. De manera explícita este modelo corresponde a:

$$Y_t = \sum_{i=1}^r \delta_i \cdot Y_{t-1} + \sum_{j=0}^S W_j \cdot X_{t-b-j} + \varepsilon_t \quad \mathbf{2}$$

donde ε_t es el ruido del sistema. Estos modelos pueden escribirse en la forma de Box-Jenkins (1976), como:

$$\delta_r(B) \cdot Y_t = W_s(B) \cdot B^b \cdot X_t + \varepsilon_t \quad \mathbf{3}$$

donde $\delta_r(B)$ es un polinomio de grado r en B , $W_s(B)$ otro polinomio en B de grado S y B es el operador de retroceso, definido como $B^n \cdot Z_t = Z_{t-n}$.

Con el objetivo de visualizar los efectos de las sequías meteorológicas, observables en la serie $P_{\nu,\tau}$, sobre las hidrológicas, representadas por $Q_{\nu,\tau}$ es conveniente utilizar la representación explícita del modelo (3) para la variable Y_t :

$$Y_t = \delta_r^{-1}(B) \cdot W_s(B) \cdot B^b \cdot X_t + \delta_r^{-1}(B) \cdot \varepsilon_t \quad \mathbf{4}$$

La que se puede colocar como:

$$Y_t = V(B) \cdot X_t + N_t \quad \mathbf{5}$$

Siendo $V(B)$ un polinomio en B de orden infinito cuyos elementos corresponden a la respuesta del sistema o una excitación de tipo impulso. Los valores de los coeficientes V_j están relacionados con los parámetros δ y W mediante un sistema de ecuaciones lineales.

Disponiendo del modelo de función de transferencia y conocidos los valores de la función respuesta impulso, (V_0, V_1, V_2, \dots) es posible estimar cuantitativamente algunos efectos de interés de las sequías meteorológicas sobre las hidrológicas, como las que se analizan a continuación:

a) Es de interés estimar el impacto de un tipo de sequía sobre la otra a través de una medida del déficit de recursos de agua superficial provocado por un déficit en la precipitación. Para ello, se puede centrar el interés sobre el efecto en la precipitación efectiva de un déficit en las precipitaciones totales ocurridas a partir del mes τ durante n períodos seguidos. Así la sequía meteorológica corresponde a un escalón de tamaño a y longitud n en la serie de precipitaciones totales en relación con los valores medios. La respuesta puede observarse k meses o días después, también con relación al valor medio de las correspondientes precipitaciones efectivas.

Las principales variables involucradas se muestran a continuación, **Figura 5**:

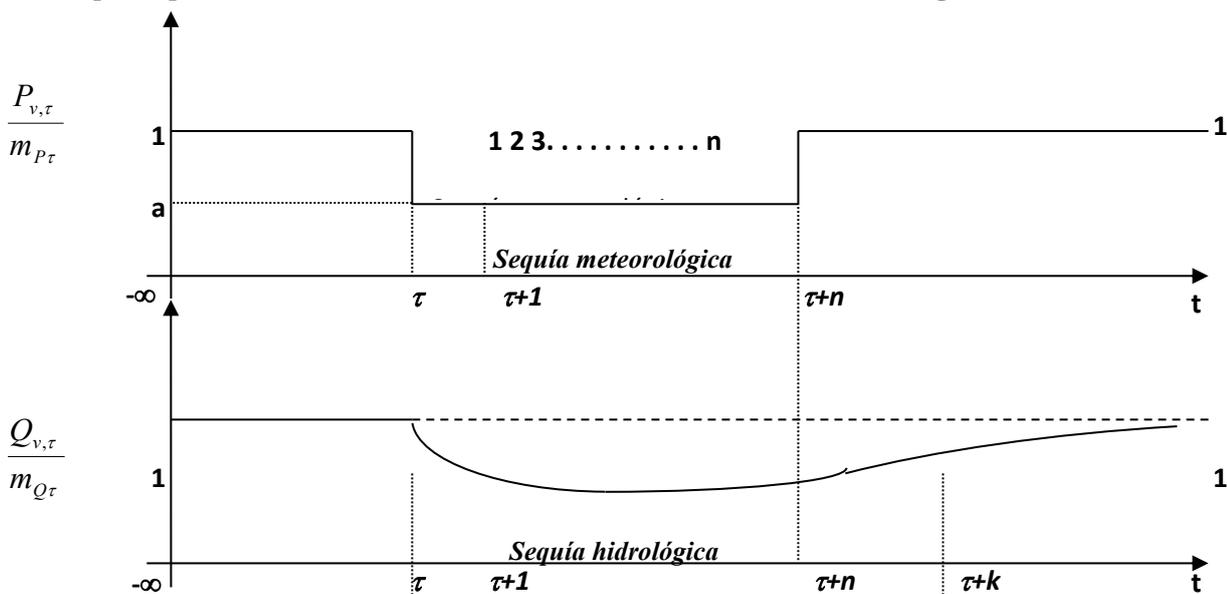


Figura 5. Variables involucradas en un pronóstico de sequía hidrológica a partir de la sequía meteorológica.

Los valores de respuesta y excitación están ligados directamente a través de la expresión (5) la cual puede expresarse explícitamente, aceptando que el valor esperado del ruido es nulo, como la tradicional función de convolución:

$$Y_t = \sum_{j=0}^{\infty} V_j \cdot X_{t-j}$$

Esta relación puede transformarse en términos de las precipitaciones efectivas y totales utilizando la ecuación (1):

$$\frac{Q_{v,\tau} - m_{Q\tau}}{S_{Q\tau}} = \sum_{j=0}^{\infty} V_j \cdot \left(\frac{P_{v,\tau-j} - m_{P,\tau-j}}{S_{P,\tau-j}} \right) \quad 7$$

Que por comodidad puede expresarse como:

$$\left(\frac{Q_{v,\tau}}{m_{Q\tau}} - 1 \right) \cdot \frac{m_{Q\tau}}{S_{Q\tau}} = \sum_{j=0}^{\infty} V_j \cdot \frac{m_{P,\tau-j}}{S_{P,\tau-j}} \cdot \left(\frac{P_{v,\tau-j}}{m_{P,\tau-j}} - 1 \right) \quad 8$$

Donde se aprecia que es conveniente utilizar las precipitaciones totales y efectivas en términos reducidos, usando para ello los valores medios mensuales:

$$q_{v,\tau} = \frac{Q_{v,\tau}}{m_{Q\tau}} ; \quad p_{v,\tau-j} = \frac{P_{v,\tau-j}}{m_{P,\tau-j}} \quad 9$$

Combinando estas relaciones en (8) se puede despejar $q_{v,\tau}$ como:

$$q_{v,\tau} = \frac{S_{Q\tau}}{m_{Q\tau}} \cdot \sum_{j=0}^{\infty} V_j \cdot \frac{m_{P,\tau-j}}{S_{P,\tau-j}} \cdot (1 - p_{v,\tau-j}) \quad 10$$

En la relación (10) las series q y p son de promedio I y varianza periódica. Una sequía meteorológica puede quedar representada por uno o más valores de p menos de I . En particular supóngase que p adopta los siguientes valores:

$$P_{\tau} = \begin{cases} 1 & \text{si} & t \leq \tau \\ a & \text{si} & \tau \leq t \leq \tau + n - 1 \\ 1 & \text{si} & t \geq \tau + n \end{cases} \quad \text{con} \quad a \leq 1 \quad 11$$

Esto indica entonces una sequía de tamaño a y duración n que ocurre a partir del mes τ . Interesa conocer el efecto de ella sobre el caudal k meses después, con $k = 0, 1, 2, \dots$. Reemplazando τ por $\tau+k$ en la expresión (10) se tiene:

$$q_{v,\tau+k} = 1 - \frac{S_{Q,\tau+k}}{m_{Q,\tau+k}} \cdot \sum_{j=0}^{\infty} V_j \cdot \frac{m_{p,\tau+k-j}}{S_{p,\tau+k-j}} \cdot (1 - P_{v,\tau+k-j}) \quad 12$$

Considerando que p es igual a I para $t < \tau$ y $t \geq \tau + n$ en el término de la suma es distinto a cero solo para algunos valores, por lo tanto, combinando (11) y (12) y eliminando el índice v por comodidad se tiene:

$$q_{\tau,k}^{a,n} = 1 - \frac{S_{Q,\tau+k}}{m_{Q,\tau+k}} \cdot \sum_{j=k-n+1}^k V_j \cdot \frac{m_{p,\tau+k-j}}{S_{p,\tau+k-j}} \cdot (1 - a) \quad 13$$

Donde $q_{\tau,k}^{a,n}$ representa la respuesta k meses después a una sequía de tamaño a y duración n que comenzó en el mes τ . En particular, si $n = I$ se tiene:

$$q_{\tau,k}^{a,1} = 1 - \frac{S_{Q,\tau+k}}{m_{Q,\tau+k}} \cdot V_k \cdot \frac{m_{p,\tau}}{S_{p,\tau}} \cdot (1 - a) \quad 14$$

Esta expresión puede entenderse de la siguiente manera. Si en un mes cualquiera τ se tiene una reducción de precipitaciones tal que solo se dispone de una proporción a del valor medio de ese mes, ello tendrá efecto sobre las precipitaciones efectivas de manera que k meses después solo se contará con una proporción $q_{\tau,k}^{a,n}$ del valor medio de ella.

Tanto en (13) como en (14) queda claro que si $a = I$ entonces $q = I$. Es decir que si se mantienen los valores medios de precipitaciones entonces se tendrán valores medios de caudales.

b) Retardo medio

También es de interés conocer el tiempo que tardarán como promedio en notarse los efectos de las sequías meteorológicas sobre el comportamiento de los caudales. Esto queda reflejado en el retardo medio del sistema, que se obtiene ponderando los retardos por los efectos que se transmiten:

$$T = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{j \cdot V_j}{G} \quad 15$$

Donde G es la ganancia del sistema, es decir la respuesta a una función escalón de la excitación, calculable como Box-Jenkins, (1976):

$$G = \frac{W(1)}{\delta(1)} = \frac{W_0 - W_1 - \dots - W_s}{1 - \delta_1 - \dots - \delta_r} \quad 16$$

Como el polinomio de respuesta a la función impulso, $V(B)$ cumple con:

$$\frac{dV(B)}{dB} = V_1 + 2 \cdot V_2 \cdot B + 3 \cdot V_3 \cdot B^2 + \dots \quad 17$$

$$\frac{dV(1)}{dB} = \sum_{j=1}^{\infty} j \cdot V_j = V(1)$$

Entonces:

$$T = \frac{\delta(1)}{W(1)} \cdot V'(1)$$

Expresando $V(B)$ en función de los polinomios $\delta(B)$ y $W(B)$ según la ecuación (4), derivando y evaluando para $B = 1$ se obtiene:

$$T = b + \frac{W'(1)}{W(1)} - \frac{\delta'(1)}{\delta(1)} \quad 18$$

(Donde el apóstrofe indica la derivada del polinomio respecto al factor de retroceso B .)

Usando la propuesta, Box-Jenkins (1976); Ceballos (2004), obtuvo para la cuenca hidrográfica del río Zaza en la región central de Cuba, el siguiente modelo:

$$(1 - 0,34975 \cdot B) \cdot Y_t = 0,4792 \cdot X_t + N_t \text{ Donde } N_t \text{ es el ruido del sistema,}$$

Y demuestra, con la aplicación de las ecuaciones 16 y 18, que los efectos de la sequía meteorológica tardarán como promedio **17 días** para apreciarse en los valores promedios de los caudales (sequía hidrológica) en la parte alta de la cuenca hidrográfica Zaza con cierre en la estación hidrométrica Paso Ventura, y su traslado hasta los sectores meridionales costeros. Este corto periodo de tiempo expresa la gran vulnerabilidad de la cuenca para soportar una sequía meteorológica y su respuesta en la sequía hidrológica que fundamentalmente se expresa en la “sequía hidráulica”; cuando los sistemas, obras hidráulicas y de riego construidas después de 1959, basadas en un paradigma ingenieril, hoy no pueden brindar las respuestas esperadas para satisfacer las demandas de los

subsistemas ambiental, social y económico para las cuales fueron diseñadas. Signado, 1) por la deficiente planificación y gestión, sin tener en cuenta una evaluación de impacto ambiental y 2) por los cambios generados en las variables climáticas en la circulación atmosférica regional y el ciclo hidrológico, debido en lo fundamental por los efectos que generan en los Pequeños Estados Insulares del Gran Caribe las interconexiones océano-atmosfera (evento ENOS y AENOS) y al recalentamiento por causas antrópicas del sistema climático global, que degrada e impacta negativamente los servicios ambientales que ofrecen los ecosistemas.

Ceballo (2004), confirma, las conclusiones teóricas y prácticas que ya se tenían de los diagnósticos de línea base para la cuenca Zaza (CITMA, 1997 y 2002) y González et *al.*, (1999), relacionada con los efectos generados por la baja cobertura boscosa, pérdida de biodiversidad, la elevada escorrentía superficial y su respuesta en la pobre infiltración, la erosión de los suelos y el asolvamiento de ríos, lagos naturales y artificiales.

Modelos computacionales. Herramientas para la gestión integrada de los recursos hídricos (WEAP Y AQUATOOL+)

a. Metamodelo WEAP (Water Evaluation and Planning System)

Los desafíos del manejo de agua dulce son cada vez más comunes. La asignación de recursos hídricos limitados para uso agrícola, municipal y ambiental, en la actualidad, requiere la integración completa de la demanda, el suministro, la calidad del agua y consideraciones ecológicas. El Sistema de Evaluación y Planificación del Agua, o WEAP ("Water Evaluation and Planning"), apunta a incorporar estos asuntos en un instrumento práctico y robusto para la planificación integrada de los recursos hídricos, que puede ser aplicada a diferentes escalas, desde pequeñas zonas de captación hasta extensas cuencas hidrográficas. WEAP es una herramienta de modelación para la planificación y distribución de agua desarrollado por el Stockholm Environment Institute's U.S. Center (<http://www.weap21.org/>). Explícitamente incluye demandas de agua con prioridades asociadas y usa escenarios para evaluar diferentes esquemas de distribución del recurso. WEAP incluye un modelo hidrológico, así como varios módulos que permiten integrar WEAP con el modelo de agua subterránea MODFLOW y con el modelo de calidad del agua QUAL2K. También ha sido utilizado en conjunción con modelos socio-económicos.

WEAP, abarca a un gran número de usuarios, desde aquellos encargados de la planificación hidrológica, hidrólogos, agrónomos, economistas, hasta funcionarios públicos encargados del recurso hídrico, y comunidades locales. Usando la esquemática de WEAP, entidades públicas de planeación de agua y comunidades locales pueden colaborar en la descripción física de la zona de interés. Una

vez el sistema está construido, se pueden implementar las demandas y suministros de agua y observar el balance del recurso en la región (Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009).

WEAP, apoya la planificación de recursos hídricos balanceando la oferta de agua (generada a través de módulos físicos de tipo hidrológico a escala de subcuenca) con la demanda de agua (caracterizada por un sistema de distribución de variabilidad espacial y temporal con diferencias en las prioridades de demanda y oferta). WEAP, emplea una paleta de diferentes objetos y procedimientos accesibles a través de una interfaz gráfica que puede ser usada para analizar un amplio rango de temas e incertidumbres a las que se ven enfrentados los planificadores de recursos hídricos, incluyendo aquellos relacionados con el clima, condiciones de la cuenca, proyecciones de demanda, condiciones regulatorias, objetivos de operación e infraestructura disponible. A diferencia de otros modelos de recursos hídricos típicos basados en modelación hidrológica externa, WEAP, es un modelo forzado por variables climáticas. Por otra parte, y de manera similar a estos modelos de recursos hídricos, WEAP, incluye rutinas diseñadas para distribuir el agua entre diferentes tipos de usuarios desde una perspectiva humana y ecosistémica. (Purkey *et al.*, 2007).

El desarrollo de un modelo WEAP incluye generalmente las siguientes etapas, según el (Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009):

1. Definición del estudio: se establece el marco temporal, los límites espaciales, los componentes del sistema y la configuración del problema.
2. Búsqueda de información: se hace una recolección de datos de acuerdo con el tipo de estudio definido. Esta etapa puede ser iterativa, y generalmente se realiza en dos partes: una etapa de recolección de datos generales, y una etapa de recolección de datos específicos una vez se ha montado el modelo y se han identificado necesidades adicionales de información.
3. Desarrollo del modelo: se construye el esquema, se realiza la entrada de datos y se realizan corridas iniciales de modelo para observar su comportamiento preliminar y para eliminar posibles inconsistencias y errores.
4. Calibración: se desarrolla una caracterización de la oferta y demanda del agua, las cargas de contaminantes, los recursos y las fuentes para el sistema.
5. Uso del modelo, generación de escenarios: Una vez que el modelo está calibrado, se pueden explorar los impactos que tendría una serie de supuestos alternativos sobre las políticas futuras, costos, y clima, por ejemplo, en la demanda de agua, oferta de agua, hidrología y contaminación.

b. AQUATOOL+.

AQUATOOL+, es un Sistema de Soporte a la Decisión (SSD) que aporta diversas herramientas para ayudar a resolver muchos de los problemas que pueden plantearse en el análisis de Sistemas de Recursos Hídricos (SRH) desde el punto de vista de la planificación y de la gestión. A continuación, se describe el desarrollo histórico de las importantes funciones que se han desarrollado para las modelaciones en AQUATOOL+, según la (http://www.upv.es/aquatoool/es/historia_es.html).

AQUATOOL+ (http://www.upv.es/aquatoool/es/software_es.html) es desarrollado por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente (DIHMA) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV); y sus primeros antecedentes se remontan a 1982, cuando el (DIHMA) desarrolló el módulo USOCON de simulación de la gestión de una cuenca (Andreu y Marco, 1983a). Este módulo permitía la definición de demandas urbanas, industriales, agrícolas o hidroeléctricas, embalses, acuíferos y tramos de río con filtraciones o con conexión hidráulica a acuíferos. Su aplicación permitía obtener información sobre garantías en la explotación de los recursos hídricos, determinación de capacidades necesarias de infraestructuras, evaluación de la influencia de determinadas reglas de operación y estudio del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas.

En 1987 se desarrolla el módulo Optired (Andreu, 1989), con el que se generaliza la resolución del problema de la asignación del agua mediante la generación de una red de flujo y el uso de algoritmos de programación lineal para el cálculo de la asignación óptima de recursos. Este módulo realiza la optimización de la gestión mensual para largos periodos de tiempo.

Con los trabajos iniciados en el río Segura, se desarrolla un módulo de Simulación de la Gestión de Cuencas (SGC) (Andreu y otros, 1989), que permita alcanzar suficiente orden y claridad en el análisis de la gestión del sistema.

A partir de 1990 se comienza a desarrollar nuevas aplicaciones para aumentar las posibilidades de análisis y para facilitar el uso de los modelos, lo que conforma un SSD más amplio orientado al análisis de la gestión integral de SRH. A este conjunto se le denomina AQUATOOL+ (Andreu et *al.*, 1991). En este desarrollo se incluye diversas interfaces gráficas de usuario basadas en el sistema operativo Windows de Microsoft.

El primer desarrollo en el entorno AQUATOOL+ consiste en unidades de control para la edición interactiva de datos y resultados de los módulos Simges (basado en el módulo SGC) y Optiges (basado en el módulo Optired).

Este sistema permite al usuario, según la (http://www.upv.es/aquatool/es/historia_es.html):

- Introducir y modificar si es necesario, en una forma gráfica la configuración de un sistema de recursos hidráulicos ya sea para optimización (módulo Optiwin) o para simulación (módulo Simwin).
- Introducir y gestionar bases de datos que contienen las características físicas de los componentes de los esquemas, así como las características de gestión.
- Llevar a cabo una optimización de la gestión para una alternativa dada y un tiempo horizonte dado utilizando diferentes datos hidrológicos.
- Llevar a cabo una simulación de la gestión para una alternativa dada y un tiempo horizonte dado, usando diferentes datos hidrológicos y también diferentes reglas de gestión.
- Obtener los resultados de la optimización y de la simulación en forma de informe escrito, ya sea detallado para todo el tiempo horizonte o resumido como valores medios e indicadores de garantías.
- Obtener los resultados de la optimización y de la simulación en la forma de gráficos de series temporales, gráficos de valores medios y de valores para un año determinado.
- Obtener los resultados de la optimización y de la simulación almacenados en archivos que puedan ser utilizados como datos de entrada para cualquier tipo de postprocesador específico que no esté incluido en AQUATOOL+.

En 1993 y 1994 se aplica este entorno de desarrollo de SSD al sistema del río Guadalquivir, con el objetivo de evaluar las garantías de suministro para usos agrícolas. Poco más tarde se comienza el diseño y desarrollo del módulo Aquival (Andreu y Capilla, 1996) para el preproceso y simulación de acuíferos por el método de los autovalores (Andreu y Sahuquillo, 1987).

En 1994 y 1995, la Oficina de Planificación de la Confederación Hidrográfica del Tajo desarrolla un SSD para la simulación y optimización de la gestión del sistema del río Tajo utilizando el entorno AQUATOOL+. Los resultados de estos trabajos fueron utilizados en la definición del Plan Hidrológico de la cuenca. El análisis de la gestión de la cuenca del río Tajo también hizo necesario el desarrollo de nuevos elementos en los módulos previos y de nuevas herramientas de análisis que se incorporaron al entorno AQUATOOL+ (http://www.upv.es/aquatool/es/historia_es.html).

A partir de 1996 el Entorno AQUATOOL+ es utilizado por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX para el análisis de la gestión del sistema unificado nacional español, cuyos resultados son utilizados en la redacción del Libro Blanco del Agua en España (MMA, 1999).

En el año 2000, con la publicación de la Directiva Marco Europea en materia de aguas (DMA) se inician varios proyectos de desarrollo de software; ampliando la línea de I+D en herramientas de ayuda a la decisión para la planificación hidrológica que permitan analizar aspectos importantes como la calidad de aguas y el coste-eficacia del programa de medidas. En 2004 obtienen la primera versión del módulo GESCAL para la simulación de la calidad de aguas asociada a la gestión de una cuenca, que permite simular opcionalmente procesos de degradación, oxidación, ciclo del nitrógeno y ciclo del fósforo, sobre todos los elementos previamente modelados con SIMGES. (http://www.upv.es/aquatool/es/historia_es.html).

En 2008, con los primeros resultados de los estudios para la determinación de caudales ecológicos en los ríos españoles se hace necesario un análisis del efecto que la implantación de estos caudales pueda tener sobre la garantía del sistema de gestión o viceversa. Para mejorar estos trabajos se diseña y desarrolla el módulo Caudeco que permite utilizar las funciones de hábitat calculadas en los diferentes tramos y contrastarlas con los resultados de caudales derivados de la simulación de escenarios para mejorar la información en el análisis de la eficacia de alternativas (http://www.upv.es/aquatool/es/historia_es.html).

2.1.4. La teledetección

La teledetección es una técnica aplicada, y como tal muy dependiente del estado de desarrollo tecnológico existente en cada momento. Por cuanto en ella se conjugan aspectos muy variados - óptica, y detectores del sensor, vehículo que lo sustenta, sistemas de transmisión, equipos de tratamientos, etc.-, las formas de teledetección han variado ostensiblemente en las últimas décadas. El crecimiento ha sido realmente vertiginoso, facilitando una progresión muy notable, tanto en la cantidad, como en la variedad y calidad de la información disponible para campos científicos muy variados (Chuvienco, 1995).

La percepción remota o teledetección se puede definir como aquel conjunto de técnicas, instrumentos y medios de interpretación que permiten extender o mejorar la capacidad perceptiva del ojo humano, proporcionando al observador información cualitativa y cuantitativa sobre los objetos que se encuentran a distancia y del ambiente que lo circunda (Dessena y Melis, 2006) y (Brivio et *al.* 1992). En general se puede decir que la percepción remota (remote sensing) permite realizar medidas cuantitativas a distancias de las características físicas relacionadas a la superficie terrestre y en ciertas condiciones al entorno relativo a situaciones bajo la superficie.

La historia de la percepción remota comenzó hace unos 600 millones de años, cuando alguna forma inferior de vida animal diferenció algunas de sus células, volviéndolas fotosensibles. Durante millones de años dicho rudimento fotosensible evolucionó convirtiéndose en un poderoso y sofisticado sensor, el ojo humano. Esto tuvo un imitador mecánico, la cámara fotográfica, que hizo su aparición hace algo más de un siglo y que fue muy mejorada durante la década de 1930 para ser aplicada a la fotografía aérea. La segunda guerra mundial dio un gran impulso a la fotografía aérea, así como a otras formas de percepción remota. Sin embargo, el “salto cuántico” en esta disciplina se produjo en la década de 1960 cuando las plataformas satelitales reemplazaron a las aéreas y los sensores electrónicos multispectrales, acoplados a computadoras, reemplazaron las cámaras fotográficas (CONAGUA, 2005).

Los primeros satélites de observación terrestre comenzaron a operar a principios de la década de 1970. Desde entonces el sistema científico-técnico ha puesto a disposición de la sociedad herramientas y modelos conceptuales que traducen los datos registrados por los sensores remotos en conocimiento útil para la toma de decisiones en múltiples áreas incluyendo las ciencias ambientales y la conservación. Los sensores a bordo de satélites registran energía electromagnética emitida o reflejada por un objeto o superficie en distintas bandas del espectro electromagnético. Las imágenes satelitales proveen entonces datos cuantitativos y espacialmente continuos de la superficie y, en tal sentido, son mucho más que una fotografía (Paruelo, 2008).

La naturaleza de la obtención de datos mediante teledetección está influenciada por las interacciones de las diferentes partes constituyentes de un sistema de percepción remota (CONAGUA, 2005), tales como:

- La fuente de energía, en la cual influyen el ángulo de elevación y la divergencia solar.
- La cubierta terrestre, en la que intervienen las características físicas, químicas y la rugosidad de la superficie en un instante de tiempo.
- El sensor, el cual influye en la geometría de la toma y la calidad de los datos.
- La atmósfera, especialmente en lo que se refiere a la dispersión selectiva de la radiación electromagnética.

Los sensores remotos permiten capturar información de los objetos, desde plataformas diversas, sin tener un contacto directo con ellos. Existiendo dos sistemas básicos para la percepción remota según los tipos de sensores:

- Sistemas de percepción activa: generan una señal, que rebota en un objeto, y miden las características de la señal reflejada (ej. radar, sonar).

- Sistemas de percepción pasiva: reciben las señales emitidas naturalmente y reflejadas por los objetos percibidos. Estas señales, generadas por la radiación solar, pueden proveer una información muy valiosa sobre los objetos percibidos.

A pesar de que las técnicas espaciales permiten obtener información sobre áreas muy extensas a bajo coste, el uso de un enfoque estrictamente espacial no está exento de algunas limitaciones prácticas (Landgrebe, 2002). Así, la posibilidad de extraer modelos complejos utilizando exclusivamente información en el dominio espacial puede ser limitada. Este hecho ha propiciado que, en la actualidad, las técnicas espectrales sean las más ampliamente utilizadas a la hora de interpretar los datos terrestres adquiridos de forma remota (Richards y Jia, 1993).

El proceso de adquisición de una imagen digital por parte de un sensor de observación remota se basa en la exploración secuencial, por parte del sensor, de la superficie terrestre. El sensor adquiere, a intervalos regulares, la radiación que proviene de los objetos sobre él situados. La información recibida está en función de las características de la parcela del terreno que observa el sensor en cada instante, y el tamaño de ésta será una función de la resolución espacial del sensor (Chuvienco, 1999). Cada una de estas parcelas, que constituyen la unidad mínima de información en la imagen, se denomina *pixel*, término que proviene del vocablo *picture element* (González y Woods, 2002).

El valor asociado a cada *pixel* viene definido por un valor numérico denominado nivel digital (ND). El nombre se justifica por tratarse de un valor numérico, no visual, pero que puede fácilmente traducirse a una intensidad visual o nivel de gris mediante cualquier convertidor digital-analógico (Plaza, 2002).

Las técnicas de teledetección espectral se basan en el hecho de que todos los materiales presentes en el mundo real reflejan, absorben y emiten energía electromagnética de forma distinta en diferentes longitudes de onda (Clark, 1999a).

En la actualidad, existe un amplio conjunto de instrumentos o sensores capaces de medir singularidades espectrales en diferentes longitudes de onda a lo largo de áreas espaciales extensas (Landgrebe, 2002). La disponibilidad de estos instrumentos ha facilitado una redefinición del concepto de imagen digital a través de la extensión de la idea de *pixel*. Así, en un esquema puramente espacial, un *pixel* está constituido por un único valor discreto, mientras que, en un esquema espectral, un *pixel* consta de un conjunto de valores. Estos valores pueden ser entendidos como vectores N-dimensionales (Boardman y col., 1995), siendo N el número de bandas espectrales en las que el sensor mide información (Plaza, 2002).

La ampliación del concepto de *pixel* da lugar a lo que se conoce como imagen multidimensional. En el orden de magnitud de N permite realizar una distinción a la hora de hablar de imágenes

multidimensionales. Así, cuando el valor de N es reducido, típicamente unas cuantas bandas espectrales (Hsieh y Landgrebe, 1998), se habla de imágenes multiespectrales, mientras que, cuando el orden de magnitud de N es de cientos de bandas (Green y col., 1998), se habla de imágenes hiperespectrales (Plaza, 2002).

La teledetección, según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), aumenta cada día la importancia de su uso y aplicación permitiendo entre otras características y ventajas: lograr cobertura total del área de estudio en un plazo relativamente breve; reducir la intensidad del muestreo y con ello, los costes; disponer de documentación visual y los cambios ocurridos; facilita generar datos cartográficos; permite contar con información de áreas terrestres inaccesibles o de difícil acceso; incrementa la capacidad para la elaboración de mapas cartográficos, la supervisión y la producción de informes; hace posible una evaluación de la información más armonizada para un país, región o incluso a nivel planetario; y posibilita la realización de evaluaciones retrospectivas de los cambios (modificación de la situación desde el pasado hasta la actualidad).

2.1.5. Teoría del paisaje

La noción básica de la Ciencia del Paisaje, es el reconocimiento de la Esfera Geográfica o Geosfera (Envoltura Geográfica, según Riábchikov, (1976)), y su geodiversidad paisajística, entendida como la variedad de paisajes de un territorio dado (Domínguez, 2003).

La geodiversidad constituye el fundamento material sobre el cual se sostienen y desarrollan otras categorías de la diversidad del planeta, tales como la biodiversidad y la diversidad socio - cultural. Pero, además, la geodiversidad en sí misma, constituye un recurso (por los valores científico - cognoscitivos, estético - escénicos, histórico - culturales o de otro tipo, que pueden contener los paisajes), por lo que puede ser gestionada, de acuerdo a ese criterio (Moreira y Rodríguez, 2001; Halffter, et *al.*, 2001)).

El término "paisaje" ha sido objeto de diversas interpretaciones, desde una concepción inicial en la que se le consideraba como una formación puramente natural, condicionada por factores sólo naturales en interrelación dialéctica (concepción propia de las ciencias ecológicas, que habían alcanzado un alto nivel de desarrollo, desde la introducción por Tansley, en 1936, del concepto de "ecosistema"), hasta la concepción del paisaje contemporáneo, como una formación antropo - natural, como un sistema geoespacial constituido por elementos naturales y antropotecnógenos (Domínguez, 2003).

A partir de los años 1960 se ha difundido ampliamente en muchas disciplinas científicas el análisis sistémico, surgida en la ciencia contemporánea como respuesta a la creciente especialización y al aislamiento de las diferentes ramas del conocimiento. En el ámbito del análisis sistémico han sido elaborados un lenguaje y una metodología científica completamente formalizada, aplicables a prácticamente todas las disciplinas científicas. En tal manera ha comenzado a desarrollarse un activo cambio de ideas, conceptos y métodos entre las diferentes disciplinas, con tal de contribuir al nacimiento de una amplia variedad de ramas interdisciplinarias del conocimiento y a la articulación entre ramas de la ciencia que inicialmente no tuvieron un lenguaje común (González, 2007).

La Convención Europea del Paisaje considera en su Artículo 1, que se entenderá por “paisaje” a cualquier parte del territorio tal como la percibe la población, cuyo carácter sea el resultado de la acción y la interacción de factores naturales y/o humanos (C.E, 2000).

Según, Ingegnoli y Giglio (2005), para entender el comportamiento de un sistema compatible con las leyes de la naturaleza no es suficiente la teoría mecanicista, en la cual es suficiente indicar una coordenada para conocer su estado. Para entender el estado de un ecosistema o de un paisaje no es posible limitarse al método clásico (Ingegnoli, 1971). El sistema complejo contiene e incluye los disturbios pasados ocurridos desde los niveles inferiores. Poniendo en evidencias la importancia de la historia, de la escala y del contexto en base al conocimiento y a la integración.

Para entender el paisaje, según González (2007), es necesario partir de la Teoría de Sistemas. La concepción sistémica, de manera específica, consiste en el hecho que cualquier diversidad de la realidad en términos de propiedades, fenómenos, relaciones, problemas, situaciones, etc., puede considerarse como una unidad, un sistema regulado en uno u otro sentido, que se manifiesta a través de algunas categorías sistémicas; estructura, elemento, relaciones, intensidad, etc.

Se puede definir como sistema, a un conjunto de elementos que se encuentran en relación y conectados entre ellos y que forman una determinada unidad e integridad. Es un conjunto energético-sustancial de miembros interrelacionados, cercanos de acuerdo a relaciones directas e inversas en cierta unidad. Es un complejo, único, organizado, formado por el conjunto o combinación de objetos o partes.

El sistema se caracteriza por los siguientes rasgos, (Gallopín, 1986):

- i. Multiplicidad de elementos.
- ii. Interrelaciones entre los elementos que forman el sistema, y además entre el objeto determinado y el mundo externo.
- iii. Jerarquía de los elementos como sistema de nivel inferior, al nivel superior.

- iv. Las propiedades de los sistemas no pueden ser descritas significativamente en términos de elementos separados. Su comprensión exige el análisis global, incluyendo toda la interdependencia de los elementos que los componen con otros parecidos.

La condición fundamental para utilizar el enfoque sistémico, es la necesidad de llevar a cabo una observación secuencial y directa de los principios sistémicos en todos los niveles de la investigación científica. En tal modo, se transforma en un estilo peculiar del pensamiento, según González (2007), que se expresa cuando presupone que el objeto estudiado:

- sea un todo o una formación integral.
- funcione sobre la base del cambio de los flujos de energía, materia e información como un "todo."
- tenga cualidades propias como sistema, que no tienen que ser inherentes a los elementos que lo forman.
- que el conjunto de los elementos que lo componen se sometan a leyes comunes.

Si empleamos este enfoque sistémico como un conjunto de métodos lógicos, regulados del conocimiento se obtienen ventajas de carácter científico, que permiten, según González (2007):

- Aplicar un aparato conceptual diferente bajo la forma de categorías y propiedades formuladas con relativa exactitud.
- Permitir la distinción objetiva del objeto estudiado dentro del entorno, dividiéndolo en una serie de niveles de complejidad y la diferenciación de estos niveles en términos de concepción sistémica.
- Facilitar la creación de un modelo de salida para estudiar el objeto con base en el que puede elaborarse el programa de su estudio, bajo la forma de operaciones científicas.

La ecología, la sistémica, la teoría del paisaje y el desarrollo sostenible

Según, Ingegnoli y Giglio, (2005), los principios básicos fundamentales de la ecología integrada son los siguientes:

- i. Principio de la propiedad emergente (Weiss, 1969; Lorenz, 1978).
- ii. Principio de la Integración funcional (Odum, 1971).
- iii. Principio del incremento de entropía (Clausius-Carnot, 1980; Prigogine, 1996)
- iv. Principio de la irreversibilidad del tiempo (Boltzman, 1897; Prigogine, 1996)
- v. Orden a través de las fluctuaciones (Prigogine, 1971; 1996)

Y las teorías metodológicas-conceptuales de la sistémica que de manera importante han influido en la conformación de la teoría del paisaje, según González (2007) son:

- i. *La Teoría General de los Sistemas (TGS), (Bertalanffy, 1975): ha sido utilizada para el estudio de los organismos vivos y el análisis de la transformación, conservación y degradación de la energía. su empleo en la Teoría de los Paisajes es limitado, ya que su enfoque ecológico, está orientado esencialmente para sistemas céntricos, mientras que el paisaje es sistémico-jerárquico. En todo caso, mucho de las formulaciones del TGS son adaptables a las investigaciones del paisaje.*
- ii. *La Variante Cibernética de Wiener (Wiener, 1948): se ha usado para estudiar los sistemas técnicos, en la elaboración y transformación de la información a través de máquinas calculadoras. Ha sido la base por el análisis informativo y los estudios de estructuras de diferente tipo en las ciencias del paisaje.*
- iii. *Teoría de los grafos: muchos de los problemas relacionados con los sistemas, se refieren más a las propiedades estructurales o topológicas de los sistemas que a sus correlaciones cuantitativas. La teoría de los grafos y en especial la de los grafos directos, elabora estructuras relacionales, representándolas en un espacio topológico. Se ha aplicado en algunos aspectos relacionales de la biología (Rashevsky, 1956).*
- iv. *Teoría de las redes: Está muy asociada a la teoría de los grafos, de la compartimentación de los modelos, se aplica a sistemas similares a los retículos nerviosos (von Bertalanffy, 1975). La teoría de redes tiene una amplia aplicación actualmente como teoría de redes neurales. La teoría de los grafos y la teoría de las redes, tienen aplicación en el análisis dinámico de los paisajes, tanto en la determinación de estructuras nodo-vector, como de las propiedades de transmisión y conexión.*
- v. *Teoría de la información (Shannon y Weaver, 1949): Se basa en el concepto de la información, definida de una expresión isomorfa con respecto a la entropía negativa de la termodinámica. A partir de esta teoría se define que la información puede ser utilizada como una medida de la organización interna de un sistema. La teoría de la información, además de basarse en la entropía negativa, puede ser expresada también en términos de exergía, o sea, a partir del análisis de las diferencias de potenciales energéticos en las estructuras interiores de un sistema determinado.*

Con la interpretación de los principios básicos fundamentales para la ecología integrada, según Ingegnoli y Giglio (2005); y las teorías metodológicas y conceptuales principales de la sistémica, según González (2007), se logra obtener una explicación de la estructura de los paisajes reconocida en las siguientes características:

- i. la complejidad infinitesimal de los paisajes o lo que es lo mismo, que cualquier espacio geográfico además de ser parte del paisaje global puede ser analizado como un paisaje complejo en sí, presentando un orden jerárquico y una complejidad que debe estudiarse a partir de las emergencias del sistema en estudio. El paisaje no será más complejo a medida que es mayor su tamaño, ya que a nivel local emergen propiedades no consideradas a mayor escala. El término escala se interpreta como menor o mayor a partir de criterios cartográficos.
- ii. Desde la entropía, como desde el análisis energético, los paisajes locales pueden analizarse como homogéneos en estudios a pequeña escala, pero tienen diferencias de potencial local que establecen un nivel de complejidad de mayor importancia para su análisis que el resultado de las generalizaciones.
- iii. Los sistemas complejos autorregulados, autoorganizados y abiertos, con un alto grado de relaciones de dependencia y balance entre los mismos miembros, con un cambio relativamente limitado de flujos de Energía, Materia e Información, con sistemas situados al exterior; el impacto humano conduce a aumentar el grado de abertura con el entorno externo, disminuyendo el balance entre los miembros dentro del sistema.

A partir de la visión sistémica, (González, 2007), se entiende el paisaje como un sistema integrado, en el que cada componente aislado no posee propiedades integradoras. Estas propiedades integradoras sólo se desarrollan cuando se observa el paisaje como un sistema total. Es lo que se denomina la emergencia del sistema, el conjunto de propiedades cualitativamente nuevas, propias de la singularidad del “todo”, que lo identifican y lo definen como una entidad superior a la suma de sus componentes.

En los paisajes o geosistemas naturales y antropo-naturales, la manifestación de las relaciones sistémicas *dentro y entre* ellos, determinan su comportamiento simultáneo, (Domínguez, 2003), como:

- i. **Monosistemas:** *son los geosistemas formados por la interacción entre relieve, litología, suelos, vegetación, uso, clima y aguas, en sentido vertical. En este caso, el carácter de los*

componentes y las relaciones entre ellos, han condicionado la identidad del geosistema y aseguran su funcionamiento como una unidad.

- ii. **Parasistemas o Sistemas Paisajísticos Vectoriales:** *son los complejos de rango taxonómico inferior, que distinguen la organización espacial de los paisajes y sus relaciones funcionales horizontales (son, por ejemplo, los sistemas paisajísticos geoquímicos, de barreras, de núcleos, de ecotonos, de cuencas y otros establecidos).*

Los principios, según (Mateo, 2012), que fundamentan al “**Paisaje**” como portador sistémico del Desarrollo Sostenible, se describen a continuación:

El desarrollo sostenible, según (Comisión Brundtland, 1987), debe asegurar que se satisfagan las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias. Creyendo que, la tecnología y la organización social pueden ser ordenadas y mejoradas de manera que abran el camino a una nueva era de crecimiento económico; junto a la capacidad de la biósfera de absorber los efectos de las actividades humanas. Exigiendo que se satisfagan las necesidades básicas de todos y que se extienda, a todos, la oportunidad de colmar sus aspiraciones a una vida mejor.

Según, Mateo (2012), la visión de Desarrollo Sostenible de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, es de corte mecanicista y economicista. Tiene su raíz en la decisión tomada por el Programa Mundial de la alimentación a fines de los años setenta, de sustituir la noción de Ecodesarrollo por la de Desarrollo Sostenible. Siendo sustentada esta teoría actualmente por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y la Organización Mundial de la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés). El elemento operativo fundamental de esta concepción es la prioridad del crecimiento económico, como esfuerzo privilegiado de la economía mundial. Definiéndose los siguientes requisitos:

- Un sistema político, que asegure efectivamente la participación ciudadana en la toma de decisiones.
- Un sistema económico, confiable, que pueda generar procesos de conocimientos técnicos continuos.
- Un sistema social, que resuelva las tensiones originadas por el desarrollo inarmónico.
- Un sistema de producción que respete la obligación de preservar la base ambiental para el desarrollo.
- Un sistema tecnológico, capaz de procurar soluciones continuamente nuevas.
- Un sistema administrativo, que sea flexible y tenga la capacidad de autocorrección.

- Un sistema internacional, que fomente patrones sustentables de comercio y de finanzas.

De tal manera, esta visión de Desarrollo Sostenible, presenta al sistema económico como un subsistema del ecosistema global que puede operar en el equilibrio y moverse para adelante o para atrás, en cualquier posición de un flujo continuo, determinado por un número infinito de posiciones de equilibrio (Yunez-Naundé, 1994).

Considerándose, como tendencia a identificar sostenibilidad (en términos muy generales) con sostenibilidad económica, y a considerar así el crecimiento económico como sinónimo de Desarrollo Sostenible. Otra interpretación, sobre la teoría o ideología de Desarrollo Sostenible, la considera como la interrelación entre el desarrollo económico, el desarrollo social y la protección del medio ambiente, como elementos unidos que se fortalecen los unos a los otros. El medio ambiente es considerado la disposición en recursos naturales de los cuales hará uso la sociedad humana, y como la biodiversidad, que constituye la fuente de la evolución genética del planeta (Mateo, 2012).

Durante la Cumbre Alternativa promulgada por Organizaciones No Gubernamentales, desarrollada paralela a la Cumbre de Río de Janeiro en 1992, se presenta la Carta de la Tierra, la cual considera el Desarrollo Sostenible como un desarrollo equitativo, autogestionado, autónomo y ecológicamente equilibrado y duradero, dirigido a satisfacer las necesidades y mejorar la calidad de vida de las poblaciones (Ángel Maya, 1995).

Por otra parte, según (Mateo, 2012), con el inicio de la teoría de análisis sistémico en los años 1960, comienza a gestarse un nuevo paradigma para el desarrollo, con sus raíces en el concepto de Ecodesarrollo (Sachs, 1993) que consideraba la optimización de los agrosistemas como estrategia del desarrollo, mediante una doble apertura, la de la ecología y la de la cultura.

Así, la concepción sistémica del desarrollo, parte de aceptar el desarrollo y la evolución de la biosfera, a partir de la teoría general de sistemas; la considera como una emergencia de la dinámica sistémica, como resultado de un largo proceso coevolutivo, formado por sistemas con organización activa, caracterizados por la autorganización, la autoproducción, la autorreproducción y la autorreferencia. Se interpreta al mundo como caracterizado por la irreversibilidad y la inestabilidad, y por estar sujeto a cambios impredecibles (Mateo, 2012).

Por desarrollo no se entendería el estado final de un sistema, sino más bien un proceso, una transición para obtener grados de sostenibilidad creciente, el cual debería ser gobernado por un proyecto cultural que trascendería y abarcaría los aspectos naturales, económicos, sociales y políticos (Durr, 1999).

El problema científico de esta visión sistémica del desarrollo es poder definir el portador de esas diferentes estructuras o niveles de sostenibilidad. Según Mateo, (2012), pueden considerarse diversos portadores como:

- a. Territorio: espacio de articulación estructurado y sistémico del Desarrollo Sostenible y de sus componentes (crecimiento económico, equidad y sustentabilidad (Vergara, 2004).
- b. Cuenca hidrográfica: como sistemas naturales constituyentes y su interacción con otros niveles de sostenibilidad.
- c. Bioecosistemas: como portadores de sostenibilidad a través de aspectos bióticos y de la biodiversidad.

El problema de estas unidades portadoras, según Mateo (2012), es su parcialidad, o su excesivo nivel de complejidad, en cuanto a los componentes que las integran (el territorio), su formación como asociación de unidades homogéneas más pequeñas y simples (cuenca hidrográfica), o por medir sólo una parte de la sostenibilidad, la bioecológica, la cual es fundamental, pero no decisiva porque no tiene el carácter de totalidad natural (Bioecosistemas). Muestra, además, fuertes dificultades a la hora de su representación cartográfica.

Existiendo, con independencia de quien sea el portador, dos acepciones del término cuando se habla de sistema (Ángel Maya, 1996):

Sostenible: algo que tiene que ser sostenido. Son los sistemas en desequilibrio, que necesitan de un ingreso permanente de flujos de energía, materia e información, y de un proceso de transformación y artificialización para obtener determinados niveles de producción y de sostenibilidad.

Sustentable: lo que se sostiene por sí mismo, y que necesita de esfuerzos encaminados a lograr el equilibrio de un sistema. Por ejemplo, el delta de un río en estado casi natural.

En la búsqueda de ese portador natural, se puede considerar el paisaje, visto como el binomio evolutivo paisaje natural-paisaje cultural, por los siguientes motivos (Mateo, 2002a; Silva y Mateo, 2003; Mateo, 2012):

- i. Porque el paisaje natural se ha analizado desde un enfoque sistémico y se concibe como un geosistema, el cual se define como el espacio terrestre de todas las dimensiones, donde los componentes naturales se encuentran en una relación sistémica unos con otros y como una integridad definida, en interacción con la esfera cósmica y con la sociedad humana (Bertrand, 1968). Concebir el paisaje como un sistema significa tener una percepción del todo y comprender las interrelaciones entre las partes del sistema (Christofolletti, 1979).

- ii. Porque implica la interrelación sistémica de todas las partes del sistema que dan lugar a la formación de la sustentabilidad y la sostenibilidad como emergencia (Solntsev, 1977). El paisaje se caracteriza por poseer atributos sistémicos, relacionados con su estructura, su funcionamiento, su dinámica, su evolución y su capacidad de autorregulación y autorganización (Diakonov, 2002). La interrelación de estos atributos sistémicos forma, de manera sinérgica, una propiedad emergente del sistema como un todo: la sostenibilidad y la sustentabilidad del geosistema natural (Diakonov et *al.*, 2007).
- iii. Porque como una totalidad, es humanizado y formado como un paisaje cultural (Isachenko, 1991). Ello, implica aceptar, por un lado, su materialidad, o sea, la existencia de una estructura y un funcionamiento propio de los cuerpos naturales; y, por otra parte, el hecho de que el estatus paisajístico de estos cuerpos naturales es determinado por el sistema de producción económica y cultural, cuyos efectos difieren según las «producciones» y los grupos sociales.
- iv. Porque permite explicar la especificidad espacial de la sostenibilidad (Rougerie y Beroutchatchvili, 1991). La sustentabilidad geocológica ambiental está asegurada por los soportes básicos: estructural, funcional, relacional, evolutivo y productivo. El enfoque geocéntrico presta atención preferencial al planeta tierra, como entorno de los sistemas humanos. La visión espacial permite analizar los sistemas en un contexto en el que se incorpora la diferenciación espacial, sus interrelaciones espaciales y su integración en la superficie del planeta.
- v. Porque es manejable y diseñable en los proyectos para conquistar la sostenibilidad como un atributo utópico. Asumir el Desarrollo Sostenible como la incorporación de la sustentabilidad ambiental al proceso de desarrollo que se construye en un determinado territorio, implica conceptualizar el desarrollo desde una posición sistémica, lo que significaría considerar los portadores de dicho proceso, los cuales tienen un marcado carácter territorial y espacial (Castro, 2003).

Usando la teoría del paisaje en su binomio dialéctico paisaje natural-paisaje cultural, desde una visión organicista y evolucionista se puede resolver el otro problema que genera analizar los paisajes como portadores de la sostenibilidad ambiental (Mateo, 2012); establecer la sostenibilidad en sistemas en estado natural y en estado modificado, transformado, o sea, bajo condiciones de intervención humana. De tal manera, una visión dialéctica del binomio paisaje natural-paisaje cultural permitiría considerar la fuente de la formación del paisaje cultural, el espacio geográfico, como un

complicado sistema que manifiesta las complejas interrelaciones entre los fenómenos y objetos naturales y sociales en una porción dada de la superficie terrestre.

2.2. El desarrollo sostenible en la construcción de un modelo de gestión integrada de los recursos hídricos y costeros. Caso de estudio: Cuba

La Isla de Cuba tiene una configuración alargada y estrecha, con unos 1 200 km, en dirección este-oeste, y ancho máximo de 191 km en la dirección norte-sur en la región oriental, que se reduce hasta sólo 31 km en la región occidental del país, lo que determina una longitud de las costas de 5 746 km, y otros 229 km pertenecientes a la Isla de la Juventud.

Los recursos hídricos superficiales y subterráneos son limitados, pero desempeñan un papel decisivo en el desarrollo socio-económico y ambiental. Los ríos presentan pequeñas cuencas, cursos cortos, poco caudal y rápida evacuación de las avenidas al mar. Si se aplica el coeficiente litoral, que no es más que la relación entre la superficie terrestre en km² dividida entre la longitud en km de la línea costera (Barragán, 2004), resulta que el coeficiente litoral de la Isla de Cuba es de 18,2; con una plataforma insular que supera los 67 000 km², por lo que es lícito afirmar que prácticamente todo el territorio cubano es “costero” y “marino- costero” (Cabrera et *al.*, 2010).

En Cuba se han identificado seis grandes problemas ambientales, por la Estrategia Ambiental Nacional, (EAN, 2012) ciclo 2011-2015:

- i. Degradación de los suelos;** en la actualidad, el 65% del total de los suelos de Cuba presentan afectaciones por diferentes procesos degradativos y alrededor de un 76,8% posee factores limitantes para producir alimentos, consecuencia de cinco siglos de explotación irracional e insostenible. Más del 40% de los suelos cubanos presentan afectaciones por erosión y si se refiere a la erosión potencial, ese porcentaje se eleva hasta el 56%.
- ii. Afectaciones a la cobertura forestal;** aunque en el país se manifiesta anualmente un incremento de la cobertura forestal (año 2015, índice de boscosidad: 30,6%, (ONEI, 2015)), deberá prestarse atención al impacto negativo, sobre los bosques y plantaciones forestales, derivado de la evolución de los paisajes cubanos hacia ecosistemas más áridos y más susceptibles a los procesos de desertificación. De igual manera, constituirán una prioridad las acciones de manejo de manglares y bosques semicaducifolios, los que sufrirán el efecto combinado del aumento de la aridez y del ascenso del nivel del mar producto del cambio climático.
- iii. Contaminación;** El desarrollo industrial y tecnológico, por una parte, y el acelerado crecimiento demográfico, por la otra, además de aumentar los patrones insostenibles de

producción y consumo, han introducido al medio ambiente una gran variedad de productos químicos sintéticos, peligrosos para los seres vivos, que la naturaleza no los degrada con la suficiente celeridad, ni el hombre los logra eliminar sin causar daños al entorno.

Por residuales líquidos: El deficiente manejo de los mismos en Cuba, se debe, entre otros factores, al uso ineficiente del agua, materias primas e insumos; uso de materias primas sin la calidad requerida; existencia de tecnologías obsoletas e indisciplinas tecnológicas; bajo nivel de aprovechamiento de las potencialidades existentes para el reúso de efluentes y baja cobertura de tratamiento adecuado.

Por residuales sólidos: El deterioro de las condiciones higiénico – sanitarias es un serio problema ambiental en el país, sobre el cual incide fuertemente el inadecuado manejo de los residuos sólidos. A pesar de ciertos avances, la gestión de los residuos sólidos presenta grandes dificultades en cada una de sus etapas: recolección, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final.

Por emisiones a la atmósfera y contaminación sónica: La contaminación atmosférica continúa siendo un importante problema ambiental a nivel nacional. Su solución resulta realmente compleja en atención a la variedad de fuentes que la generan; tanto fijas como móviles, así como por el significativo respaldo financiero que requiere, fundamentalmente para el monitoreo y la transformación tecnológica de las fuentes. Las principales causas en la actualidad, están asociadas a emisiones de gases de efecto invernadero; de compuestos de azufre y nitrógeno; del transporte; sustancias agotadoras de la capa de ozono; polvo y material particulado. Las afectaciones por ruido continúan siendo hoy una de las principales causas de quejas de nuestra población.

Por productos químicos y desechos peligrosos: La situación nacional se caracteriza por la generación anual de más de un millón de toneladas de desechos peligrosos, una buena parte de los cuales no reciben un tratamiento adecuado. También existen existencias de productos químicos ociosos en las entidades, que requieren de aprovechamiento para evitar que al deteriorarse se conviertan en desechos peligrosos.

- iv. Pérdida de diversidad biológica:** La diversidad biológica del archipiélago cubano se caracteriza por los notables valores de su medio natural, la gran diversidad de ecosistemas presentes y el alto grado de endemismo de sus recursos bióticos. Por esta razón, el territorio nacional es un exponente representativo y singular del patrimonio regional y mundial.

Las causas principales que han provocado la pérdida de diversidad biológica en Cuba están relacionadas con:

- Alteraciones, fragmentación o destrucción de hábitat/ecosistemas/paisajes.
 - Sobreexplotación o desbalanceado aprovechamiento de los recursos.
 - Degradación y contaminación del suelo, las aguas y la atmósfera.
 - Introducción y manejo inadecuado de especies exóticas.
 - Insuficiente exigencia en la aplicación de los mecanismos regulatorios y de control, para prevenir y sancionar actividades ilícitas como la caza y la pesca furtivas, así como el comercio de especies amenazadas, raras, carismáticas o de poblaciones reducidas.
 - La agudización de los períodos de seca, la ocurrencia de lluvias intensas, la elevación de la temperatura y del nivel medio del mar, el incremento de las penetraciones del mar en zonas bajas, así como de la intensidad y frecuencia de eventos hidrometeorológicos extremos.
 - Incendios rurales.
 - Insuficiente concienciación pública.
 - No se ve identificado el tema biodiversidad con claridad en los planes sectoriales de desarrollo, de ordenamiento territorial y en el propio proceso de Evaluación de Impacto Ambiental.
 - No se tienen en cuenta en la toma de decisiones relacionadas con la biodiversidad agrícola y con la agricultura en general los conocimientos tradicionales de los campesinos cubanos.
 - Vacíos legales en materia de acceso a los recursos genéticos, protección de los conocimientos y prácticas tradicionales, disposiciones pertinentes en materia de caza o reglamentación del uso y manejo de información sobre diversidad biológica, entre otros.
- v. **Carencia y dificultades con la disponibilidad y calidad del agua:** Aún con el sustantivo desarrollo hidráulico cubano y de obras de infraestructura para el uso de los recursos hídricos, subsisten las dificultades con las disponibilidades de agua para suplir todas las necesidades económicas, sociales y ambientales, agravado por la ocurrencia de fenómenos naturales extremos (grandes precipitaciones e intensas sequías) y otros inducidos por causas antrópicas. En el deterioro de la calidad y la falta de disponibilidad/acceso del recurso para todos sus usos, influyen otros elementos naturales y antrópicos, tan diversos y complejos en su interrelación como la contaminación; ausencias de una adecuada gestión de las fuentes y cuerpos de agua; los déficit de cobertura boscosa; la no siempre adecuada planificación, uso y ordenamiento; la salinización; el empleo de tecnologías inadecuadas; el escaso reúso y

reciclaje del agua; el mal estado de las redes hidráulicas de distribución; así como la insuficiente cultura de ahorro y uso racional.

- vi. Impactos del cambio climático:** Con el desarrollo socio-económico, más el incremento de la presión demográfica, aumenta la vulnerabilidad de la zona costera, y por ello los impactos del cambio climático en esta región pueden ser notables. La afectación producto del incremento del nivel del mar, se combina, además, con la influencia de otros procesos que no están explícitamente relacionados con el cambio climático como son: la extracción de agua subterránea, la construcción de embalses y los cambios en el escurrimiento superficial, entre otros.

Algunos de los impactos proyectados y que requieren un accionar temprano para la adaptación, lo constituyen el retroceso de la línea de costa con pérdida de territorio en la Isla de Cuba y en las cayerías; el daño a los arrecifes coralinos debido al incremento de la temperatura, con la consecuente amenaza para las especies que en ellos habitan; la modificación paulatina de las características físico-geográficas, hidrográficas e hidroclimáticas del país; la afectación de las instalaciones socioeconómicas costeras ubicadas por debajo de la cota de un metro y de la actividad pesquera, entre otros.

En el archipiélago cubano, se observa un modo particular de interrelación entre ecosistemas terrestres-ecosistemas marinos que la convierten en su totalidad en una zona costera o marina-costera al incorporar en el análisis sus actuales problemas ambientales; se estaría definiendo un modelo de gestión integrado de recursos hídricos y costeros que brinde soluciones y establezca programas a corto, mediano y largo plazo que permitan obtener un enfoque sistémico, holístico e integrado, implementado bajo la coordinación de un Consejo de gestión.

Este modelo de GIRH, tendría tres bloques integrados los cuales se gestionarían según los intereses del Consejo Específico, del Consejo Provincial o del Consejo Nacional de Cuencas Hidrográficas: **1)** un bloque de coordinación y gestión; **2)** un bloque técnico; **3)** un bloque de ordenamiento y control.

Esta gestión integrada de los recursos hídricos y costeros en tres bloques podría materializarse con la implementación de un modelo basado en el “paisaje”; éste visto como unidad espacial de referencia para el análisis de las relaciones monosistémicas (relaciones entre componentes del paisaje, en sentido vertical) y parasistémicas (relaciones horizontales entre paisajes de diferentes tipo y nivel jerárquico).

Y, además, se debería construir y aplicar un nuevo instrumento legal: Ley sobre “Las Aguas Terrestres y Costeras” que sustente sus niveles de protección en base al “Caudal Ecológico”; la gestión a nivel de cuencas hidrográficas y el “paisaje” como portador sistémico del desarrollo

sostenible y sus sinergias entre las unidades espaciales político-administrativas (territorio) y los ecosistemas.

Las **Líneas directrices** que explicarían este modelo de gestión integrada de los recursos hídricos y costeros para el caso cubano, serían las que se definen a continuación:

- a)- Convertir los Consejos de Cuenca, a cualquier nivel, en el principal órgano rector de la gestión, permitiendo las conexiones necesarias entre los gestores políticos, administrativos y ambientales.
- b)- Para las cuencas de interés nacional y provincial, los diagnósticos o informes anuales de cumplimiento de los diferentes programas se llevarían al nivel de Plan Hidrológico, sustentados en investigaciones y redes informativas.
- c)- Brindar información pública sobre la gestión de cuencas a través de mesas de trabajo con la ciudadanía, incrementando la motivación, participación y empoderamiento de todos los sectores, además de convertir a la mujer en líder de la gestión social del agua.
- d)- Realizar la gestión del agua bajo el paradigma de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH): propiciando el cumplimiento de los principios de Dublín y de los tres asuntos críticos de la gestión integrada, a partir de la implementación de una ética del agua. En este contexto, será preciso considerar como factor clave para una adecuada gestión, la diversificación de la oferta, aprovechando posibilidades como la reutilización de aguas tratadas, la recarga de acuíferos y otros.
- e)- Utilizar Modelos y Metamodelos Informáticos, Sistemas de Soporte a la Decisión, Sistemas de Información Geográfica, Bases de Datos (ambientales, sociales, económicas y otras) y otros; como herramientas que permitan crear las condiciones para establecer políticas adecuadas de planificación y gestión del agua de manera holística, sistémica e integrada.
- f)- Establecer un marco legal apropiado que convierta al paisaje en ente principal de protección y al medio biofísico subsistema fundamental en la cuenca hidrográfica (caudal ecológico), con nivel jerárquico superior a los subsistemas social y económico, quedando expresado en el Ordenamiento Territorial y la legislación vigente.
- g)- Utilizar los escenarios futuros de cambio climático como base para crear los nuevos escenarios de gestión del agua, donde la planificación social y económica responda a políticas ambientales enmarcadas en la protección del paisaje y el desarrollo sostenible.

A continuación, se describen cada uno de los bloques y como puede aplicarse al caso cubano la gestión integrada de los recursos hídricos y costeros:

Bloque 1: Coordinación y gestión.

Sin aún poder superar, la no coincidencia de los límites territoriales de las unidades político-administrativas -regiones, provincias, municipios y consejos populares-, con los límites naturales de una cuenca, subcuenca o microcuenca; es vital considerar por la coordinación del Consejo de Cuencas Hidrográficas la visión sistémica y holística que integran los subsistemas ambiental, social y económico con los intereses de los diferentes actores locales que utilizan los recursos naturales y los sistemas ambientales (ecosistemas y paisajes naturales) en la cuenca, en el contexto de las unidades político-administrativa; hasta que llegue el momento en que pueda ser superado este aspecto crítico.

La gestión integrada de los recursos hídricos y costeros debe tener como objetivo el desarrollo sostenible de todos los ambientes (terrestres y marinos) estén o no sujetos a múltiple jurisdicción, desde las cuencas altas (cuencas hidrográficas), hasta los límites exteriores de las zonas económicas exclusivas (ZEE).

Para cumplir este objetivo, los Consejos de Cuencas Hidrográficas, en correspondencia con el Modelo, **Figura 6**, cuenta con tres pilares: los diagnósticos ambientales y planes hidrológicos, la información y consultas públicas y el manejo Integrado de los recursos hídricos y costeros como herramienta de gestión que permite la conexión con el **bloque técnico** y con el **bloque de ordenamiento y control**.

El Consejo de Cuenca en Cuba a nivel territorial (provincia y municipios) está coordinado desde los gobiernos y participan en su gestión representantes de los Organismos de la Administración Central del Estado (OACEs) y además como invitados Organizaciones No Gubernamentales (ONG).

Para el cumplimiento de sus funciones, el Consejo de Cuencas Territorial (CCT), mantendrá los 11 subprogramas generales de gestión de recursos y actividades, que se desarrollan en las cuencas hidrográficas; colocando al agua en el centro del Desarrollo Sostenible (caudal ecológico) lo cual resulta fundamental para el desarrollo socio-económico, la existencia de ecosistemas saludables y la supervivencia humana. El agua, también debe estar en el corazón de la adaptación al cambio climático, sirviendo de vínculo crucial entre el sistema climático, la sociedad humana y el medio ambiente.

De particular importancia entre los instrumentos operativos para la gestión resultan los diagnósticos ambientales los cuales deben ser llevados a un plano superior, “Plan Hidrológico”, que permitirían insertar de manera paulatina nuevos instrumentos, herramientas, procedimientos e investigaciones en la gestión integrada de los recursos hídricos y costeros. Además, el modelo contiene, para su gestión de la retroalimentación permanente con la población, a través de consultas públicas directas insertadas en los procesos de gobierno local y territorial y el uso de técnicas de

investigación de campo, “Encuestas”, que aplicarían instrumentos como la entrevista, el cuestionario y otras.

De relevancia vital resultará el fortalecimiento de las comunidades de usuarios del agua, las cuales trabajarán por solucionar los conflictos de intereses entre usuarios permitiendo generar con su participación nuevos procesos en la toma de decisiones cuando se realizan los balances de agua por cuencas hidrográficas.

Bloque 2: Técnico.

Usando e insertando en los procesos de implementación y desarrollo del paradigma de gestión integrada de los recursos hídricos: herramientas, metodologías, modelos y metamodelos, sistemas de toma de decisiones, uso de imágenes satelitales y la teledetección entre otros; permitirá al órgano de gestión generar constantemente nuevos ciclos para la evaluación del estado en que se encuentren los procesos de implementación de la gestión integrada de los recursos hídricos y costeros.

Estos modelos matemáticos-estadísticos, programas, modelos y metamodelos geocomputacionales y otros; cada vez más potentes necesitarán ser alimentados con las actuales y nuevas bases de datos generadas a diferentes niveles jerárquicos que permitirán a su vez a través de investigaciones enriquecer los resultados que brindan los diagnósticos ambientales y los planes hidrológicos convirtiéndose en una fuente esencial para soportar la aplicación de los *Principios de Dublín* (GWP, 2000), los *Tres Asuntos Críticos* de la gestión del agua (Moriarty, et. *al.*, 2006), y el uso de la *Ética y la Moral*, bases fundamentales para asentar la praxis de la gestión integrada de los recursos hídricos y costeros.

Bloque 3: Ordenamiento y Control

El bloque de ordenamiento y control se sustenta en dos pilares fundamentales el ordenamiento territorial y los escenarios de cambio climático; ambos pilares integrados en dinámicas que permitan constantemente agilizar la toma de decisiones por parte de la coordinación de gestión creando programas a corto, mediano y largo plazo encaminados a lograr el desarrollo sostenible y que permitan evaluar los ciclos de gestión y de aplicación del ordenamiento ambiental y territorial por cuencas y a otros niveles.

En Cuba, el ordenamiento territorial presenta cinco aspectos o etapas de ordenamiento esenciales:

1) los estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgos (naturales, tecnológicos y sanitarios) que son su sustrato y que deben ser enriquecidos por los resultados que se obtienen en la comunicación de país sobre cambio climático para cada uno de los escenarios y por investigaciones a nivel local, municipal, provincial y regional;

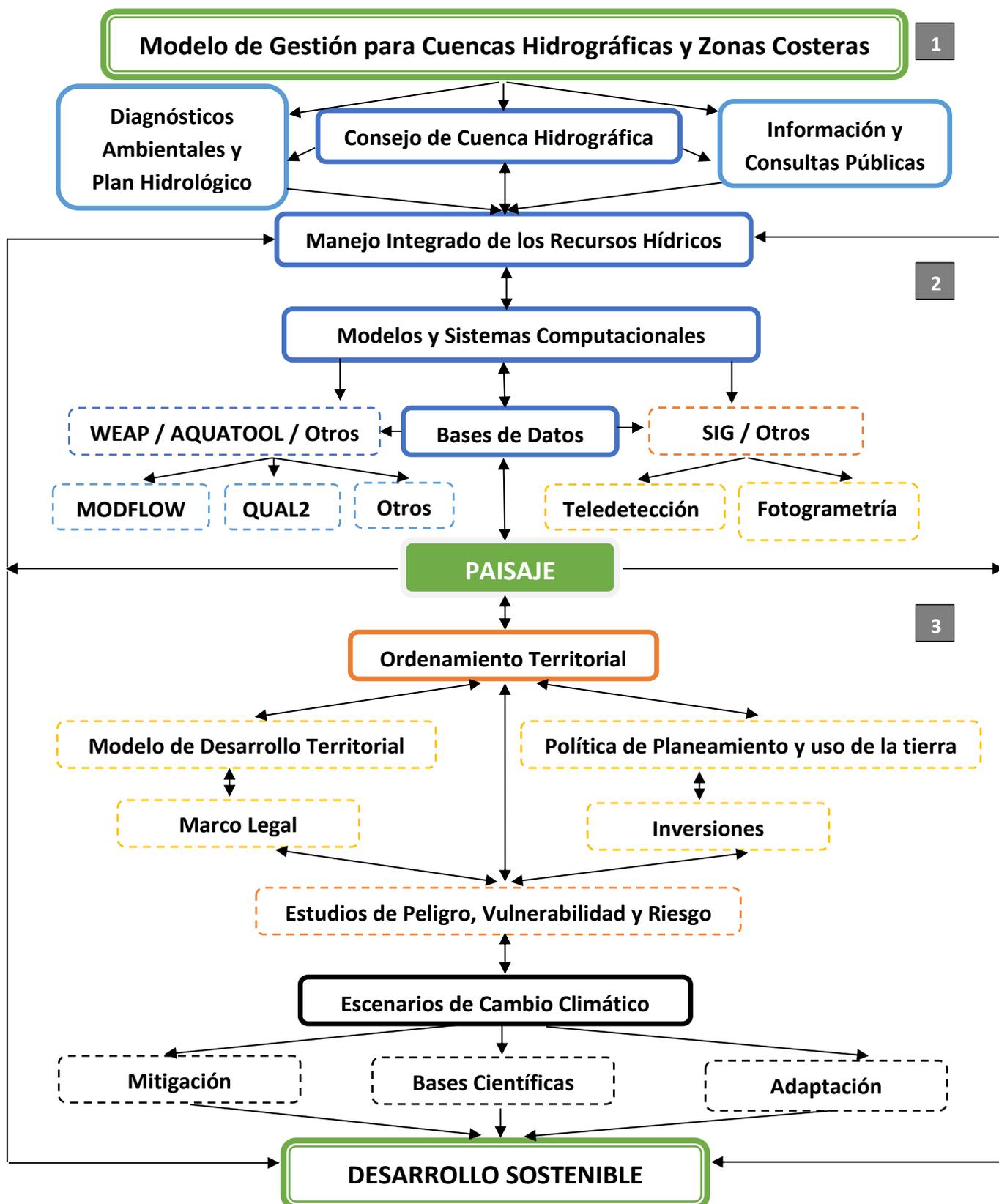


Figura 6. Modelo de Gestión Integrada para los Recursos Hídricos y Costeros.

2) el marco legal que en Cuba tiene un amplio desarrollo y que específicamente para una mejor implementación de éste modelo de GIRH, el Decreto-Ley 138 De las Aguas Terrestres debe ser llevado a Ley sobre “Las Aguas Terrestres y Costeras” que sustente sus niveles de protección en base al “**caudal ecológico**”; la gestión a nivel de “**cuencas hidrográficas**” y el “**paisaje**” como portador sistémico del desarrollo sostenible (construyendo e implementando un “Decreto-Ley sobre Protección del Paisaje”) y sus sinergias entre las unidades espaciales político-administrativas (el territorio), y los ecosistemas;

3) las inversiones las cuales deben cumplir con los lineamientos de la política económica y social en Cuba que entre otros aspectos expresan que las inversiones fundamentales a realizar responderán a:

- ✓ la estrategia de desarrollo del país a corto, mediano y largo plazos, erradicando la espontaneidad, la improvisación, la superficialidad, el incumplimiento de los planes, la falta de profundidad en los estudios de factibilidad, la inmovilización de recursos y la carencia de integralidad al emprender una inversión.
- ✓ Que se continuará orientando las inversiones hacia la esfera productiva y de los servicios, así como a la infraestructura necesaria para el desarrollo sostenible, garantizando su aseguramiento oportuno, para generar beneficios a corto plazo.
- ✓ Se priorizarán las actividades de mantenimiento constructivo y tecnológico en todas las esferas de la economía. Elevando la exigencia y el control a los inversionistas para que jerarquicen la atención integral y garanticen la calidad del proceso inversionista e incentivar el acortamiento de plazos, el ahorro de recursos y presupuesto en las inversiones.
- ✓ Y se elevará la calidad y la jerarquía de los planes generales de ordenamiento territorial y urbano a nivel nacional, provincial y municipal, su integración con las proyecciones a mediano y largo plazos de la economía y con el Plan de Inversiones, garantizando la profundidad y agilidad en los plazos de respuesta en los procesos obligados de consulta como son la licencia ambiental y la evaluación de impacto ambiental;

4) el modelo de desarrollo territorial lo determina el territorio que es el soporte de todas las actividades humanas, que debe ser objeto de gobierno por cuanto es motivo de conflictos, entre otras causas, por la escasez de suelos, por la competencia de distintos usos sobre un mismo espacio, por su sobrexplotación, por pugnas entre el uso público y privado, por las históricas contradicciones ciudad-campo; y

5) la política de planeamiento y uso de la tierra que, en Cuba, debido a sus características de insularidad, las altas densidades demográficas y la importancia de la base económica agropecuaria, los suelos constituyen un recurso finito, que demanda un uso racional como elemento básico en el logro de un Desarrollo Sostenible.

En ese sentido, el suelo se clasifica según su régimen urbanístico en: suelo no urbanizable, suelo urbanizado, y suelo urbanizable. La clasificación, se complementa con la calificación, a través de la cual se define:

- **Suelos no urbanizables:** *los destinos referidos a usos generales del suelo, como son: agrícola, pecuario, minero, turístico, áreas protegidas, otros.*
- **Suelos urbanizados y urbanizables:** *se llega a un nivel mayor de precisión, definiéndose los usos referidos a la vivienda, las zonas productivas, los servicios, los espacios públicos y las áreas verdes, entre otras.*
- En los tres regímenes (no urbanizables, urbanizables y urbanizados), se determinan las unidades o sectores de planeamiento, en función de establecer las regulaciones necesarias, que requieran cada uno de ellos.

Con respecto a las variaciones y cambios del clima en Cuba, según Pérez et *al.*, (2013), estas muestran los siguientes principales resultados:

- i. Se ha observado un incremento de la temperatura superficial del aire (0,9 °C) desde mediados del pasado siglo XX. No obstante, a dicho incremento, y que las últimas dos décadas han sido las más cálidas de los registros, se ha producido un ligero descenso de la temperatura superficial desde comienzos de los años 1990, lo que se considera una estabilización alrededor de un valor medio muy alto.
- ii. El incremento antes descrito, está condicionado por el aumento de la temperatura promedio, calculado en 1,9 °C.
- iii. Se ha producido una disminución en el rango diurno de la temperatura superficial.
- iv. Es poco probable que el calentamiento observado (principalmente después de los años 1970) se pueda atribuir, en una medida importante, a los efectos de la urbanización. Además, el incremento registrado en la temperatura de la superficie del mar y el calentamiento de la capa baja de la troposfera, son aspectos que se relacionan con el calentamiento reciente y que se observan en una escala espacial mayor.
- v. Los totales anuales de precipitación no muestran una tendencia significativa estadísticamente, pero revelan que, desde finales de la década de los años 1970, se ha

producido un ligero aumento de las anomalías positivas. Las precipitaciones del periodo poco lluvioso han aumentado, acompañadas de un incremento de las anomalías externas. Sin embargo, la variación más importante de este elemento climático se relaciona con la tendencia a la disminución en la región oriental de Cuba, que desde la década de los 1990 ha manifestado significativos déficits en los acumulados de precipitación.

- vi. El significativo incremento que los eventos de sequía registraron en el período 1961-1990 con respecto al 1931-1960, ha mantenido su continuidad en los persistentes eventos que afectaron la mitad oriental del país desde principios de los años 1990, acentuándose hasta culminar con el gravísimo proceso acaecido desde mayo del 2003 a mayo del 2005, el cual progresivamente se extendió a todo el país.
- vii. Desde 1996 se inició un nuevo período muy activo de la actividad de huracanes sobre Cuba, principalmente desde el año 2001, de tal forma que, entre el 2001 y el 2008, el país ha sido afectado por nueve huracanes. Sin embargo, si bien existe una ligera tendencia creciente a largo plazo en la frecuencia de huracanes sobre Cuba (1791-2008), esta no es estadísticamente significativa.
- viii. Es de suma importancia la ocurrencia de siete huracanes intensos desde el 2001, cifra que no se había registrado en década alguna desde 1791 hasta el presente. Tal récord se asocia al incremento observado en toda la cuenca del Océano Atlántico, incluyendo el Mar caribe, y puede estar condicionado, ante todo, a los muy altos valores de la temperatura del mar en el Caribe registrados desde 1998.
- ix. Durante las últimas tres décadas se ha observado un incremento en la ocurrencia de inundaciones moderadas y fuertes para las costas de Cuba, independientemente de los eventos meteorológicos que las generan, aunque para los ciclones tropicales la tendencia es menos pronunciada.
- x. Se ha producido un incremento de la influencia anticiclónica sobre el área, lo que implica a su vez el gradual predominio de las corrientes zonales del este y movimientos verticales descendentes.

El modelo planteado para la gestión integrada de los recursos hídricos y costeros, **Figura 6**, presenta tres ejes transversales que determinan para Cuba en su totalidad su paradigma de gestión, aplicable: la **Gestión Integrada de los Recursos Hídricos**, el **Paisaje** y el **Desarrollo Sostenible**.

1) La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH): como metodología es el camino hacia un desarrollo y gestión eficientes, equitativos y sostenibles de unos recursos hídricos y costeros cada

vez más limitados y para abordar unas demandas en competición es necesario aplicar las siguientes fases, **Figura 7**, de planificación e implementación, según ONU-Agua, GWP, (2007).

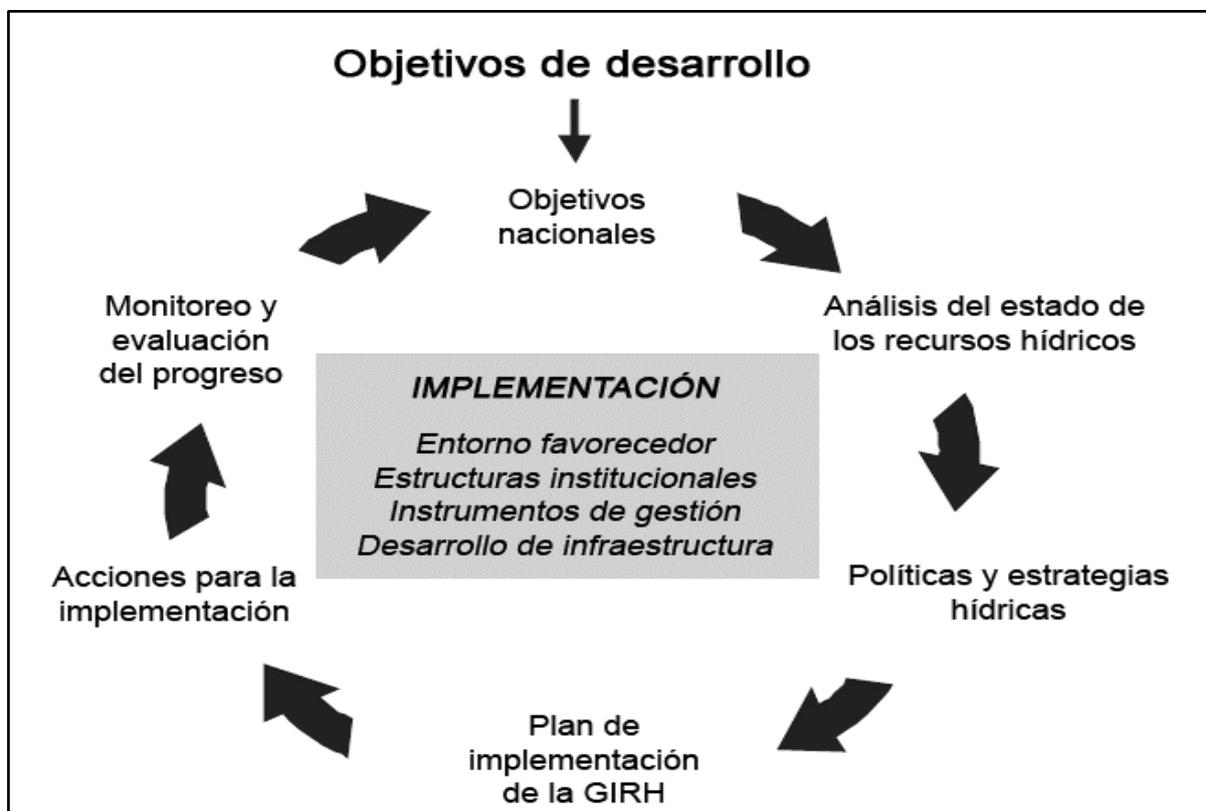


Figura 7. Fases de planificación e implementación de la GIRH, según ONU-Agua, GWP; 2007

2) El Paisaje: visto desde una visión sistémica como portador del desarrollo sostenible. Concibiéndolo, como un sistema de conceptos, formado por el binomio "paisaje natural-paisaje cultural" (Mateo, 2012). El cual podría ser definido como un polisistema que se sitúa en la interface entre la Naturaleza y la Sociedad, dotado de una estructura y un funcionamiento propio. El status paisajístico de este sistema, es determinado del subsistema de producción económica y del subsistema cultural: los efectos cambian en acuerdo a los tipos de producción y a los grupos sociales implicados. Los paisajes son verdaderos espacios naturales transformados por las sociedades para producir, habitar, vivir y soñar: en síntesis, son formaciones antro-po-naturales (González, 2007).

3) El Desarrollo Sostenible en Cuba, según la Ley 81 de Medio Ambiente, se entiende como: un proceso de elevación sostenida y equitativa de la calidad de vida de las personas, mediante el cual se procura el crecimiento económico y el mejoramiento social, en una combinación armónica con la protección del medio ambiente, de modo que se satisfacen las necesidades de las actuales generaciones, sin poner en riesgo la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras.

El Desarrollo Sostenible desde la sistémica en un modelo de gestión integrada de los recursos hídricos y costeros, debe asumir la sostenibilidad ambiental (de los sistemas naturales) como el elemento decisivo (caudal ecológico), o sea, como el medio de ámbito, de acuerdo con el cual las restantes categorías de sostenibilidad (la económica, lo social y lo cultural) deberían adaptarse (Mateo, 2012), esta visión queda definida por el triángulo de Nijkamp, **Figura 8**.

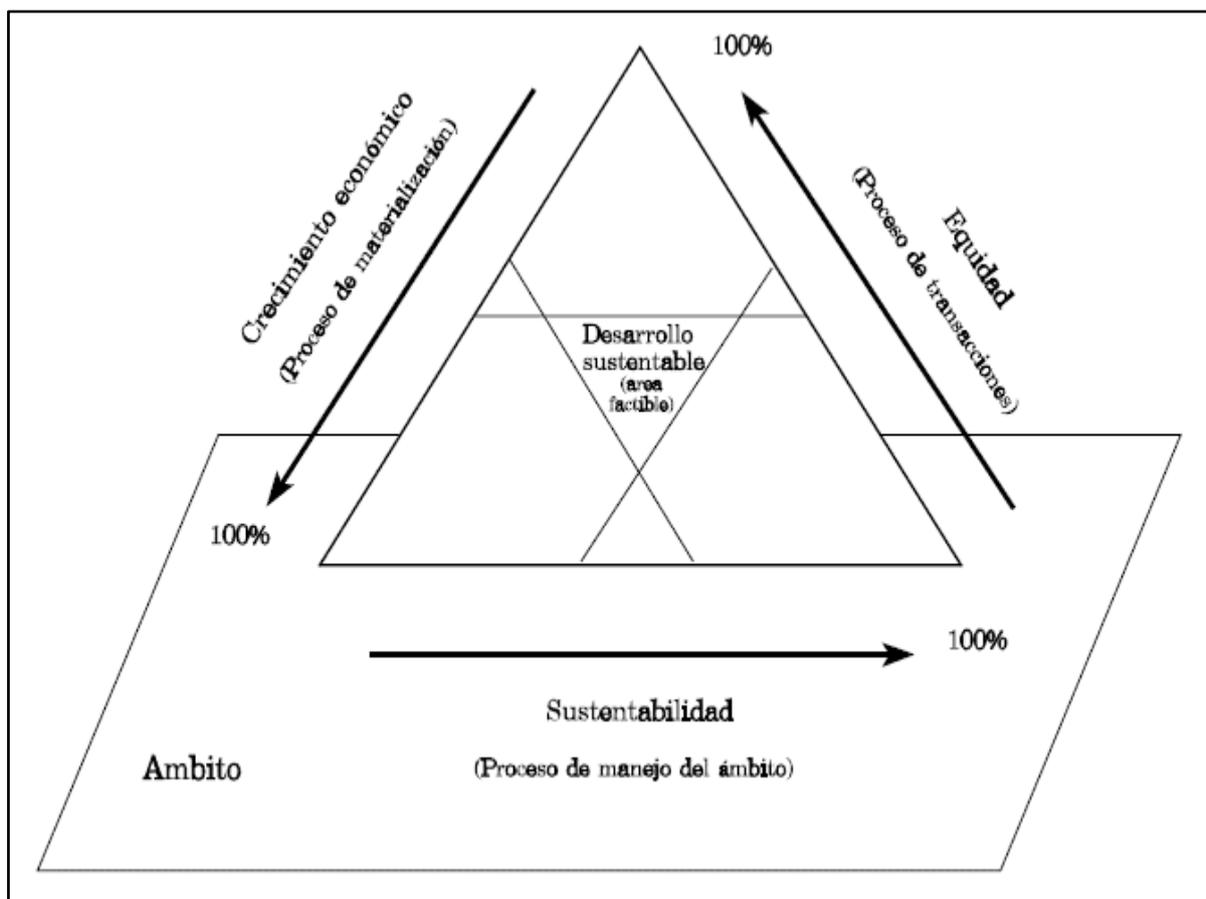


Figura 8. Triángulo de Nijkamp, (Nijkamp, 1991), adaptado por (CEPAL, 1994).

En esta visión sistémica, la naturaleza y la sociedad, como totalidades dialécticas, cada una con su autonomía relativa, formarían sistemas de interacción dialéctica y compleja, que tendrían como consecuencia la formación de una variada gama de ecosistemas humanos que se gobernarían por mecanismos de autorregulación y autorganización (Andrade, 2001).

Bibliografía

Andrade, S. A.; 2001; Bases filosóficas e científicas do pensamento ambiental. En Educação Ambiental, curso básico a distancia, Ministerio de Meio Ambiente, Brasília, unidade II, pp. 69-105.

Andreu, J., Marco, J.; 1983; El modelo USOCON de simulación de la utilización conjunta de una cuenca. En Utilización Conjunta de Aguas Superficiales y Subterráneas. Servicio Geológico de Obras Públicas y Universidad Politécnica de Valencia.

Andreu, J. y Sahuquillo, A.; 1987; Efficient aquifer simulation in complex system, J. Water Resource Planning, and Management, 113 81), 110 – 129.

Andreu, J.; 1989; Manual del usuario del modelo OPTIRED de optimización de sistemas de recursos hidráulicos, Depto de Ing. Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.

Andreu, J., Capilla, J., y Ferrer J.; 1989; Manual del usuario del modelo SGC de simulación de sistemas de recursos hidráulicos, Depto de Ing. Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.

Andreu, J., Capilla, J., y Sanchis, E.; 1991; AQUATOOL+. A computer assisted support system for water resources research management including conjunctive use. In: D.P Loucks and J. R. da Costa (eds.), Decision support system, Berlin, Springer-Verlag, pp.333-55.

Andreu, J., Capilla, J., y Sanchis, E.; 1996; AQUATOOL+. A generalized decision-support system for water-resources planning and operational management.

Angel Maya, A.; 1995; La fragilidad ambiental de la cultura. Editorial de la Universidad Nacional de Bogotá.

Angel Maya, A.; 1996; El reto de la vida. Ecosistema y cultura. Una introducción al estudio del medio ambiente, Ecofondo, Serie construyendo el futuro, nº 4, Santafé de Bogotá.

Animesh K. Gain, Josselin J. Rouillard, Benson D.; 2013; Can Integrated Water Resources Management Increase Adaptive Capacity to Climate Change Adaptation? A Critical Review. Journal of Water Resource and Protection, 2013, 5, 11-20.

<http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2013.54A003> Published Online April 2013

<http://www.scirp.org/journal/jwarp>

AQUATOOL+ http://www.upv.es/aquatool/es/software_es.html

http://www.upv.es/aquatool/es/historia_es.html

Barragán, J. M.; 2004; Las áreas litorales de España. Del análisis geográfico a la gestión integrada. Ariel Ciencia, Barcelona. 198 pp.

Bertalanffy L. von; 1975; Perspectives on General Systems Theory. Scientific-Philosophical Studies, E. Taschdjian (eds.) New York: George Braziller, ISBN: 0-8076-0797-5.

Box, G. E. P. and Jenkins, G. M.; 1976; Time Series Analysis Forecasting and Control, Holden Day, San Francisco.

Box, G. E. and Tiao, G. C.; 1975; Intervention analysis with applications to economic environmental problems, Journal on the American Statistical Associations 70: 70-79 pp.

Brivio, P. A., Lechi, G. M., y Zilioli, E.; 1992; Il telerilevamento. ISBN: 88-7138-045-2.

Cabrera, J. A., García, G., Rey, O., Alcolado, P. M., Pérez de los Reyes, R., Martínez, J. M., Miranda, C., Castellanos M. E., León A. R. Dalia Salabarría, D., Ángel Alfonso Froilán Dueñas, F., y Martínez D.; 2010; El Manejo Integrado costero en Cuba: Un camino, grandes retos. En Barragán J. M. (ed.); 2010; Manejo Costero Integrado y Política Pública en Iberoamérica: Un diagnóstico. Necesidad de Cambio. ISBN: 978-84-693-0355-9.

Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.

Castro, N.; 2003; Sistemas, estructuras y desarrollos. Editorial de la Universidad Nacional a Distancia, San José de Costa Rica.

C.E.; 2000; Convenio Europeo del Paisaje. Florencia, Italia.

Ceballo, O.; 2004; Pronóstico de sequía hidrológica a partir de la sequía meteorológica en la cuenca hidrográfica del río zaza con cierre en la estación hidrométrica Paso Ventura. Tesis presentada en opción al grado científico de Master en ciencias meteorológicas. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC), La Habana.

Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute; 2009; Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP.

CEPAL; 1994; Políticas Públicas para el Desarrollo Sustentable: La Gestión Integrada de Cuencas. División de Recursos Naturales y energía.

Christofolletti, A.; 1979; Analise de sistemas em Geografia. Introdução, Hucitec, São Paulo.

Chuvieco, E.; 1995; Fundamentos de teledetección espacial. Ediciones RIALP. S.A. Madrid, España. ISBN. 84-321-2680-2.

Chuvieco, E.; 1999; Fundamentos de Teledetección Espacial. Ediciones Rialp, 1999.

Clark, R. N.; 1999; “Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy”. Chapter 1, in *Manual of Remote Sensing*, John Wiley and Sons, New York, 1999a.

Comisión Brundtland; 1987; Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. Asamblea General de las Naciones Unidas.

CONAGUA; 2005; Percepción remota “Fundamentos de teledetección espacial”. Comisión Nacional del Agua. México.

Dessena, A. M., y Melis, T. M.; 2006; Telerilevamento applicato. Mako edizioni sas, Quartu S. E. Italia.

Diakonov, K. N.; 2002; La interacción de las direcciones estructural, evolutiva y funcional de las investigaciones sobre los paisajes. En revista de la Universidad Estatal de Moscú, Serie Geografía, nº 1, pp. 13-21.

Díaz Duque, A. J.; 2011; Hacia el uso sostenible del agua en Cuba. IX Congreso Cubano de Geología. IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Geociencias, 2011. ISBN: 978-959-7117-30-8.

Domínguez, A.; 2003; Análisis y diagnóstico geoecológico de los paisajes en la provincia de Sancti Spíritus. (pp. 113). La Habana, Cuba: Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en ciencias geográficas. Facultad de Geografía. Universidad de La Habana. Inédito.

Dorticós del Río L. P., Arellano M., y García M. J. (eds.); 2012; Recursos hídricos en Cuba. Una visión. En Jiménez B. y Galizia J. (eds.); 2012; Diagnóstico del agua en las américas. Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC. ISBN: 978-607-9217-04-4.

EAN; 2012; Estrategia Ambiental Nacional, 2011-2015. La Habana, Cuba.

Gallopín G.; 1986; "Ecología y ambiente". En: Los problemas del conocimiento y la perspectiva ambiental del desarrollo. Siglo XXI Editores. México D.F. pp 126 - 172.

García Fernández, J. M.; 2006; Experiencias cubanas en la institucionalización del manejo integrado de cuencas. Revista Voluntad Hidráulica, Nº 98, p. 2-14, 2006.

Global Water Partnership (GWP) y la International Network of Basin Organizations (INBO); 2009; Manual para la Gestión Integrada de Recursos Hídricos en Cuencas.

González, I.; 2007; Modelo alternativo de diagnóstico para la planificación ambiental en cuencas hidrográficas. Aplicación a las subcuencas Tuinucú-Yayabo, Sancti Spíritus, Cuba. (pp. 132). Ancona, Italia: Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor. Facultad de Agraria. Universidad Politécnica de La Marche. Inédito.

González, I., Díaz, A., y Ceballo, O.; 2012; Experiencias en el manejo integrado de cuencas hidrográficas en Sancti Spíritus. En A. Z. Domínguez, M. Torres e Y. G. Puertas de Armas (Eds.), Experiencias en la protección de la biodiversidad y el desarrollo sostenible en la provincia de Sancti Spíritus (pp. 141-149). La Habana, Cuba: Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. ISBN:978-959-287-033-8.

González, R.C., Woods, R.E.; 2002; Digital Image Processing, Second Edition, Addison-Wesley, 2002.

Grau, A. Ricardo; 1997; Series Cronológicas y Métodos Robustos de Regresión, UCLV, Santa Clara, Villa Clara, Cuba, 1997.

Green, R.O. y col.; 1998; Imaging Spectroscopy and the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS), *Remote Sensing of Environment*, vol. 65, pp. 227-248, 1998.

GWP; 2000; Integrated Water Resources Management. TAC Background Paper No. 4, GWP, Stockholm, Sweden.

Halffter, G., C. E. Moreno y E. O. Pineda; 2001; Manual para evaluación de la biodiversidad en Reservas de la Biosfera. CYTED- ORCYT – S.E.A., Zaragoza, 77 pp.

Hsieh, P. F. and Landgrebe, D.; 1998; *Classification of High Dimensional Data*. Tesis Doctoral, School of Electrical and Computer Engineering, Purdue University, 1998.

Ingegnoli, V. y Giglio, E.; 2005; Ecologia del paesaggio. Manuale per conservare, gestire e pianificare l'ambiente. ISBN: 88-513-0218-9.

IPCC; 2007; Cambio Climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el

Isachenko, A. G.; 1991; La ciencia del paisaje y la regionalización físico-geográfica. Editora de la escuela Superior, Moscú.

Landgrebe, D.; 2002; "Hyperspectral Image Data Analysis", *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 19, no. 1, pp. 17-28, 2002.

Lorenz K.; 1978; Vergleichende Verhaltensforschung: Grunlagen der Ethologir, Berlino, Viena, Springer-Verlang.

Magdaleno, F.; 2004; Caudales ecológicos: conceptos básicos, métodos de cálculo y nuevas interpretaciones. Ingeniería Civil 135/2004.

MMA; 1999; El libro blanco del agua en España. Madrid, 637 pp.

Mateo, J. M.; 2002^a; Ceará e o desenvolvimento ambiental, Jornal O Povo, Fortaleza, Brasil, p. 27.

Mateo, J. M.; 2012; La dimensión espacial del desarrollo sostenible: una visión desde América Latina. Editorial U.H, Editorial Científico-Técnica. pp 296. ISBN 978-959-7211-16-7 y 978-959-05-0658-1.

Moreira, J. M. y M. Rodríguez; 2001; Geodiversidad y Geomorfología en Andalucía. En: Revista Medio Ambiente, No. 38, Junta de Andalucía, España, pp 6- 15.

Moriarty, P., Butterworth J., y Batchelor C.; 2004; Integrated Water Resources Management and the domestic water and sanitation sub-sector. International Water and Sanitation Centre (IRC).

Nijkamp, P.; 1991; Regional sustainable development and natural resource use. World Bank Annual Conference on Development Economics, Document CEPAL, nº 1, Washington D.C.

Odum E. P.; 1971; Fundamentals of Ecology, 3a ed., Philadelphia, W.B. Saunders.

ONU-Agua, GWP; 2007; Roadmapping for Advancing Integrated Water Resources Management (IWRM) Processes.

Paruelo, J. M.; 2008; La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remoto. Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente. Ecosistemas 17. Asociación Española de Ecología Terrestre (AEET).

Pérez R.; 2013; Variaciones y Cambios en el Clima. En Planos, E; Vega, R y Guevara, V. (eds.); 2013; Impacto del Cambio Climático y Medidas de Adaptación en Cuba. Instituto de Meteorología, Agencia de Medio Ambiente, Ministerio de Ciencia, Tecnología y medio ambiente. La Habana, Cuba, 430 pp.

Plaza, A.; 2002; Proposición, validación y prueba de una metodología para el análisis de datos hiperspectrales que integra información espacial y espectral. Tesis doctoral.

Prigogine, I.; 1996; La fin des certitudes: temps, chaos et les lois de la nature, Parigi, Editions Odile Jacob.

Purkey, D., B. Joyce, S. Vicuna, M. Hanemann, L. Dale, D. Yates and J.A. Dracup; 2007; Robust analysis of future climate change impacts on water for agriculture and other sectors: a case study in the Sacramento Valley". Climatic Change, doi: 10.1007/s10584-007-9375-8.

Quintero, R., Cruz, J. M., y Rodríguez C. A.; 2013; Proyecto: Gasto sanitario embalses, provincia Sancti Spíritus. Empresa de Proyectos e Ingeniería, U.E.B. Sancti Spíritus. Ministerio de la Agricultura.

Ramos, A. E. y Peña J.; 1998; Gasto sanitario embalse Zaza. Departamento de Presas y Derivadoras. Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos, Villa Clara, Cuba.

Riábchikov, A. M.; 1976; Estructura y dinámica de la esfera geográfica. Editorial Mir. Moscú, 238 pp.

Richards, J. A.; 1993; Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. Springer-Verlag, Berlin, 1993.

Rougerie, G. y Beroutchatchvili N. L.; 1991; Geosystemes et paysagens, Colin Editores, Paris.

Shannon, C. Y W. Weaver.; 1949; "The mathematical theory of communication". Urbana. University of Illinois press.

Silvia, E. V. DA y Mateo J. M.; 2003; Paisajes del interior de la región del Nordeste del Brasil y sus potencialidades turísticas, en paisaje, ordenamiento territorial y turismo sostenible. Universita degli Studi di Génova, pp. 47-54.

Solntsev, N. A.; 1948; El paisaje geográfico natural y algunas de sus regularidades generales, en trabajos de la Segunda Reunión de los Geógrafos Soviéticos, Moscú, pp. 53-57.

Vergara, P.; 2004; El enigma del desarrollo: endogeneidad en un mundo globalizado, planeamiento territorial e desenvolvimiento regional, EDUECE, Fortaleza, Brasil, pp. 375-434.

Water Evaluation and Planning System (WEAP) <http://www.weap21.org/>

Weiss P. A.; 1969; The living system: determinism stratified, in Koestler A., Smithies J. R. (a cura di), *Beyond Reductionism: New Perspectives in life Sciences*, Hutchinson of London, pp. 3-55.

Wiener N; 1948; “Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine”.

Yates, D., J. Sieber, D. Purkey, and A. Huber Lee, and H. Galbraith; 2005a; WEAP21: A demand, priority, and preference driven water planning model: Part 2, Aiding freshwater ecosystem service evaluation. *Water International*. 30(4):487-500.

Yates, D., J. Sieber, D. Purkey, and A. Huber Lee, WEAP21; 2005b; A demand, priority, and preference driven water planning model: Part 1, model characteristics. *Water International*. 30(4):501-512.

Yates, D., D. Purkey, J. Sieber, A. Huber-Lee, H. Galbraith, J. West, and S. Herrod-Julius; 2007; A physically-based, water resource planning model of the Sacramento Basin, California USA. *ASCE J. of Water Res. Management*.

Yunez-Naundé, A. (comp); 1994; *Medio ambiente. Problemas y soluciones*, Centro de Estudios Económicos, El Colegio de México, México D.F.

CAPÍTULO 3

Capítulo 3. Caracterización de los subsistemas ambiental, social y económico en la cuenca hidrográfica del río Zaza

La cuenca hidrográfica es una unidad sistémica natural, geográficamente delimitada por un sistema de causas interrelacionados que drenan las aguas superficiales, con peculiaridades como: independencia relativa -derivada de sus límites naturales bien definidos- y dinámica funcional asociada al intercambio de sustancias y energía que promueven el clima y la hidrología, fundamentalmente (González et *al.* 2012).

La cuenca hidrográfica del río Zaza es la segunda más extensa del país, después de la cuenca hidrográfica del río Cauto, con un área de 2 413 Km², lo cual representa el 2,26% del territorio de la Isla de Cuba, se encuentra ubicada en la vertiente meridional y clasifica como grande, según la clasificación para cuencas hidrográficas cubanas (Puerta de Armas, 2004). Presenta una gran diversidad de paisajes y características físico-geográficas, según la clasificación de González (2007), el área de estudio muestra como principales formas del relieve las llanuras del tipo (bajas, medias y altas), alturas del tipo (pequeña, medianas y grandes) y montañas pequeñas.

En la cuenca Zaza su parte agua se extiende entre las coordenadas 368 000 a 840 000 de longitud oeste y entre 200 000 y 800 000 de latitud norte, **Figura 9**. Su río principal, el cual le da nombre, tiene una longitud de 155 Km. El potencial hidráulico total es de 1 100 hm³, donde las aguas superficiales representan el 96,5% y las subterráneas el 3,5% del total.

En esta cuenca hidrográfica de significación nacional reside el 2,57% de la población cubana con 288 900 habitantes (ONEI, 2015), se desarrolla una variada actividad agropecuaria e industrial, así como un importante desarrollo hidráulico. Está ubicada política-administrativamente en las provincias de Sancti Spíritus y Villa Clara y constituye una de las 9 cuencas hidrográficas priorizadas en el país por las afectaciones ambientales que presenta, su amplia actividad económica y su importancia social.

El territorio más densamente poblado es la ciudad de Sancti Spíritus con 105 141 habitantes, que concentra el 36,4% del total. Además, encontramos 172 asentamientos humanos concentrados, de los cuales 18 son núcleos urbanos y 154 rurales, de ellos el 83,7% ubicados en la provincia de Sancti Spíritus y el 16,3% en la provincia de Villa Clara (Censo de Población y Vivienda, 2012).

MAPA GEOGRÁFICO GENERAL

CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO ZAZA

ESCALA 1:25 000

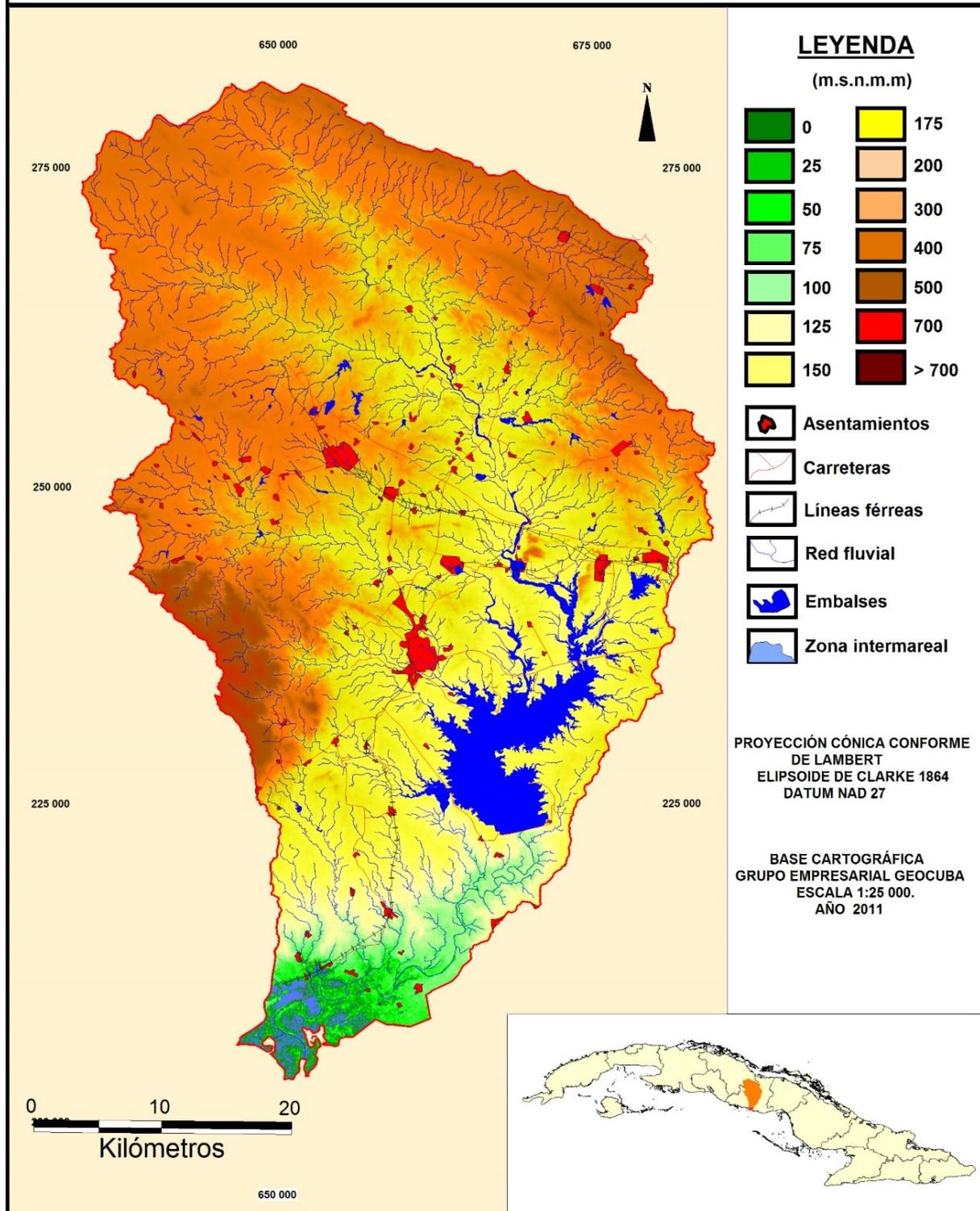


Figura 9. Características geográficas generales de la cuenca hidrográfica del río Zaza.

En general, la cuenca, presenta diferentes grados de afectaciones en los recursos naturales, en el uso, disponibilidad y calidad de las aguas, la biodiversidad, la agroproductividad y aptitud de sus suelos para el cultivo (CITMA, 2000). En 5 siglos de explotación de sus tierras han estado presentes factores naturales y antropogénicos que impactaron negativamente, lo cual llevó a evaluarla en estado muy crítico en 1997 (Consejo de Cuenca Provincial, 2002).

Dentro de los factores naturales encontramos la diversidad de tipos de suelos en general muy erosionables, la densidad de cauces que superan en algunos sectores los 5 Km/Km² y la presencia de fuertes pendientes; entre los factores antrópicos ha existido una intensa explotación agropecuaria que hoy se traduce en una baja cobertura boscosa, alteración de la estabilidad ecológica de sus cauces naturales por la construcción de grandes y pequeños embalses reduciéndose en 14% el aporte de agua en la desembocadura del río principal y el desarrollo de una infraestructura agroindustrial y de asentamientos poblacionales sin una solución efectiva para el tratamiento de residuales orgánicos, entre otros (Hernández et *al.*, 2012).

La conjugación de ambos factores comparte la responsabilidad del deterioro de sus suelos que en el año 1997 era del 93,05% por erosión hídrica (CITMA, 1997); desde el año 2000 se trabaja en el establecimiento de un Programa de Conservación y Mejoramiento de Suelos con el cual se pretende detener la degradación y crear las condiciones para una recuperación paulatina de los mismos.

Actualmente la cuenca hidrográfica del río Zaza presenta el 88,5% de sus suelos afectados por la erosión hídrica (Hernández et *al.*, 2012). La cobertura boscosa ocupa solamente 220,05 km², el 9,1%, de sus 2 413 km² (Consejo de Cuenca Provincial, 2014), lo que ha provocado el asolvamiento de embalses y cauces superficiales y la ocurrencia de inundaciones debido a grandes avenidas en los ríos por el aumento del coeficiente de escurrimiento del terreno y la pérdida de la capacidad de retención del agua de los suelos desnudos.

Según, Álvarez y González (2011), el potencial de cobertura boscosa en la cuenca hidrográfica del río Zaza, solamente en la provincia Sancti Spíritus pudiera alcanzar los 905,37 km², el 37,5% de su área, si se cumplieran los siguientes requerimientos para reforestación:

- i. En terrenos referidos a fajas hidrorreguladoras forestales, (Ley 85, Forestal (artículos 35 y 38)) en lagos naturales y artificiales, ríos principales, ríos de primer orden, ríos segundo orden y otros.
- ii. En terrenos que estén sujetos a erosión actual y erosión potencial, ya sea por pendiente u otras causas, terrenos con poca profundidad efectiva, terrenos que por diversas razones y factores limitantes no puedan destinarse a otros usos agrícolas o ganaderos.

- iii. En terrenos que circundan manantiales, nacimientos de ríos, autopistas y carreteras de interés nacional y provincial -a lo largo de ellas- sin obstaculizar el área útil de las mismas.

3.1. Evolución geohistórica de la cuenca Zaza durante el proceso de antropización siglos XVI al XX

El territorio central de la isla de Cuba y la provincia de Sancti Spíritus en particular constituye, según Domínguez, (2003), uno de los sectores en Cuba donde la modificación antrópica del medio natural comenzó más tempranamente, acentuándose en etapas posteriores por la expansión de la propiedad agraria, bajo un patrón de uso de la tierra que privilegiaba la eficiencia económica, a costa de la ecológica. Después de 1959, se inicia una política de planificación de las actividades socioeconómicas que se enmarca actualmente en la concepción del “Desarrollo Sostenible”.

La magnitud y profundidad, de la influencia humana, sobre los paisajes de esta parte del país (especialmente por las manifestaciones de degradación que exhiben algunos componentes de la estructura vertical de los mismos, tales como los suelos y la vegetación) se conoce solo de manera parcial. Desde inicios del siglo XVI, el territorio constituye un escenario importante del impacto antrópico en Cuba, con un patrón de uso de la tierra basado en la obtención de ganancias, a cualquier costo (González, 2007).

Un paisaje rural, según Domínguez y Acosta, (2012), es construido bajo una dinámica donde se enfrentan las potencialidades y limitaciones de los paisajes originales -derivadas de sus recursos y condiciones naturales-, las demandas de la sociedad y otras dos variables básicas: la capacidad tecnológica disponible y el acervo sociocultural del grupo humano que interviene en ese proceso. De esto resulta la asignación al paisaje de determinadas funciones socioeconómicas -con sus correspondientes sistemas técnicos y formas propias de uso y transformación-, o sea, el surgimiento de modelos culturales específicos, que determinaron la formación de los paisajes actuales.

Esto es esencial en Cuba, cuya gran diversidad paisajística influyó en la selección, a escala regional, de determinado modelo cultural (Domínguez y Acosta, 2012). En este sentido el territorio de la cuenca hidrográfica del río Zaza se caracterizó por la presencia de rasgos del -occidente cubano: azucarero y esclavista y el oriente ganadero y minifundiarío- asentado en el trabajo libre, visto desde el prisma de los paisajes agrarios, donde estaban presentes otras producciones como el café y el tabaco. Así, aunque predominan dos modelos culturales, las diferencias en las tecnologías utilizadas y las estructuras espaciales creadas hacen que estén presentes en la cuenca Zaza los modelos que caracterizan la construcción de los paisajes culturales en Cuba, según Domínguez y Acosta, (2012):

- a) Modelo prehispánico o precolombino.
- b) Modelo de latifundio ganadero.
- c) Modelo de sitios o estancias.
- d) Modelo de plantación azucarera esclavista.
- e) Modelo tabacalero.
- f) Modelo cafetalero.
- g) Modelo de latifundio cañero.

Según la propuesta de diagnóstico ambiental para el ordenamiento territorial de la cuenca hidrográfica del río Zaza, Hernández et *al.*, (2012); González et *al.*, (1999); al llegar los colonizadores españoles al territorio que ocupa la cuenca hidrográfica del río Zaza existía una vegetación típica de Cuba central. Las principales formaciones vegetales eran los bosques, predominando el semideciduo mesófilo, mientras en las cimas y farallones cársticos de las montañas, se podían encontrar elementos de la vegetación de mogotes y el bosque semideciduo micrófilo.

En las cimas no cársticas predominaba el bosque semideciduo mesófilo submontano, y en sus vaguadas y barrancos húmedos, aparecían elementos del bosque pluvial junto al siempreverde. En las alturas serpentínicas se localizaba el matorral xeromorfo espinoso conocido como “Cuabal”, y en las llanuras de substrato cárstico con suelos pobres (Arenoso cuarcítico y esquelético), donde no existían los nutrientes necesarios, se desarrolló una vegetación emergente de sabanas con primacía de gramíneas y la presencia de árboles aislados, donde la familia *Arecaceae* (arecáceas) eran predominantes.

Los ríos eran los principales transmisores-conectores entre las variadas unidades, y en sus riberas se desarrollaba el bosque de galería o ripario, con especies más exigentes a la humedad. En la costa, el bosque de mangle cumplía funciones ecológicas de estabilidad entre los ecosistemas terrestres y marinos, constituyendo además una barrera contra la erosión marina y el impacto de los eventos extremos peligrosos como los de ciclón tropical.

Las actividades relacionadas por los grupos humanos aborígenes, según (Domínguez y Acosta, 2012), estaban caracterizadas por: 1) los recolectores-cazadores que vivían esencialmente en zonas costeras de mangle y cársticas con cavernas y 2) las sociedades agrícolas ceramistas subtaínos y taínos, con un patrón de distribución espacial basado en la cercanía a corrientes fluviales, que pudieron aclarar pequeñas áreas de bosques para cultivar yuca, maíz y tabaco; usando el fuego y utensilios de piedra con los cuales no originaron cambios irreversibles en algún sistema natural. Existen evidencias de un poblamiento Paleolítico muy temprano, proveniente esencialmente del

norte, en localidades cercanas a los ríos Calabazas y Zaza, así como el arroyo Seibacoa, caracterizado por una industria de sílex desarrollada. Los sitios Mesolíticos muestran que estas comunidades aprovecharon el río como vía de comunicación y lugar de obtención de alimentos, mediante una adaptación sociocultural activa que permitía la conservación de los paisajes naturales, **Figura 10**. En las Montañas de Sancti Spíritus, estas comunidades presentan dos estadios evolutivos: Mesolítico y Neolítico temprano donde aparecen muestras de arte rupestre.



Figura 10. Vasijas de cerámica usadas por los aborígenes, Sitio: Toma de Agua. **Fuente:** CITMA, 2013.

Con la llegada de los españoles, se inician los primeros vestigios de minería en Cuba con el lavado de oro en los ríos, que removió importantes volúmenes de sedimentos. El resto de la actividad minera desarrollada desde el siglo XVI hasta el XIX, se dedicaba principalmente a la extracción de roca caliza y arcilla en canteras para la construcción, provocando impactos puntuales que, a pesar de ser intensos, no han dejado evidencias por la capacidad de recuperación de los geosistemas (Hernández et *al.*, 2012) y (González et *al.*, 1999).

Los primeros cambios irreversibles en tierra firme, fueron derivados del modelo de latifundio ganadero dedicado a la cría de: vacunos, cerdos, equinos y asnos; en Montañas de Sancti Spíritus se impulsa la ganadería menor. El ganado era pastoreado de forma extensiva en un clima adecuado, con numerosas aguadas y abundante alimentación en sabanas y bosques; provocando los primeros procesos de deforestación, alteración de la cadena trófica, y la quema para estimular los pastizales y la introducción de nuevas variedades de pastos y cultivos, así como especies de animales y frutales (Domínguez y Acosta, 2012).

Los paisajes naturales se fueron transformando bajo el paradigma de la economía ganadera la cual favorecía otras modalidades de asimilación, con una fase pastoril-silvícola y agrícola, que acentúan la diversificación paisajística. Así, según Domínguez y Acosta (2012), entre 1650 y 1750, las haciendas se diferencian internamente, alternando las sabanas destinadas al ganado, con los “quemados” para abrir espacio a pastos o cultivos y los montes para obtener maderas preciosas para la construcción naval y alimentar el ganado de cerda (modelo de sitios o estancias). La ganadería proporcionó las principales características a la dinámica del paisaje agrario. Observándose aún hoy huellas paisajísticas de segmentos circulares de hatos, en fotos aéreas e imágenes satelitales.

El siglo XVIII y el XIX significó la expansión por la región occidental -primero- y central después del modelo de plantación azucarera esclavista. El boom azucarero del XVIII hasta la primera mitad del XIX representó el comienzo de un nivel muy superior de impacto sobre la cuenca Zaza. Según, González et *al.*, (1999), la caña de azúcar, cultivo extensivo, necesitó enormes áreas para su desarrollo, además para el proceso fabril se utilizaba como principal fuente energética el leño, por lo que miles de hectáreas de bosques desaparecían en las calderas de los ingenios cada año. El agotamiento de la productividad de los suelos y la lejanía de las fuentes energéticas por la desaparición de los bosques cercanos, provocó que en pocos años las áreas de siembras se desplazaran hacia nuevas tierras a desmontar, con la ventaja de encontrar suelos más fértiles y reservas de combustibles. La agroindustria azucarera, mucho más rentable y competitiva que las demás actividades, desplazó a la ganadería, hacia suelos de mayores pendientes, provocando nuevos desmontes y asimilación de áreas no apropiadas para ese uso. La erosión se aceleró y aumentó la llegada de sedimentos a los cauces fluviales y litorales.

En Montañas de Sancti Spíritus de arraigada tradición ganadera cambia el régimen de manejo en la ganadería -de extensiva a intensiva y especializada-, reestructurando este tipo de paisaje. Paralelamente, se inicia la siembra de café, en detrimento del cacao, cuya presencia dejó huellas toponímicas en la premontaña (Domínguez y Acosta, 2012).

A fines del siglo XVIII, se incorpora el tabaco como un cultivo importante que se desarrolló en sitios en la parte media de la cuenca Zaza. Este cultivo realizado por las propias familias y obreros libres, precisó desde sus inicios de un cercado protector contra la invasión del ganado suelto en las propiedades, así como prácticas culturales que hoy se mantienen, según (Pérez de La Riva (1975a) en Domínguez y Acosta, (2012)), el tabaco creó un paisaje de frontera: pequeños parches dentro del bosque. En las áreas montañosas, donde no era posible el desarrollo de la ganadería, la actividad forestal avanzó y mediante la tala selectiva, se provocó el empobrecimiento de los bosques en todo lugar donde era accesible desarrollar esta actividad. Los manglares fueron explotados para la fabricación de sustancias colorantes y de carbón, así como la extracción de tanino (Hernández et *al.*, 2012); (González et *al.*, 1999).

En el siglo XIX continuó el crecimiento de la producción agrícola cañera que estuvo acompañado por tres períodos de guerra, en su segunda mitad (1868-1878, 1879-1880, 1895-1898), por la liberación de Cuba del coloniaje español. La falta de capitales para modernizar la industria azucarera, hace que muchos ingenios arruinados por la guerra se conviertan en “colonias”, y surge el “colono” y termina así la tradicional triple función del propietario -cultivar-fabricar-vender- el azúcar. El

colonato es impulsado también por la abolición de la esclavitud, que mueve importantes recursos humanos y financieros (Domínguez y Acosta, 2012).

Con el inicio del siglo XX comienza un acelerado desarrollo de la agricultura, con la intensificación del latifundismo de la oligarquía financiera norteamericana, construyendo grandes y modernas fábricas de azúcar, **Figura 11**, en un contexto de fuerte inmigración y nuevas inversiones, como el ferrocarril central, inaugurado en 1902. El fomento de vegas de tabaco en las márgenes de los ríos Zaza, Cayajaná, Tayabacoa, Tuinucú, Taguasco y Yayabo se fortaleció en especial desde el 1900, con la inmigración canaria, lo que provocó una intensa desmembración en pequeñas fincas de los latifundios ganaderos del centro –por la presión de la demanda de tabaco (Domínguez y Acosta, 2012).

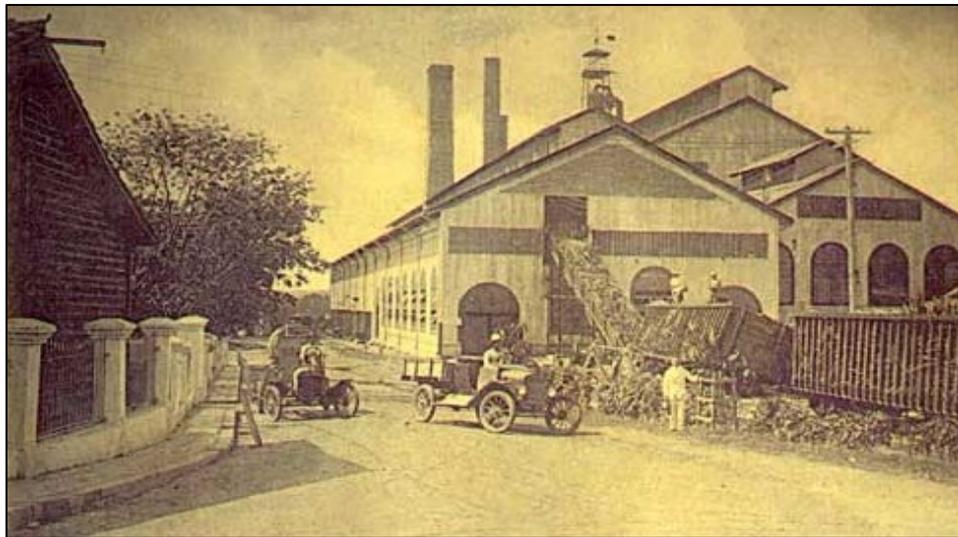


Figura 11. Ingenio Azucarero Tuinucú, perteneciente a la Tuinucú Sugar Company (1903-1951).

Los asentamientos poblacionales crecen, y utilizan a los ríos, como vía para la evacuación de los residuales líquidos; provocándose cambios en el caudal y contenido de sedimentos y materia orgánica de las aguas fluviales que generaron cambios en su funcionamiento. Algunas áreas en la cuenca Zaza conservaron restos de naturalidad debido a la poca accesibilidad o la baja productividad de los suelos, como es el caso de las sabanas. La industria de materiales de la construcción, creó potencialidades de uso desde la primera mitad del siglo XX, y es el principal impacto sobre los remanentes de la diversidad natural original de la cuenca hidrográfica del río Zaza (Hernández et *al.*, 2012); (González et *al.*, 1999).

Independientemente que el triunfo de la revolución cubana de 1959, marcó un cambio radical en las concepciones acerca de la relación Hombre - Naturaleza, las actividades humanas sobre los sistemas naturales (particularmente en los sectores agropecuario, hidráulico y minero), debieron

intensificarse bruscamente (González 2007), para superar las condiciones de subdesarrollo en que se encontraba el país. En la región central de Cuba y en particular las provincias de Sancti Spíritus y Villa Clara, su gestión ocurría bajo el paradigma de agricultura intensiva - industrial, tipo “Revolución Verde”.

A partir de las décadas posteriores a 1960, ocurrieron grandes cambios en todos los aspectos de la vida social, económica y ambiental, operados en las direcciones siguientes (González, 2007):

- reorganización agropecuaria, con el surgimiento de grandes planes agrícolas y ganaderos;
- desarrollo hidroeconómico, **Figura 12**, con un gigantesco crecimiento en la construcción de embalses y sistemas de riego y drenaje; y
- el crecimiento urbano - industrial y de las vías de comunicación.



Figura 12. Embalse Zaza, provincia Sancti Spíritus.

Resulta evidente, según (González, 2007), que la dinámica de estas transformaciones, unido al insuficiente conocimiento de las propiedades de los sistemas ambientales que sostienen la producción agropecuaria, no permitieron siempre establecer regímenes de manejo, que garantizaran detener la prolongada degradación en muchos de los geosistemas y acometer su necesaria rehabilitación. Desde inicios de los años 90, comienza el Período Especial Cubano, -con el desvanecimiento del sistema socialista en la Unión Soviética y Europa del Este- se genera una transformación hacia una agricultura de bajos insumos, más auto dependiente y orientada al aprovechamiento de los recursos locales.

Las unidades con valor natural actual en la cuenca hidrográfica del río Zaza, son parches remanentes que cumplían funciones de conectadores dentro de matrices reservorios y se han convertido en reservorios biogeográficos con función principal de emisión de Energía, Materia e Información (E.M.I) (González et *al.*, 1999).

3.2. Caracterización del subsistema natural

3.2.1. Geología y tectónica

El componente geológico constituye uno de los elementos principales del medio ambiente, ya que las formaciones geológicas en su disposición vertical y horizontal y la tectónica ejercen un determinado control en la formación del relieve y el paisaje, así como en la presencia de recursos

minerales y en el desarrollo de procesos físico, químico, biológico y geológico/tectónico que bajo circunstancias naturales o antrópicas pueden desencadenar eventos peligrosos con un nivel de riesgo implícito (González, 2007).

En Cuba se reconocen dos niveles estructurales principales: el substrato plegado y el neoa autóctono. El substrato plegado está formado por distintos tipos de terrenos, que constituyen fragmentos de las placas Norteamericana, Caribe y probablemente, del Pacífico. Estos terrenos son tanto de naturaleza continental como oceánica. El origen y evolución de estos componentes del substrato plegado tuvo lugar fuera de los límites del territorio cubano actual; representando territorios paleogeográficos diversos (placas tectónicas), tanto del Caribe occidental como del Pacífico, hasta su acreción en el borde meridional de la placa Norteamericana entre el Cretácico y finales del Eoceno. (Iturralde-Vinent, 1998, 2012).

El nivel neoa autóctono está representado, según Iturralde-Vinent (1998), por las rocas y estructuras originadas a partir del Eoceno Superior, que se desarrollaron básicamente en el mismo lugar que hoy ocupa el territorio de Cuba, ya formando parte del margen pasivo meridional de la placa de Norteamérica. Por tanto, el substrato plegado nos muestra información geológica de la formación y evolución del Caribe, en tanto que, el nivel estructural neoa autóctono brinda la información para comprender la historia de la evolución y consolidación del archipiélago cubano actual.

Estructura geológica y tectónica

La cuenca hidrográfica del río Zaza se modeló sobre estas dos estructuras principales, **Figura 13**, que conforman la complejidad geológica característica de Cuba central. En la cuenca están presentes las diferentes unidades geológicas (corteza continental y oceánica) y bloques distintamente elevados, los cuales se caracterizan a continuación:

El nivel estructural del substrato plegado: Ubicado en el norte, centro y centro-sur de la cuenca Zaza, en él se entremezclan las secuencias de las unidades geológicas de naturaleza oceánicas de la asociación ofiolítica del cinturón septentrional, el arco volcánico cretácico y las secuencias de terreno Placetas. Estas secuencias aparecen en forma de bandas alargadas, de anchura variable, más o menos paralelas entre sí y que se extienden siguiendo el rumbo general de la Isla de Cuba. Al sur está situada la unidad geológica terreno Escambray (Montañas de Guamuhaya) de origen continental y oceánico mezclados y metamorfizados. Todas estas unidades geológicas a su vez yacen alóctonas sobre el substrato plegado de tipo continental de Norteamérica ubicado hacia el límite septentrional en Cuba central, el cual está constituido por las unidades tectonoestratigráficas (U.T.E) Camajuaní, Remedios y Cayo Coco (Iturralde-Vinent, 2012).

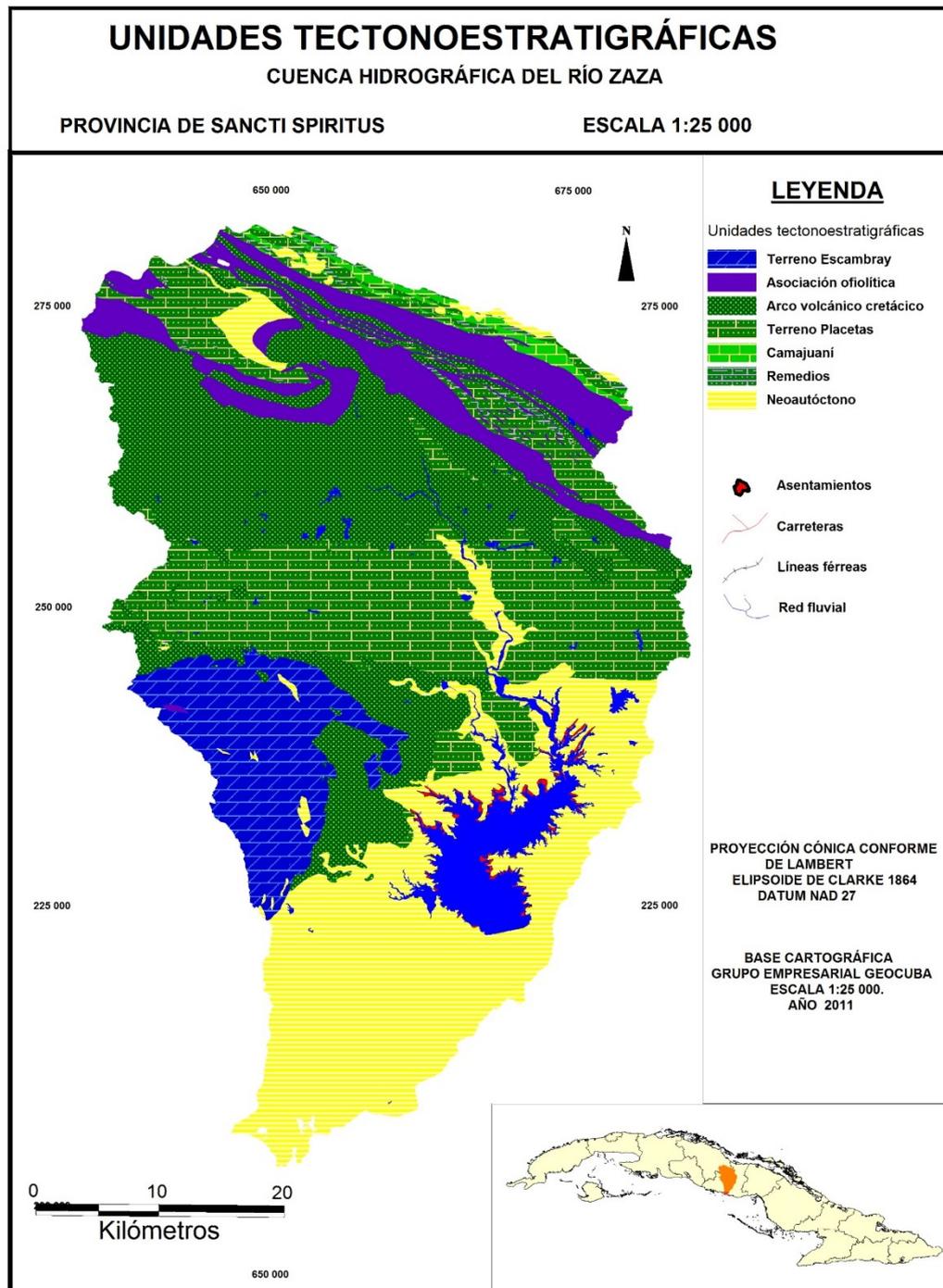


Figura 13. Estructura geológica y tectónica en la cuenca hidrográfica del río Zaza.

Dentro de esta superposición de estructuras del substrato plegado cubano, se destaca la asociación ofiolítica, que está formada por diversas litologías de la antigua corteza oceánica. Ellas tienen distintas maneras de presentarse en superficie: como fajas estrechas muy deformadas asociadas a zonas de fallas, o bien como mantos tectónicos de diversa potencia. Dentro de las ofiolitas se destacan las diabasas tipo dique de la denominada Formación Zurrupandilla, así como los gabros olivínicos,

troctolitas, gabros anfibolizados (a veces bandeados), cuarzo-dioritas, tonalitas, plagiogranitos y más raramente, dioritas, ultramafitas serpentinizadas hasta serpentinitas muy foliadas (en ocasiones con bloques incluidos de diversas partes de la asociación ofiolítica y de otros complejos rocosos) y las cortezas de intemperismo lateríticas sobre las ultrabasitas.

Las ofiolitas descansan sobre la faja deformada de las unidades tectonoestratigráficas Camajuaní y Remedios y están mezcladas con terreno Placetas, y se cubren por unidades del arco volcánico (Iturralde-Vinent, 1998). Derivado de esa complejidad, el sector septentrional de la cuenca hidrográfica del río Zaza, perteneciente a los municipios Yaguajay, Cabaiguán y Taguasco, presenta condiciones ambientales distintivas que se reflejan en el mosaico de relieve, suelos y cobertura vegetal que lo identifica.

Hacia el centro de la cuenca hidrográfica del río Zaza se localizan dos unidades tectónicas principales: el arco volcánico cretácico y terreno Placetas, las cuales aparecen en los municipios Fomento, Cabaiguán, Taguasco y Sancti Spiritus.

El arco volcánico está representado principalmente por las formaciones Mataguá y Cabaiguán; otras formaciones presentes son: Provincial, La Rana, Hilario, Dagamal, Jarao y Carlota (Kantchev et al. 1978). Como componentes intrusivos se presentan cuerpos de granodioritas y diques de basalto y basalto-andesita; estos diques aparecen dentro de algunas de estas formaciones. A continuación, se describe la composición principal de algunas de ellas:

Formación Mataguá (Wassall en Brönnimann y Pardo, 1954), tiene una composición vulcanógena y vulcanógeno-sedimentaria. Basaltos, andesito basaltos y andesitas, caracterizados por sus texturas porfíricas, con fenocristales de plagioclasas y piroxenos (lavas y lavobrechas); tobas de composición básica-media de granulometría variable, con predominio de fragmentos líticos y cristaloclastos. También participan tufitas, calizas, areniscas, silicitas y limolitas. Se han reportado lavas ácidas en cantidades insignificantes. Su edad es Cretácico Inferior (Aptiano-Albiano).

Formación Cabaiguán (Hatten et al., 1958), está formada por Tobas cristalinas, vítreas, líticas y combinaciones entre ellas, de composición andesítica y dacítica; areniscas y limolitas, rocas tobáceas y tufitas. Subordinadamente andesitas y dacitas. Están presentes cuerpos subvolcánicos de diabasas y gabro diabasa. Su edad es Cretácico Inferior (Albiano) - Cretácico Superior (Cenomaniano).

Formación Provincial (Thiadens, 1937a), está formada por Calizas microcristalinas con intercalaciones de margas, calizas pseudoolíticas, conglomerados calcáreos con fragmentos de rudistas, corales, areniscas, tobas y tufitas. Tienen edad Cretácico Superior (Cenomaniano).

Formación La Rana (Hatten et al., 1958), está compuesta Lavas y lavobrechas aglomeráticas de composición andesítica y andesítico-basáltica y tobas. Tiene edad Cretácico Superior (Santoniano) por su posición estratigráfica.

Formación Hilario (H. Wassall y P. Truitt en: P. Brönnimann y G. Pardo, 1954), está compuesta por principalmente por tobas zeolitizadas y en menor proporción por margas, calizas y areniscas. Las tobas son de color verde claro a gris-verdoso (frescas) y crema beige a carmelita (intemperizadas). Forman estratos con espesores de 2-3 cm a 1-5 m. Por su granulometría son psamíticas y limopsamíticas; las variedades pelíticas y psefíticas tienen poco desarrollo. Las tobas vitreas poseen la mayor distribución y están muy zeolitizadas, superando a veces las zeolitas el 70 % de la roca. El cemento de las tobas es predominantemente de contacto y en la mayoría de los casos está zeolitizado. Las margas son de color gris-verdoso, de estructura masiva. Las calizas forman capas hasta de 20 cm, son de color gris claro o gris verdoso. Las areniscas son beige a carmelita, formando capas de 10-30 cm, presentando en ocasiones jeroglifos en la base de las mismas. Tiene edad Cretácico Superior (Campaniano).

Formación Dagamal (Hatten et al., 1958), se caracteriza por Tobas, lavas y lavobrechas dacíticas y riódacíticas, subordinadamente andesíticas, y calizas. Las tobas que componen el mayor volumen de la unidad tienen textura cristalina, cristalovítrea y cristalolíticas con granulometría psammítica y psefítica, estando frecuentemente soldadas. Tiene edad Cretácico Superior (Campaniano).

Formación Jarao (Kantchev et al., 1978), está constituida por Tobas psamíticas y cineríticas, coladas de lavas, calizas, areniscas, tufitas y conglomerados. Tiene edad Cretácico Superior (Campaniano) - Cretácico Superior (Maastrichtiano).

Formación Carlota (Bandt, 1958), está constituida por Calizas biodetríticas y biohémicas, masivas, con fragmentos de rudistas, algas, pelícipedos y foraminíferos orbitoidales. Tiene edad Cretácico Superior (Maastrichtiano Superior)

Terreno Placetas (cuenca protocaribeña) pertenece a la cuenca antepaís de Cuba central del substrato plegado y aparecen sus rocas hacia el centro de la cuenca hidrográfica del río Zaza en ella pueden identificarse las formaciones Fomento, Isabel, Taguasco, Zaza, Vega, Vega Alta, Siguaney, y Arrollo Blanco. Por su composición son carbonatado-terrágenas y terrígenas (siliciclásticas),

llegando a existir olistrostomas, rocas típicas de medios de sedimentación superpuestos a estructuras en plegamiento. Algunas de estas formaciones se localizan fuera de la cuenca Zaza, ocupando una posición frontal sobre las estructuras más antiguas.

La cuenca antepaís en la región central de Cuba, según Iturralde-Vinent, (1998), está presente sobre el borde meridional de Las Bahamas (Cayo Coco, Remedios y Camajuaní) y en terreno Placetas, y registran la colisión/obducción de las unidades alóctonas oceánicas sobre el margen continental de la placa Norteamericana, hecho extremadamente importante para comprender la tectónica del Caribe. Los sedimentos de la cuenca antepaís se encuentran coronando los estratos Maastrichtienses en las unidades tectonoestratigráficas de Cayo Coco, Remedios, Camajuaní y terreno Placetas, mientras los depósitos del límite Cretácico-Paleógeno (K/Pg) están sobre todos los terrenos como evento global. Como estructura, la cuenca antepaís, recibe el nombre de cuenca norte de Cuba (Iturralde-Vinent, 1998) y tiene una extensión mucho mayor hacia el este, desde la costa y hasta gran parte de la actual provincia de Ciego de Ávila. A continuación, se describe la composición principal de algunas de estas formaciones en la cuenca hidrográfica del río Zaza:

Formación Fomento (P. Truitt y G. Pardo, 1953b), está constituida por margas calcáreas compactas de colores rosado, rojizo, gris y hasta gris verdoso. En ocasiones pasan a calizas arcillosas macrogranulares claramente estratificadas. Entre las margas se intercalan tobas blanquecinas a verdosas de grano pequeño a medio, arcillosas y zeolitizadas. Tiene edad Cretácico Superior (Maastrichtiano) – Paleoceno. Han sido ubicadas excelentes secciones del límite K-Pg, ricas en materiales de eyecta, con abundante micro y macroesférulas, cuarzo de impacto y condrulos terrestres (Goto et al., 2008, 2010; Arz et al., 2012 y Melendez et al., (2013). Formación Isabel (P. Truitt y G. Pardo, 1953b.), constituida por Calizas biodetríticas, calizas biógenas, gravelitas, areniscas calcáreas y brechaconglomerado basal. De edad Cretácico Superior (Maestrichtiano Superior).

Formación Olistostroma Taguasco (P. Truitt en: P. Brönnimann y G. Pardo, 1954), secuencia caótica policomponente. Su base está constituida por conglomerados y conglobrechas polimícticas. La parte superior está compuesta por una alternancia flyschoide de areniscas, limolitas, margas y calizas, con intercalaciones de conglomerados, con olistolitos de rocas cretácicas (andesitas, granitoides, silicitas, calizas, areniscas y margas). Los olistolitos se encuentran sumergidos en una matriz bien estratificada en ocasiones, en capas finas, de gravelitas, areniscas, margas, limolitas, arcillas y, más raramente, conglomerados. De edad Paleoceno Superior - Eoceno Inferior (parte baja).

Formación Olistrostomas Vega Alta (L. Dodekova y V. Zlatarski, en: I. Kantchev et al., 1978), en esta unidad predomina una secuencia caótica policomponente, de matriz arcillosa y arcilloso-arenosa, que incluye bloques de diferentes dimensiones, hasta olistolitos de calizas, areniscas, brechas, silicitas, serpentinitas y rocas volcánicas y metamórficas. Se intercalan paquetes de rocas siliciclásticas, como conglomerados, areniscas, limolitas y lutitas. De edad Paleoceno-Eoceno Inferior.

Formación Vega (G. Pardo, en: P. Brönnimann y G. Pardo, 1954), constituida por brechas carbonáticas, constituida por fragmentos de calizas, dolomitas y en menor cantidad pedernales, y más raramente gabros y serpentinitas; calizas; brechas polimícticas; conglomerados; areniscas polimícticas; limolitas polimícticas; margas y arcillas. Las calizas son detríticas, nodular-detríticas, arenosas, micríticas, micríticas de foraminíferos con matriz micrítica y las arcillas transicionan a margas. Las brechas carbonáticas tiene poco cemento y transicionan vertical y horizontalmente a las calizas detríticas. Las brechas polimícticas están constituidas principalmente por fragmentos de calizas, silicitas, areniscas, rocas volcánicas, gabroides, serpentinitas, anfíbolitas y granodioritas. Su cemento está constituido por areniscas de granulometría diversa con la misma composición. Los conglomerados y brechaconglomerados están en general constituidos por fragmentos de rocas volcánicas, gabroides, granitoides y calizas. De edad Paleoceno- Eoceno Medio.

Formación Siguaney (P. Brönnimann y R. J. Macaulay, 1955), constituida por la alternación de brechas calcáreas, calizas detríticas, arcillosas, biodetríticas con foraminíferos, margas, areniscas polimícticas fuertemente calcáreas, arcillas y conglomerados polimícticos. Se encuentra bien estratificada y plegada. De edad Eoceno Inferior.

Formación Zaza o Bijabo (A. A. Thiadens, 1937a), Secuencia flyschoide turbidítica constituida por sedimentos siliciclásticos, areniscas, gravelitas, limolitas, calizas detríticas, conglomerados, calizas arenosas, margas y arcillas. Tiene edad Eoceno Inferior parte alta- Medio parte baja.

Formación Arroyo Blanco (K. Bandt, 1958), constituida por limolitas, margas, areniscas calcáreas, conglomerados polimícticos, areniscas polimícticas, calizas biodetríticas, calizas arenosas, calizas biógenas, brechaconglomerado polimíctico y margas arenosas. De edad Eoceno Medio parte alta- Eoceno Superior.

La parte sur de la cuenca hidrográfica del río Zaza está compartida por dos estructuras geológicas bien diferenciadas, terreno Escambray (Montañas de Sancti Spíritus en su parte aguas occidental, en

Montañas de Guamuha) perteneciente al nivel estructural del substrato plegado de origen continental y oceánico mezclado y el nivel estructural neoa autóctono.

Terreno Escambray¹ se presenta, según Iturralde-Vinent, (1998), como una ventana tectónica por debajo de las unidades del arco volcánico y su basamento oceánico. Tratándose de un terreno multideformado, con una compleja estructura interna de mantos de corrimientos y una deformación cupuliforme tardía. El Escambray (Montañas de Guamuha) es un macizo con metamorfismo zonado desde alta presión (esquistos azules y eclogitas) hasta presiones moderadas a bajas (esquistos verdes) ((Somin y Millán, 1981) en Iturralde-Vinent, 1998), donde se encuentran imbricados mantos de rocas metasedimentarias y metamagmáticas y sus derivados. Aflora a manera de dos ventanas tectónicas (Montañas de Trinidad y Montañas de Sancti Spiritus) entre los complejos del arco y su basamento oceánico, con origen en las condiciones de un prisma de acreción, probablemente vinculado a una zona de subducción de sur a norte ((Iturralde-Vinent, 1994a, b) en Iturralde-Vinent, 1998). En la actualidad es visto como parte de Caribeana, una prolongación del bloque Yucatán, que fue sobrecorrida por el Arco Volcánico Cretácico de sur a norte, García-Casco et *al.*, (2008).

En terreno Escambray se reconocen dos tipos principales de unidades litológicas, a saber: las sucesiones metasedimentarias y vulcanógeno-sedimentarias, y la melange serpentinitica y relictos de cortezas oceánicas. Las primeras son correlacionables con las secuencias mesozoicas pertenecientes al terreno Guaniguanico, en tanto que la melange y las rocas oceánicas representan una antigua zona de subducción y fragmentos de corteza. Por ello, García-Casco et *al.*, (2008), ha caracterizado a Escambray como un terreno “mezclado” (Iturralde-Vinent, 2012). Las formaciones geológicas presentes son: Grupo San Juan, Loma La Gloria, La Sabina, Cobrito, Los Cedros, La Chispa, Herradura, Arroyo Cangre, Boquerones y diversos cuerpos de eclogitas, cuarcitas, metavulcanitas básicas y otras rocas metamórficas.

Las Secciones metasedimentarias, son las más comunes en el Escambray ((Millán y Somin, 1981) en Iturralde-Vinent, (1998)). En estas secciones la base del corte son probablemente rocas metasiliciclásticas del Jurásico Inferior-Medio(?), cubiertas por mármoles y filitas interstratificadas del Oxfordiense, que ocasionalmente presentan horizontes intercalados de rocas verdes

¹González Ramírez, I., (2007): *Considera que, aunque esta estructura es denominada popularmente Escambray, tiene un error toponímico característico de la región central de Cuba, ya que Escambray es un sistema de colinas de poca extensión al sur de la ciudad de Santa Clara que no tienen relación con esta estructura. El nombre correcto de esta región remitiéndonos a los aborígenes es Guamuha (Montañas de Guamuha). Este error se originó en los años 50-60 del siglo XX. Es correcto en estos casos, según las regulaciones establecidas en Cuba, utilizar ambos términos cuando existe una razón histórica que no puede soslayarse.*

(metavolcánicas básicas). Éstas se cubren por mármoles, tanto masivos (tipo San Juan) como bien estratificados, así como secciones metasiliclásticas (Iturralde-Vinent, 1998).

En las secciones metavulcanógenas, según Iturralde-Vinent, (1998), aparecen esquistos verdes de carácter metavulcanógeno básico (tobas, lavas y aglomerados metamorfizados), con capas delgadas intercaladas de mármol gris. En ocasiones se observan secciones con estratificación rítmica y granulometría gradacional normal de gruesa a fina, y aisladas capas de metasilicitas. Se datan del Cretácico indiferenciado ((Millán y Somin, 1981, 1985a) en Iturralde-Vinent, (1998)). Las metaofiolitas aparecen como mantos tectónicos de ofiolitas, distintamente metamorfizadas. Se componen de serpentinitas asociadas a grandes cuerpos de anfibolitas, a veces granatíferas, bastante esquistosas, con intercalaciones de metasilicitas, cuyo protolito eran basitas oceánicas ((Millán y Somin, 1981, 1985a, b) en Iturralde-Vinent, (1998)).

Las rocas y estructuras del neoaútctono cubano se formaron, según Iturralde-Vinent, (1998), después de la consolidación del substrato plegado, a partir del Eoceno Superior hasta la actualidad. Durante éste lapso y hasta el presente, dominan los movimientos verticales oscilatorios, que dieron lugar a la formación de una estructura de bloques distintamente elevados; aunque se presentan algunas fallas siniestras de rumbo NE y E-W activas.

El neoaútctono en la cuenca hidrográfica del río Zaza se comporta como un graben al comparar las tendencias de los movimientos verticales de las estructuras cubanas en el periodo post-Eoceno. Esta estructura se extiende hasta Ciego de Ávila y Camagüey. Está formada por rocas sedimentarias carbonatadas (Formaciones Jatibonico, Paso Real, Güines) y terrígenas (Formaciones Lagunitas, Guevara, Villarroja), de edad Eoceno superior a Cuaternario, además de los sedimentos recientes de tipo fluvial y palustre.

Formación Jatibonico (H. Wassall y P. Brönnimann en: P. Brönnimann, 1955), constituida por margas, areniscas polimícticas, conglomerados polimícticos, calizas areno- detríticas arcillosas y calizas coralinas. Las margas constituyen el elemento litológico principal y entre ellas se intercalan como paquetes o lentes las demás variedades litológicas. De edad Oligoceno Superior.

Formación Lagunitas (E. Popov, en Kantchev et al., 1978), constituidas por la alternación de areniscas, conglomerados polimícticos y limolitas de granulometría diversa, estando el material clástico bien redondeado y compuesto de cuarzo, metamórficas, calizas y vulcanitas, en matriz arenítico-arcillosa. Intercaladas en la secuencia aparecen esmectitas, ocasionalmente limoso-arenáceas y calizas biodetríticas. De edad Oligoceno Superior- Mioceno Inferior.

Formación Paso Real (P. J. Bermúdez, 1950), son característicos en ella los cambios litológicos abruptos tanto vertical como lateralmente. Predominan las alternancias de calizas y margas. Las calizas son arcillosas, biodetríticas arcillosas y más subordinadamente calizas biohémicas, calizas dolomitizadas, dolomitas y calcarenitas. Las calizas arcillosas por desagregación originan pseudoconglomerados calcáreos de matriz margoso- arenácea. En general son masivas. Las margas, al igual que las calizas son fosilíferas. Aparecen intercalaciones de areniscas y limolitas calcáreas y arcillas (principalmente esmectita) que contienen en algunos horizontes pirita, yeso, halita y lignito. En el área tipo se observa en la base un conglomerado polimíctico de matriz margosa, fosilífera. La estratificación está enmarcada por los cambios litológicos y es frecuentemente lenticular. Colores crema, blancuzco y grisáceo en los horizontes carbonáticos y grisáceo y verdoso en los terrígenos. De edad Oligoceno Superior- Mioceno Superior basal.

Formación Güines (A. Humboldt, 1826a, b), constituidas por calizas biodetríticas de grano fino a medio, fosilíferas, calizas biohémicas, calizas dolomíticas, dolomitas, calizas micríticas sacaroidales y lentes ocasionales de margas calcáreas y calcarenitas. La dolomitización es secundaria. Son por lo general masivas, más raramente estratificadas. Coloración blanca, amarillenta, crema o gris. De edad Mioceno Inferior parte alta- Mioceno Superior parte basal.

Formación Arabos (Iturralde-Vinent, 1966b), constituida por Arcillas illito-montmorilloníticas calcáreas, abigarradas, con gránulos de cuarzo, concreciones calcáreas y Ostrea, de colores crema, amarillento y gris verdoso; calizas arcillosas, calizas limosas, margas, con raras intercalaciones de areniscas arcilloso- limosas amarillo- rojizas que pasan a limolitas arcillosas y calizas dolomitizadas. Las arcillas contienen a veces gravas polimícticas muy finas y gránulos de pirita. En zonas de Cunagua, provincia de Ciego de Ávila, contienen intercalaciones de yesos. De edad Mioceno Inferior parte alta- Mioceno Medio parte baja.

Formación Guevara (I. P. Kartashov et al., 1976), constituida por arcillas plásticas (montmorilloníticas y montmorillonito-caoliníticas), arenas silíceas, gravas finas, fragmentos de corazas ferríticas (hardpan). Presenta alto contenido de pisolitas y nódulos ferríticos. La estratificación es indefinida, paralela. Su coloración es variable, abigarrada. Por posición estratigráfica se le ha asignado una edad Pleistoceno Inferior- Medio.

Formación Villarroja (I. P. Kartashov et al., 1976a), constituida por arcillas arenosas y areno- limosas, arenas arcillosas y arenas cuarzosas de distintas granulometrías, pigmentadas por hidróxidos de hierro (goethita). Contiene finos lentes y capas de grava de tamaño variado, frecuentemente con buen redondeamiento y selección, constituidos por cuarzo y más

subordinadamente por fragmentos de *hardpan*, así como concreciones ferruginosas. Las arcillas son principalmente esmectita y caolinita. La estratificación es poco discernible, localmente lenticular. Tonalidades variables, de rojo amarillento a rojo violáceo. De edad según su posición estratigráfica se ha considerado como Pleistoceno Superior.

Los límites entre estas unidades geológicas principales: el substrato plegado de tipo continental, las unidades tectonoestratigráficas Camajuaní y Remedios, las unidades geológicas de naturaleza oceánicas de la asociación ofiolítica del cinturón septentrional, el arco volcánico cretácico, terreno Placetas y terreno Escambray de naturaleza continental y oceánica mezclados y la estructura geológica neoautóctona, no son precisos, por la complejidad geológica del área y las imbricaciones y los sobrecorrimientos entre las diversas unidades geológicas.

Complejos litológicos

Desde el punto de vista litológico, la geología de la cuenca se caracteriza por el predominio del

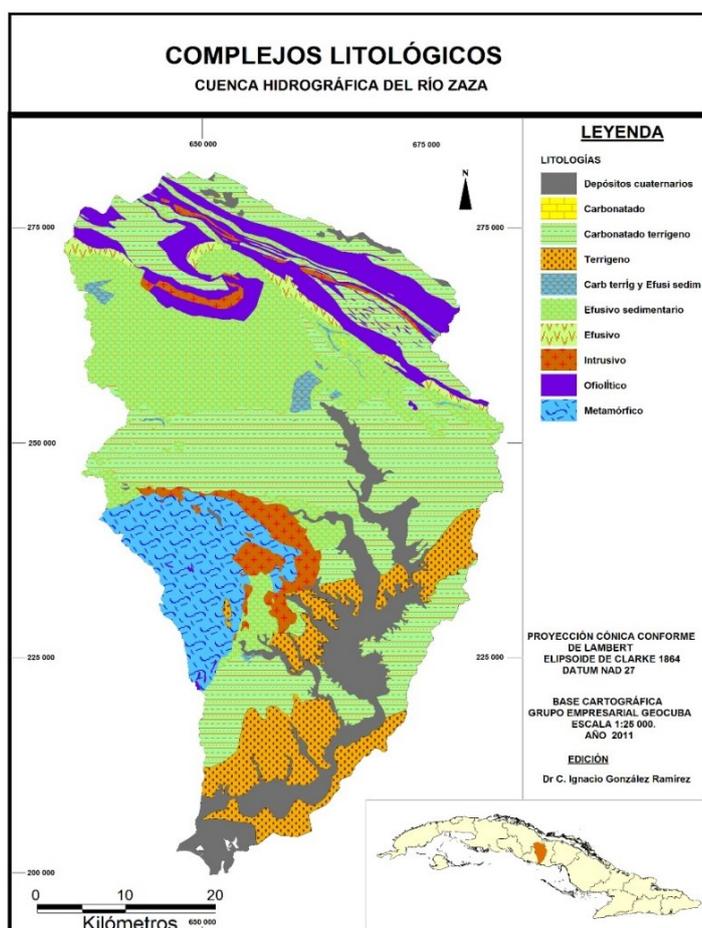


Figura 14. Complejos litológicos en la cuenca del río Zaza.

complejo carbonatado-terrígeno, **Figura 14**, que ocupa un 33% del total de la superficie. El efusivo sedimentario es el segundo más abundante, seguido por los depósitos cuaternarios, según CITMA, 2013.

El complejo carbonatado-terrígeno tiene tres zonas principales de distribución y está asociado fundamentalmente a terreno Placetas. Al norte de la cuenca Zaza se entremezcla con las secuencias ofiolíticas del basamento plegado y efusivo-sedimentarias del arco volcánico; hacia el centro tiene una amplia distribución, formando una franja que atraviesa la cuenca de este a oeste, solo cortado por los sedimentos terrígenos cuaternarios fluviales del río Zaza (además aflora en dos pequeñas zonas un poco más al sur de la franja

mencionada). Al sur ocupa otra franja en la porción septentrional de los municipios de La Sierpe y Sancti Spíritus.

El complejo efusivo-sedimentario se asocia a la estructura geológica del arco volcánico cretácico, teniendo su mayor distribución en la parte media y alta de la cuenca hidrográfica del río Zaza y el resto bordea la unidad geológica terreno Escambray hasta limitar al sur con el complejo carbonatado-terrágeno.

El complejo terrígeno está formado predominantemente por sedimentos jóvenes cuaternarios del neoautóctono. Una parte de ellos son aluviales y coluviales asociados a los principales cauces fluviales. El resto ocupa la parte baja de la cuenca, formando el delta del río Zaza y otras áreas de origen palustre.

3.2.2. Relieve

El relieve constituye el substrato de toda actividad terrestre y ofrece una visión integrada del territorio y su funcionamiento. Influye y modifica la distribución de los suelos, la hidrología de laderas, las características de los hábitats y la distribución y abundancia de especies. También recibe la influencia modificante de los demás factores que conforman el medio natural (González, 2007).

De forma general, la altitud de la cuenca Zaza, varía entre 0 y 785 m. El punto más bajo se halla en la desembocadura del río Zaza y el más alto, en el estribo de Pico Farolito. La altitud promedio es de 116 m y la mediana de 113 m. Tiene dos valores modales alrededor de los 100 m y los 175 m. Después de los 300 m ocurre un cambio significativo en el comportamiento de las pendientes, asociado al comienzo de la premontaña y las montañas pequeñas. Su variabilidad está dada por una desviación estándar de 77,5 m y un coeficiente de variación de 0,67; por lo que tiene una alta variabilidad en toda su superficie, de ahí la gran diversidad de unidades de relieve que se definen. Alcanza un volumen de masa terrestre sobre el nivel medio del mar de 282 902 300 m³, lo que está dado por la existencia de montañas en parte de su extensión (González, 2007).

Como las principales formas del relieve en la cuenca Zaza, **Figura 15**, aparecen las descritas según la clasificación (González, 2007); (CITMA, 2013) en: llanuras, alturas y montañas pequeñas.

Llanuras

Por su altitud sobre el nivel del mar, las llanuras se dividen en tres tipos principales: llanuras bajas, ubicadas por debajo de 50 m; medias, entre 50 y 120 m, y altas, por encima de los 120 m.

Las llanuras son las que definen los límites entre las partes baja, media y alta de la cuenca, adicionándose a la parte alta, la premontaña y las montañas pequeñas. Las alturas, por su distribución escasa y dispersa, no pueden ser utilizadas como criterios de diferenciación.

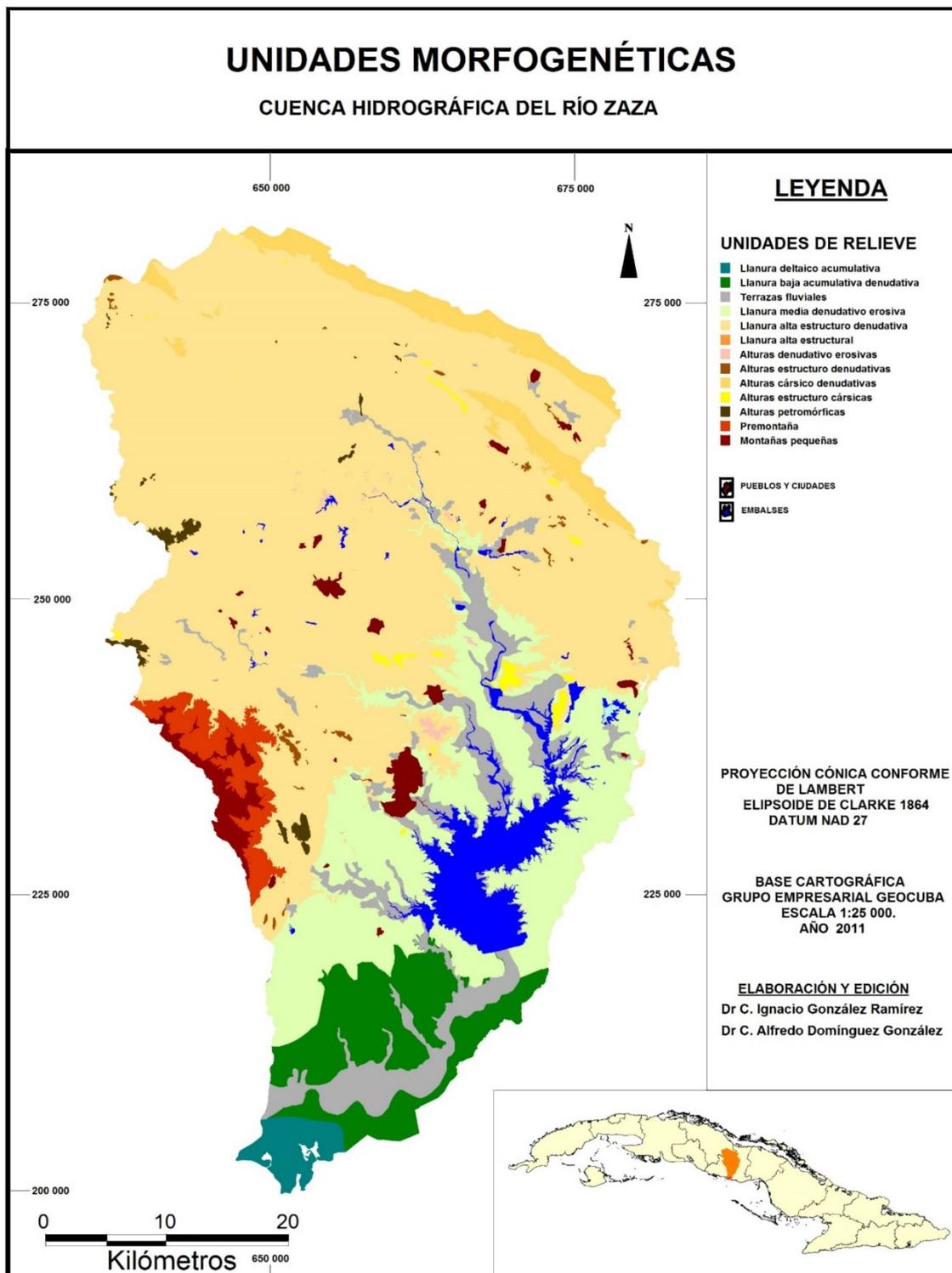


Figura 15. Unidades morfofenéticas en la cuenca hidrográfica del río Zaza. **Fuente:** CITMA, 2013.

Entre las llanuras bajas se destacan dos tipos genéticos:

- i. la llanura baja deltaica plana, formada por el delta del río Zaza, con abundancia de manglares, saladares y lagunas; allí el río mantiene un cauce principal marcado por camellones de arena en ambas márgenes y algunos cauces y esteros muy antropizados, sobre todo por el control del cauce que realiza el embalse Zaza. Es de tipo acumulativa, originada a partir de la deposición de los sedimentos fluviales en la desembocadura. Tiene una extensión superficial de 31,12 km².
- ii. la llanura baja fluvio-marina acumulativo-denudativa, poco inclinada, esculpida en las rocas de una secuencia marina regresiva sobre la cual la deposición de sedimentos aluviales y los procesos denudativos, completaron su morfología. Ocupa la parte más baja de la cuenca, desde el límite este hasta el oeste, al norte de la llanura deltaica; su parte meridional comienza en la Laguna del Viaducto hasta el poblado 7 de noviembre. Por el norte hasta la proximidad de los asentamientos Vanguardia Socialista, La Junta, San Andrés y San Ramón de Coralillo. Su altitud no sobrepasa los 50 m y tiene una extensión de 217,17 km². Además del cauce principal del río Zaza, está cortado por los afluentes Salado, Mayabuna, Guasimal, Yaguá, Mayabuna y Cayajaná en la margen derecha.

La llanura media del tipo denudativo-erosiva, medianamente ondulada; se define por el predominio de superficies denudativas formadas por la erosión laminar y la presencia de cauces fluviales, que en general han sido los principales factores de modelado del relieve. No sobrepasa los 120 m de altitud y forma una superficie continua que, a pesar de estar cortada por otras formas del relieve, expresa cierta continuidad y ubicación espacial. Está esculpida sobre rocas diversas del arco volcánico, de terreno Placetas y de la cobertura del neautóctono. Tiene una altitud media de 59 m, oscilando en el rango de 5 m a 120 m. Ocupa una superficie aproximada de 393,18 km².

En su parte más meridional limita con la llanura baja fluvio-marina acumulativo-denudativa, poco inclinada estando cortada por las terrazas fluviales. Se extiende también sublatitudinalmente, aunque su parte septentrional está constituida por una línea sinuosa extendida desde los asentamientos Taguasco, Siguaney y Zaza del Medio, subiendo por el río Zaza hasta cerca de la Sierra de Las Damas, y bajando a partir de allí hasta cerca del asentamiento Tuinucú, ciudad de Sancti Spíritus, entronque de Guasimal y San Pablo. Tiene su mayor extensión en la parte baja de la cuenca hidrográfica del río Zaza, donde está cortada por las terrazas fluviales asociadas a los valles de los ríos principales de la cuenca (Cayajana, Yayabo, Tuinucú, Zaza y Taguasco). En la parte alta de la cuenca Zaza se extiende más al norte, ocupando un escalón superior al de las terrazas fluviales.

Entre las llanuras altas se destacan las siguientes:

- i. La llanura alta denudativo-erosiva, ondulada que se caracteriza por conservar cierta continuidad espacial que la diferencia de la anterior y de otras estructuras. Se localiza hacia el centro y la parte alta de la cuenca, asociada mayormente al río Zaza, aunque en partes alcanza hasta el río Tuinucú. Morfológicamente ocupa un escalón superior respecto a las terrazas fluviales del río Zaza; en ella se distingue claramente la acción de los procesos exógenos de origen fluvial y está limitada en su parte alta por una línea sinuosa marcada por la acción denudativo-erosiva. Sobreyace a rocas del arco volcánico y de terreno Placetas y más escasamente, a rocas del complejo ofiolítico. Tiene una altitud media de 105 m, con altitud máxima de 200 m. Ocupa una superficie aproximada de 500 km² y sus límites aproximados son los siguientes:
 - en su parte meridional, con la llanura media denudativo-erosiva, medianamente ondulada.
 - en su parte septentrional tiene dos secciones, una a cada lado de las terrazas fluviales del río Zaza: la sección este se extiende desde Panchito Gómez Toro y Pedro Barba, hasta la cuenca alta del río Hacha. La sección oeste se extiende desde el embalse Tuinucú, base de Campismo Arroyo Lajas, Cabaiguán, Neiva, Tres Atejes, cuenca media del río Calabazas, hasta Potrerillo, donde se une con la sección este.
- ii. La llanura alta estructuro-denudativas fuertemente onduladas a colinosas, morfogenéticamente caracterizadas por el fuerte control estructural del relieve y las evidencias de procesos denudativos (las actuales superficies denudativas son jóvenes, pero conservan la herencia morfoestructural dejada por los procesos tectónicos del basamento plegado, pudiendo diferenciarse las diversas unidades geológicas: asociación ofiolítica, arco volcánico y terreno Placetas. Se extienden tanto al centro-oeste, como al norte de la cuenca Zaza:
 - En el primer caso, una llanura estructuro-denudativa bordea por el norte a la premontaña, extendiéndose aproximadamente entre la comunidad de Seboruco y la ciudad de Sancti Spíritus; en su extremo septentrional llega hasta las cercanías de Placetas, Perotte y Cabaiguán.
 - Al norte de la cuenca, este tipo de llanura aparece en dos sectores: la depresión graben de Jarahueca-Perea (ocupada por las cuencas superiores de los ríos Caunao, Jatibonico del norte y Jatibonico del Sur) y la llanura colinosa muy alta (alcanza hasta unos 270 m de altitud), que se extiende al norte de los municipios de Cabaiguán y Taguasco, con una fuerte diferenciación del relieve según la estructura tectónica sobre la que esté esculpida:

asociación ofiolítica arco volcánico, terreno Placetas y las zonas Camajuaní y Remedios. Esto explica por qué aquí la llanura está interrumpida por alturas aisladas, en grupos o en morfoalineamientos de dirección NW-SE, que siguen el plano morfoestructural general y que reflejan sucesivas etapas de aplanamiento en las que actuaba la erosión diferencial, simultáneamente con la actividad neotectónica.

Alturas

Por su altitud, las alturas en la cuenca se clasifican en: pequeñas (< 120 m), medianas (entre 120 y 250 m) y grandes (entre 250 y 400 m).

Por su génesis las alturas se clasifican, (González, 2007) en:

- i. Petromórficas, cuando están asociadas a rocas duras en áreas donde la erosión de las otras litologías ha dejado estas alturas como relieve residual; por lo general relacionadas a diques de diabasas y andesitas dentro de las rocas vulcanógeno-sedimentarias y a algunas escamas tectónicas ofiolíticas. Entre ellas están: Loma del Obispo, Loma El Fuerte, Cacahual de Pozas, Casa de Zinc y Poza Redonda.
- ii. Estructuro-denudativas, cuando se conservan los rasgos estructurales originales sobre los cuales se manifiestan las formas propias de la erosión laminar, en laderas que suaviza el relieve en relación a las morfologías adyacentes. Se relacionan principalmente a las rocas vulcanógeno-sedimentarias e intrusivas del arco volcánico y a las ofiolitas. Entre ellas se encuentran Loma La Mina, alturas cercanas a Las Tosas, Cerros de Los Pinos, Manacas Cantero, Bellavista y Melones, entre otras.
- iii. Estructuro-cársticas, sobre rocas calcáreas, con un modelado cárstico predominante, como es el caso de las alturas de Monte Oscuro, Zaza del Medio, Siguaney, Hornos de Cal, Sierra de Las Damas, Loma La Esperanza, Loma de Gabino, Caja de Agua, Seboruco, Cariblanca, Melones, Remate y Bramadero.
- iv. Cárstico-denudativas, cuando presentan formas cársticas evidentes, aunque sus laderas expresan la combinación de procesos denudativos que suavizan el relieve respecto a las morfoestructuras vecinas. Se formaron asociadas a las rocas del complejo carbonatado-terrágeno y se pueden identificar en el límite de la cuenca, al norte del poblado General Carrillo y al suroeste de Meneses, en Capestany y en otros sitios del municipio de Placetas.
- v. Denudativo-erosivas, en la forma de alturas pequeñas, muy diseccionadas, en las que se expresa claramente una fuerte erosión por barrancos, que define su morfología sinuosa. Se encuentran principalmente sobre rocas vulcanógeno-sedimentarias, en la zona comprendida

entre Sancti Spíritus y Zaza del Medio, así como en las proximidades del poblado de Potrerillo.

Las alturas pequeñas (principalmente) y las medianas según la clasificación aparecen asociadas a las unidades geológicas de naturaleza oceánicas de la asociación ofiolítica del cinturón septentrional, el arco volcánico cretácico y terreno Placetas diseminadas según su génesis, en la parte alta de la cuenca hidrográfica del río Zaza como ventanas tectónicas dentro del relieve de las llanuras medias y altas.

Las alturas medianas y grandes fundamentalmente aparecen en la premontaña de Montañas de Sancti Spíritus, con una altitud variable entre 160 y hasta de 400 m.s.n.m. La premontaña se caracteriza por estar formada sobre rocas diferentes a las montañas pequeñas a pesar de su origen metamórfico similar, en este caso son litologías donde aparecen esquistos verdes de un metamorfismo de baja intensidad con capas delgadas intercaladas de mármol gris y mantos tectónicos de ofiolitas, distintamente metamorfozadas y grandes cuerpos de anfibolitas, a veces granatíferas, bastante esquistosas, con intercalaciones de metasilicitas. Su promedio de altitud es de 290 m, la mediana de 285 m, con una desviación estándar de 58 m y el coeficiente de variación de 0,2, lo que para este tipo de relieve puede considerarse como bajo.

Montañas pequeñas

Las montañas pequeñas se localizan en el sector medio occidental de la cuenca (CITMA, 2013), pertenecen como unidad geológica a terreno Escambray (Montañas de Sancti Spíritus en Montañas de Guamuhaya) y tienen altitudes entre 400 y 785 m. Están formadas por rocas metamórficas con un metamorfismo zonal desde alta presión (esquistos azules y eclogitas) hasta presiones moderadas a bajas (esquistos verdes), aparecen imbricados mantos de rocas metasedimentarias y metamagmáticas y sus derivados. Todas estas secuencias formaron parte de la corteza oceánica y continental mezclada que constituye una ventana tectónica por debajo de las unidades del arco volcánico y su basamento oceánico, que se elevaron hasta emerger dentro de las secuencias del arco volcánico cubano. La presencia de diferentes bloques separados por pequeños valles tectónicos, le confiere una desviación estándar de 79 m a sus valores de altitud, pero mantiene un coeficiente de variación inferior a 0,16.

3.2.3. Suelos

En la cuenca hidrográfica del río Zaza encontramos, según González (2007), utilizando la Tercera Clasificación Genética de los Suelos de Cuba, **Figura 16**, los suelos del Agrupamiento Pardos, que

ocupan la mayor parte del sector central de la cuenca, desde Montañas de Sancti Spíritus hasta las Alturas del Nordeste, traspasando la cuenca de este a oeste. Sobre el complejo terrígeno-carbonatado predominan los suelos Pardos con diferenciación de carbonatos. Y sobre las rocas efusivo-sedimentarias los Pardos sin Carbonatos en las granodioritas y en los esquistos los Pardos grisáceos. En la parte alta de la cuenca, así como en las montañas pequeñas, se pueden localizar suelos Poco evolucionados del tipo Esquelético.

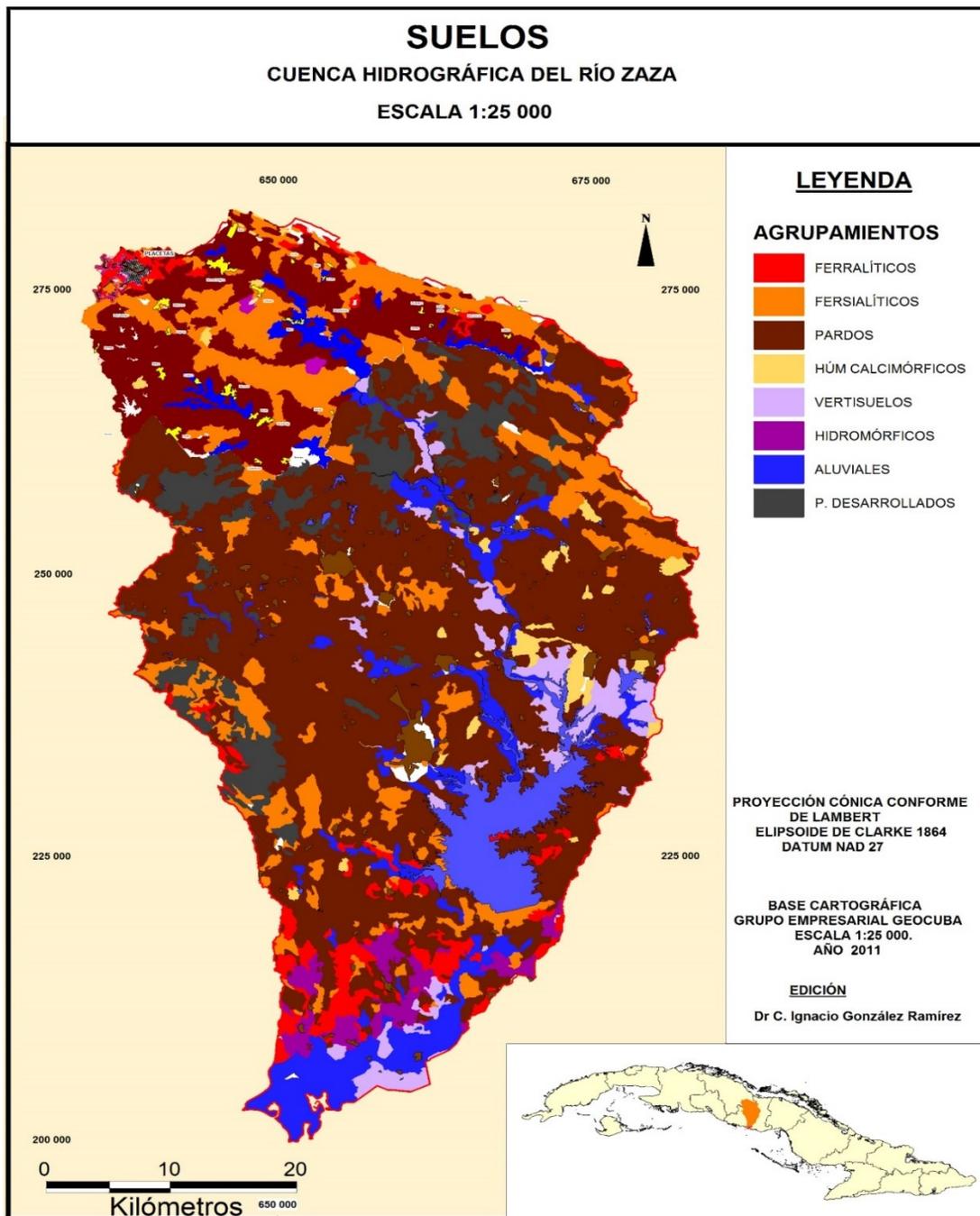


Figura 16. Suelos en la cuenca hidrográfica del río Zaza. *Fuente:* CITMA, 2013.

Los suelos Fersialíticos abundan en la región más septentrional de la cuenca del río Zaza (Alturas del Nordeste) y también en las montañas pequeñas de terreno Escambray (Montañas de Sancti Spíritus); en el primer caso son del tipo Fersialítico rojo pardusco ferromagnésico, formados sobre las ofiolitas, y en el segundo, Fersialíticos pardo rojizos, formados sobre esquistos, rocas intrusivas ácidas y medias, redepósitos de cortezas ferralíticas.

Los suelos Ferralíticos son más abundantes en la llanura baja fluvio-marina acumulativo-denudativa, como ocurre en Banao, Pojabo y San Andrés; también aparecen en algunos valles intramontanos en los que existen redepósitos de cortezas ferralíticas. Los suelos Aluviales se asocian a los ríos principales como: Zaza y Tuinucú y los Oscuros plásticos a la llanura baja deltaica plana, cerca de la costa.

La profundidad del suelo es una de sus principales limitantes. Los suelos muy profundos son escasos (CITMA, 2013), solamente abundan en la parte más baja de la cuenca, donde existen otras limitantes de drenaje, textura y toxicidad que imposibilitan la obtención de altos rendimientos. Los suelos predominantes son poco profundos², con algunas áreas de suelos medianamente profundos³. Este mosaico caracteriza a una parte de la cuenca baja, toda la cuenca media y parte de la cuenca alta.

En la cuenca alta y las pequeñas montañas, predominan los suelos muy poco profundos, que tienen fuertes limitaciones para la actividad agrícola (CITMA, 2013). Se debe destacar que esta limitación, conjuntamente con el intenso uso agrícola y la consecuente erosión a que han estado y están sometidos los suelos, representa la principal limitación para su explotación económica, sobre todo por la alta susceptibilidad a la erosión que presentan la mayoría de los suelos de la cuenca, **Figura 17**.

Como resultado de esta susceptibilidad a la erosión, combinada con el uso del suelo, la erosión actual predominante en la cuenca es mediana, asociada a las llanuras altas y en ocasiones a los valles aluviales de la llanura media. En este último caso, la causa principal es el uso intensivo de los suelos en actividades agrícolas para las que no tienen el suficiente soporte edáfico (CITMA, 2013).

Los suelos en la cuenca hidrográfica del río Zaza tienen bajo contenido de humus, lo que limita los rendimientos de no aportarse los nutrientes necesarios. Los suelos medianamente humificados ocupan la mayor extensión, mientras en las montañas pequeñas y premontaña de terreno Escambray, así como en gran parte de la llanura baja, predominan los suelos poco humificados (González, 2007).

²Se refiere a la profundidad efectiva, que es el material total, incluido el Solum y el horizonte C, que permite el crecimiento de las raíces sin dificultad. Los suelos poco profundos tienen de 25 a 50 cm de espesor.

³Los suelos medianamente profundos tienen de 50 a 90 cm de espesor.

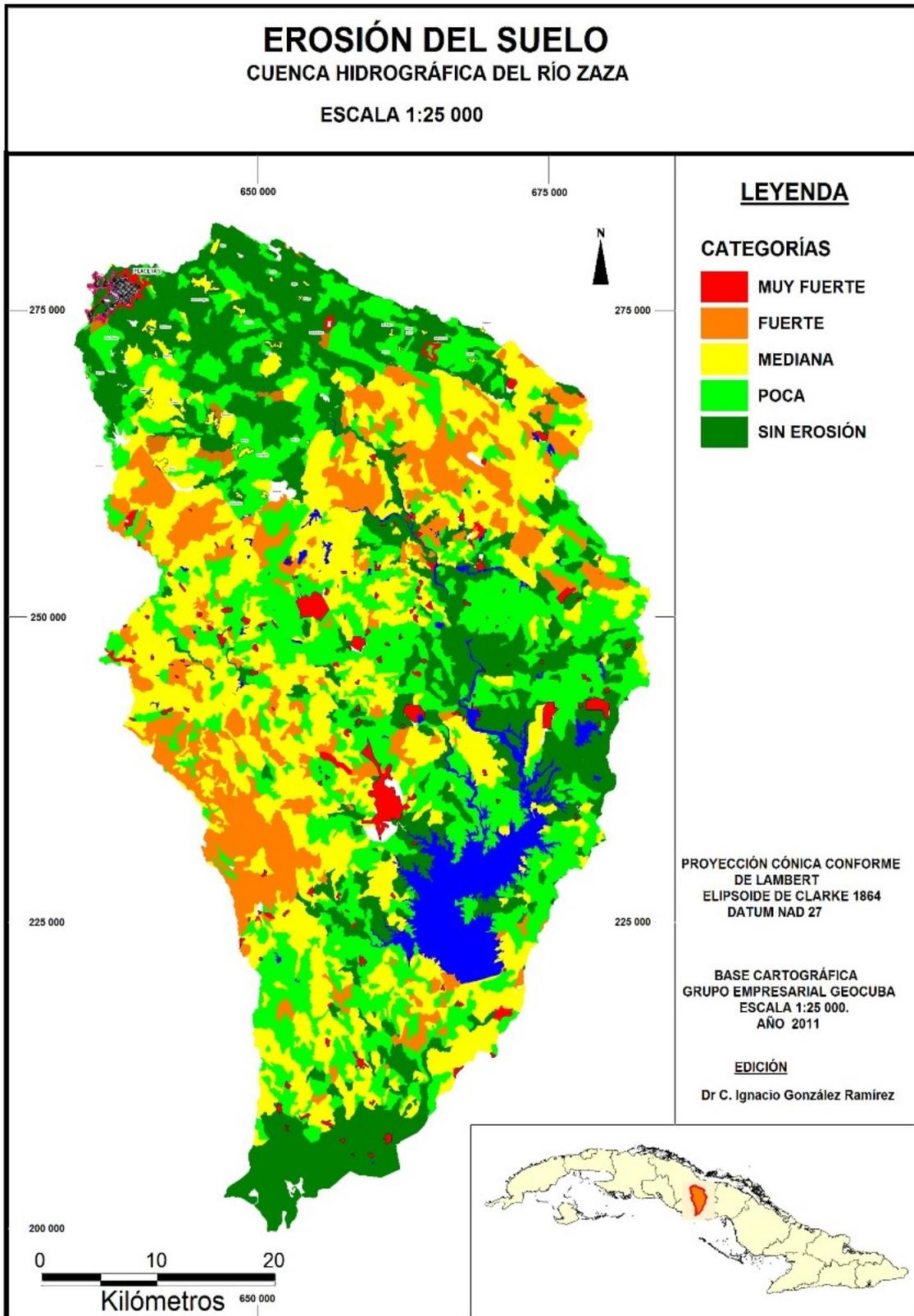


Figura 17. Erosión de los suelos en la cuenca Zaza.

3.2.4. Clima

Al describir el clima de una región específica como en este caso, la cuenca hidrográfica del río Zaza, es importante tener en consideración la diversidad en ecosistemas naturales con flora, fauna, vegetación, suelo, orografía, geología, hidrología y mesoclimas muy diversos. Las variaciones del clima local pueden estar en función de las regiones naturales, ocurriendo apreciables diferencias en puntos situados en diferentes zonas naturales como son las regiones costeras, interiores llanas y montañosas, Lecha et *al.*, (1987). Estos ecosistemas para la provincia de Sancti Spíritus se comportan de manera muy similar al resto del país.

Los ecosistemas naturales costeros relacionados con la cuenca del Zaza en general, se caracterizan por un régimen de radiación solar y horas de brillo solar elevado, una menor oscilación de la temperatura y humedad del aire (en lo que coinciden con las zonas montañosas), mayor cantidad de días despejados y mínimo de días nublados y de precipitaciones, así como una menor ocurrencia de calmas por la acción del régimen de brisas.

En los ecosistemas de zonas llanas del interior de la cuenca encontramos características climáticas esencialmente diferentes: menor régimen de radiación solar y cantidad de horas de brillo solar, considerable oscilación diaria de la temperatura y la humedad del aire (lo que asigna a esta parte del territorio de la cuenca rasgos de clima semicontinental) menor cantidad de días despejados y máximo de días nublados, precipitaciones que exceden en un 50% - 60% a las que ocurren en las costas y aumento apreciables de las calmas, principalmente, durante las horas de la noche y la madrugada.

En los ecosistemas submontanos y montanos, que se corresponden con las Montañas de Sancti Spíritus, los efectos sobre estas variables y por supuesto sobre el microclima y el mesoclima son más complejos, donde se pueden señalar también algunas consideraciones generales: la radiación solar incidente y las horas de brillo solar alcanzan valores mínimos, las temperaturas del aire disminuyen notablemente con la altura, a razón de unos 0,6 °C cada 100 m. Las precipitaciones en estas regiones tienen valores máximos, ocurriendo en las laderas a barlovento los acumulados más significativos, con mínimos notables a sotavento, los valores de la nubosidad son muy altos y, por la altura, la ocurrencia de nieblas es muy elevada; al igual que la humedad del aire. Por otra parte, el comportamiento del viento se hace muy complicado, con vientos locales (gravitacionales) totalmente afectados por las condiciones del relieve.

Insolación y radiación solar global (RSG)

Sobre la porción central ocupada por la cuenca se registran los valores mínimos anuales de insolación, se recibe anualmente un 20% menos de luz solar que en las costas, sin embargo, el valor

es lo suficientemente alto como para permitir el aprovechamiento energético del régimen de radiación solar.

En su marcha anual, y según los valores referenciados en la estación meteorológica de Sancti Spiritus, en el mes de abril se alcanza la media mensual más alta con un valor de 8,5 horas, coincidiendo con el valor más alto de insolación y radiación solar global (RSG) para el año; en los meses de julio y agosto se obtiene un máximo relativo secundario debido a la mayor influencia del anticiclón del Atlántico Norte. En junio, noviembre y diciembre se obtienen las medias mensuales más bajas con valores menores a las 7 horas, debido a la ocurrencia de fenómenos meteorológicos que generan gran nubosidad en el mes de junio y ocasionalmente en noviembre; en diciembre ocurren estos valores fundamentalmente por la disminución acentuada de la duración astronómica del día.

Durante el año existen 64 días como promedio en los cuales la insolación alcanza valores mayores a las 10 horas, y solamente 20 días con valores menores a 2 horas. La radiación solar media anual aumenta desde la parte alta de la cuenca, donde alcanza valores aproximados de los 16,0 MJ/m², hasta registrarse valores por encima de los 17 MJ/m², hacia el sur del embalse Zaza.

Precipitaciones

El elemento que más varía en el clima de la cuenca Zaza es la precipitación, **Figura 18**. Reconociéndose dos temporadas fundamentales: una lluviosa (de mayo a octubre) y otra poco lluviosa (de noviembre a abril). Precipitando aproximadamente el 82% del total de lluvia anual en el período lluvioso y el 18% en el poco lluvioso.

La irregularidad y temporalidad de la marcha anual de las precipitaciones en la cuenca se deben al sistema general de circulación de los vientos, a los contrastes topográficos (lluvias orográficas), y a las irregularidades en el calentamiento de la superficie terrestre y las aguas confinadas y costeras. Registrándose una cantidad total anual de precipitación de 1 428 mm.

Los meses de mayores y menores acumulados para la cuenca son respectivamente, junio y septiembre (período lluvioso) y diciembre y enero (período poco lluvioso). Los mayores reportes de precipitaciones están asociados a los fenómenos meteorológicos más importantes (ciclones tropicales, frentes fríos, ondas tropicales, etc.) o tienen su origen en el calentamiento diurno, ocurriendo casi siempre en horas de la tarde en forma de episodios de corta duración. En presencia de sistemas meteorológicos de gran escala pueden producirse períodos de grandes precipitaciones, sobre todo en los meses de mayo–junio y septiembre–octubre.

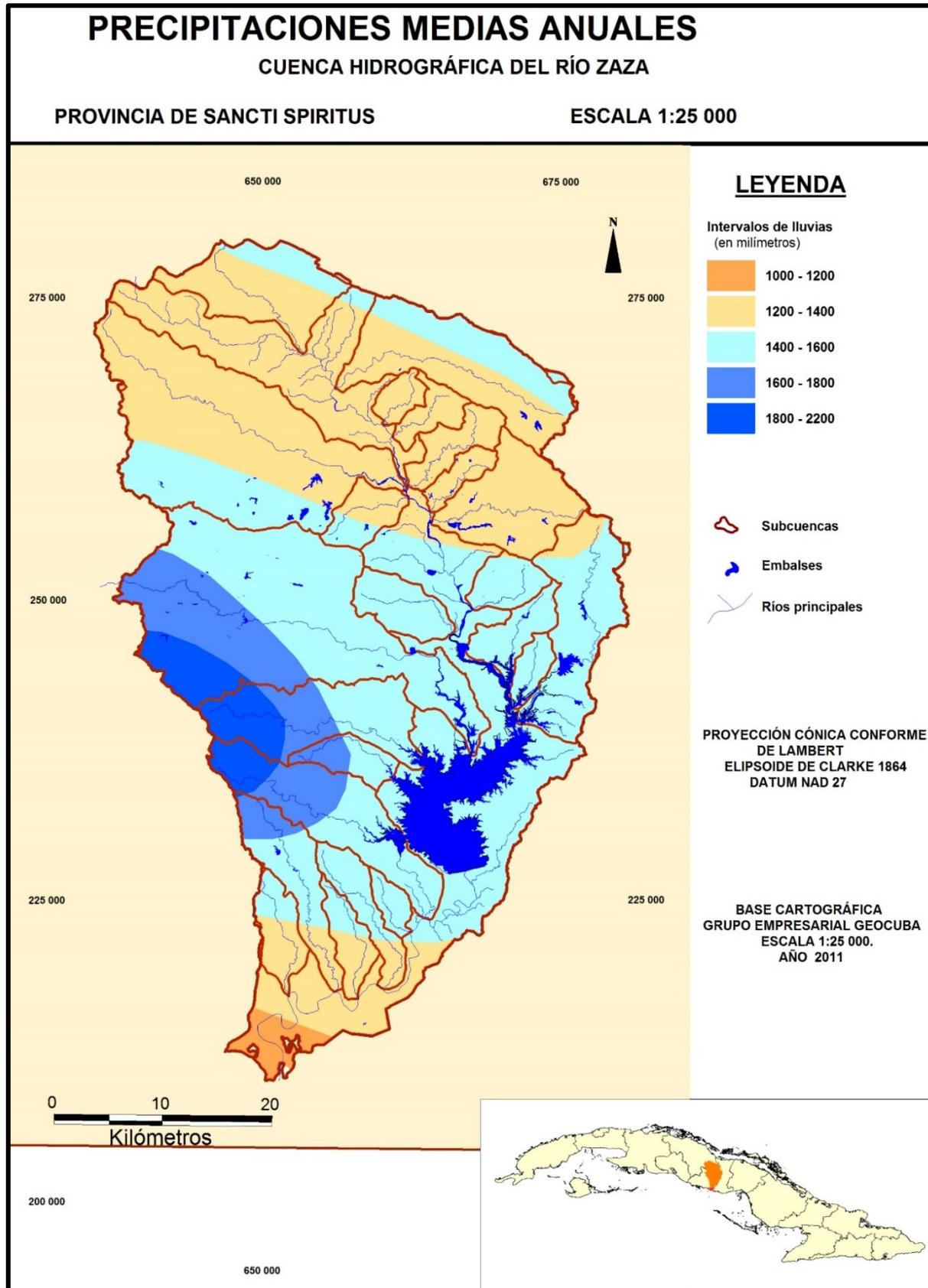


Figura 18. Precipitaciones medias anuales en la cuenca hidrográfica del río Zaza.

La Variabilidad de las precipitaciones anuales en el transcurrir del tiempo, se revela por su

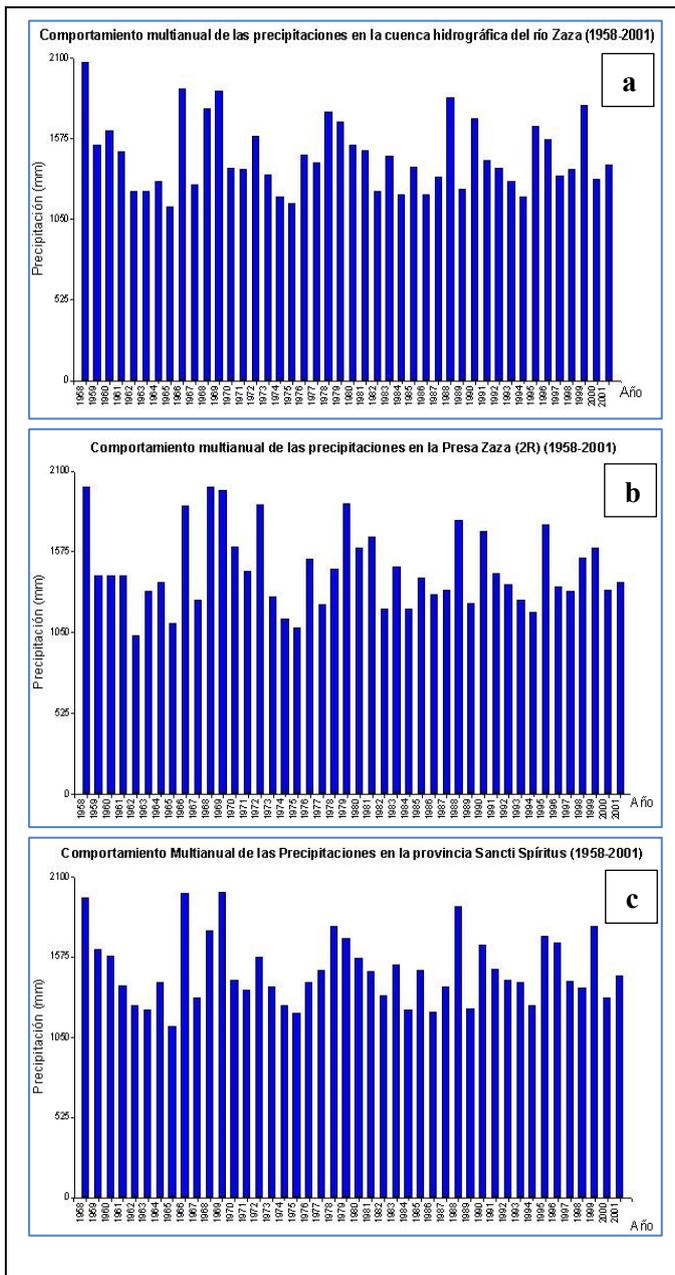


Figura 19. Variación multianual (1958-2001) de las precipitaciones anuales en a) provincia Sancti Spiritus, b) cuenca del río Zaza y c) presa Zaza.

terminados en 5 y 4. De manera que, para ambos casos, la recurrencia más probable de años con máximas o mínimas precipitaciones es, en término medio de 10 años, transfiriendo al proceso de precipitaciones cierta regularidad.

De la misma manera, los restantes casos pueden ser considerados como representativos de irregularidad temporal en el comportamiento del régimen pluviométrico en consecuencia podemos

distribución en forma de dientes de sierra, incluso para series cronológicas representativas de áreas de diferentes dimensiones (provincia de Sancti Spíritus, cuenca hidrográfica del río Zaza y embalse Zaza).

No obstante, dentro de esa evidente variabilidad total, **Figura 19 a, b y c**, se puede apreciar cierta regularidad u orden por la aparición de grupos de años con precipitaciones relativamente altas, alternados por un grupo de años con precipitaciones relativamente bajas. Si en cada uno de los grupos de años referidos, determinamos el momento de ocurrencia de sus valores máximos y mínimos relativos, respectivamente, obtendremos para los primeros (máximos), los ocurridos durante: **1958; 1966; 1969; 1978; 1979; 1988; 1995; 1996; 1999**, y para los segundos (mínimos): **1965; 1975; 1982; 1984; 1986; 1989; 1994 y 2000**.

La mayor ocurrencia de los máximos valores los encontramos en los años terminados en 8 y 9, mientras que los mínimos valores aparecen en los años

señalar que desde 1980 la irregularidad de las precipitaciones se ha incrementado con respecto al período 1958-1979, y además que la mayor irregularidad se ha manifestado en la ocurrencia de los eventos mínimos; es decir de sequías meteorológicas. Otra regularidad consiste en que es poco probable la transposición temporal de la ocurrencia de máximos y mínimos. Ya que las únicas transposiciones de estados ocurren después de 1980, ellas son: en el grupo de los mínimos la inclusión de 1989 y el de los máximos el de 1995.

Al suroeste de la cuenca se encuentra, Montañas de Sancti Spíritus en Montañas de Guamuhaya, donde las precipitaciones medias en los lugares más elevados alcanzan valores superiores a los medios de la cuenca; en el interior de los valles y en las laderas de sotavento, estos decrecen, registrándose valores inferiores a los 1 400 mm.

Al centro y sureste se encuentra, el mayor embalse del país (embalse Zaza) que constituye al igual que Montañas de Sancti Spíritus un factor modelador de las precipitaciones en la cuenca. Ocurriendo hacia el noroeste del embalse Zaza precipitaciones que fluctúan entre los 1 200 mm y 1 500 mm anuales, mientras hacia el sur decrecen, hasta alcanzar cerca de la costa valores que pueden ser inferiores a los 1 000 mm anuales.

Temperaturas

En la cuenca del río Zaza, las temperaturas son generalmente altas. Los valores medios anuales van desde los 24,3 °C en las llanuras interiores hasta 26 °C y más en la costa sur. La temporada de noviembre a abril es menos calurosa y se conoce como “período poco lluvioso o invierno”, mientras que el período de mayo a octubre, más caluroso, recibe el nombre de “período lluvioso o verano”.

Las temperaturas máximas y mínimas absolutas registradas para la estación meteorológica de Sancti Spíritus son de 36,6 °C el 15 de agosto el 1993 y 4,8 °C el 14 de enero el 1981, respectivamente. Como es típico de climas tropicales, la variación diaria de la temperatura en la cuenca es mayor que la anual.

Los valores inferiores se reportan en los meses dentro del período poco lluvioso, siendo más bajos en enero y febrero, con promedios entre 16,5 °C y 17,0 °C, respectivamente. La temperatura mínima absoluta anual con probabilidad de ocurrencia de un 95% es de 10 a 12 °C. Durante el período lluvioso se produce un ascenso significativo de las temperaturas promedio, alcanzando valores que superan los 26 °C, fundamentalmente en julio y agosto, en estos meses se produce un máximo calentamiento en la cuenca. Los valores de temperatura máxima superan como promedio los 31°C, cifra muy similar a casi todas las registradas en el interior de la cuenca; la temperatura máxima absoluta anual con probabilidad de ocurrencia de un 95% es de 33 °C.

Evaporación

La magnitud de la evaporación en la cuenca, al igual que otros elementos climáticos está determinada periódicamente por factores astronómicos, geográficos y meteorológicos. La cuenca Zaza se encuentra ubicada mayormente hacia el interior de las provincias de Sancti Spíritus y Villa Clara, coincidiendo con la línea de máxima convergencia de las brisas donde ocurren las mayores precipitaciones, alejada de la costa y en una zona con mayor nubosidad y menor velocidad del viento, además de una mayor humedad relativa del aire, todo esto hace que la evaporación en la cuenca no sea máxima, en las áreas montañosas alcanza los valores mínimos.

Los valores estimados para la cuenca tomando como referencia los promedios históricos de la estación meteorológica de Sancti Spíritus, revelan, un valor de 2 079,8 mm de evaporación anual, con una distribución en el período lluvioso de 1 106,2 mm para el 53% del valor anual, y para el período poco lluvioso 973,6 mm, significando el 47%.

La evaporación media anual oscila entre los 2 000 y 2 300 mm, aumentando desde la parte alta de la cuenca hacia el delta. La relación precipitación anual (mm)/evapotranspiración potencial anual indica que existe un coeficiente de humedecimiento anual (k), según (Domínguez, 2003), que oscila entre un valor de 1,60 (suficiente) en la estación hidrométrica Paso Ventura en la parte alta de la cuenca, a 1,34 (moderado) hacia la zona costera sur en la estación meteorológica El Jíbaro; con un valor (suficiente) en la parte media de la cuenca de 1,59 en la estación meteorológica de Sancti Spíritus. En Montaña de Sancti Spíritus el coeficiente de humedecimiento alcanza valores anuales de abundante (Domínguez, 2003).

Coeficiente de humedecimiento (k), según (Domínguez, 2003).

- k < 1,0 ----- insuficiente
- k = 1,0 – 1,4 ----- moderado
- k = 1,4 – 1,7 ----- suficiente
- k > 1,7 ----- abundante

La zona deltaica del río Zaza, cuenca baja, presenta valores de humedecimiento cercanos a los de la estación meteorológica Trinidad, con un valor anual de k igual a 0,88 (insuficiente) en (Domínguez, 2003); (Puerta de Armas, 2004); (González, 2007), ocurriendo en el delta impactos negativos por estrés hídrico, asociados al déficit de precipitaciones de la zona costera, **Figura 18**, y a la regulación antrópica que se realiza en el embalse Zaza de las aguas superficiales del río Zaza y de sus más importantes afluentes.

Humedad relativa

La humedad relativa media es alta en la cuenca como para todo el país, con promedios cercanos al 80%. Los máximos diarios, generalmente superiores al 90%, ocurren a la salida del sol, mientras que los mínimos descienden, al mediodía, hasta el 50 y 60% en el interior. Las zonas más húmedas son las regiones centrales de la cuenca, asociado a los principales núcleos convectivos que se desarrollan en la zona media de convergencia de las brisas y en las laderas a barlovento de Montañas de Sancti Spiritus.

Al analizar la humedad relativa en el período lluvioso y poco lluvioso puede notarse un comportamiento en correspondencia con las condiciones de isla larga y estrecha. La situación geográfica de la cuenca Zaza es favorecida con respecto a esta variable, encontrándose valores mínimos en el delta del río Zaza donde las temperaturas son más elevadas con una influencia directa del mar que implica condiciones bioclimáticas de calor sofocante y bajo confort climático, en una interrelación creciente entre humedad–temperatura–viento. A medida que nos alejamos de la costa la humedad relativa se incrementa, aumentando en la cuenca en la misma proporción las condiciones para el desarrollo de convección por calentamiento diurno entre las zonas terrestres y las aguas confinadas y marinas.

El comportamiento anual muestra una humedad relativa elevada en los meses que van desde mayo hasta noviembre con un máximo en el mes de septiembre, relacionado con eventos meteorológicos del período lluvioso a nivel de mesoescala y circulación general de la atmósfera.

Vientos

Cuba se encuentra expuesta a la acción de los vientos alisios, originados por las altas presiones subtropicales, los cuales inciden sobre la cuenca con dirección predominante entre el noreste (NE) y el este (E). La máxima intensidad de los vientos se registra en el mes de marzo con vientos de dirección sur (S), con 11,9%, estos son producidos mayormente por la combinación de las altas presiones oceánicas y los sistemas de bajas presiones de latitudes medias que transitan por la porción sur (S) de los Estados Unidos y el Golfo de México.

Los vientos con dirección del norte (N) al noroeste (NE) abarcan prácticamente todo el año con un máximo en noviembre, diciembre y enero, que pueden provocar el descenso de las temperaturas. La velocidad promedio anual oscila entre 5 y 7 km/h con dirección predominante del este (E), principalmente durante los meses de abril a octubre.

La velocidad del viento en su ciclo diario aumenta durante las horas de la tarde (de 1 pm a 4 pm) con viento predominante del norte (N) al noreste (NE) (primer cuadrante) y velocidad de hasta

13 km/h, disminuyendo en horas de la noche y en la madrugada (de 9 pm a 7 am) pasando a ser de dirección noroeste (NO) con velocidad que oscila alrededor de 4 km/h; este cambio en la dirección del viento está determinado por la presencia de Montañas de Sancti Spíritus que influye en la circulación de los vientos a nivel de mesoescala y local.

El peligro de afectaciones por fuertes vientos es el de mayor impacto en la cuenca Zaza por sus daños, con marcado efecto en la población, las áreas agroproductivas e industriales y en los ecosistemas en toda su extensión. En el periodo comprendido entre 1799 hasta el 2005 (207 años) un total de 30 huracanes cruzaron sobre la cuenca Zaza o lo suficientemente cerca como para hacer sentir sus efectos. Se han producido afectaciones desde julio hasta noviembre sin ninguna en el resto de los meses. El mes de mayor frecuencia de afectación es octubre seguido de noviembre y septiembre lo que muestra una marcada estacionalidad.

3.2.5. Hidrología e hidrogeología

La cuenca hidrográfica Zaza tiene una pendiente media de 28,8% y una densidad de drenaje de 0,67 km/km²; se distinguen un total de 22 subcuencas, **Figura 20**.

El río Zaza, nace en el municipio de Placetas, provincia de Villa Clara, en los N: 275 600 y E: 638 200 a 190 m.s.n.m., con una pendiente media suavizada del cauce del río de 1,79%. En su inicio corre en dirección sureste inclinándose posteriormente al sur y atravesando los municipios: Placetas, Cabaiguán, Taguasco y Sancti Spíritus hasta la desembocadura en el Mar Caribe en los N: 200 000 y E: 652 200, al este de Punta Ladrillo, formando un delta de tipo cúspide. Funciona como límite entre los municipios Taguasco y Sancti Spíritus y entre Sancti Spíritus y La Sierpe (Puerta de Armas, 2004).

Los afluentes en la margen derecha del río Zaza, en dirección tierra-mar, presentan las siguientes características en su nacimiento, según Acosta et *al.*, (2004):

Río Calabazas: nace en la llanura denudativa-erosiva alta de zócalo en una zona morfoestructuralmente condicionada por la litología y la estructura en un área que favorece un drenaje toscamente radial. Su nacimiento se localiza a los 22°09'03" LN y los 79°38'10" LO a 190 m.s.n.m. Manantiales de fisura en rocas poco acuíferas brindan el primer caudal para sus aguas. El paisaje es fundamentalmente agrícola y vegetación secundaria que sustenta una fauna antropoxena. El valle del río es en forma de tina.

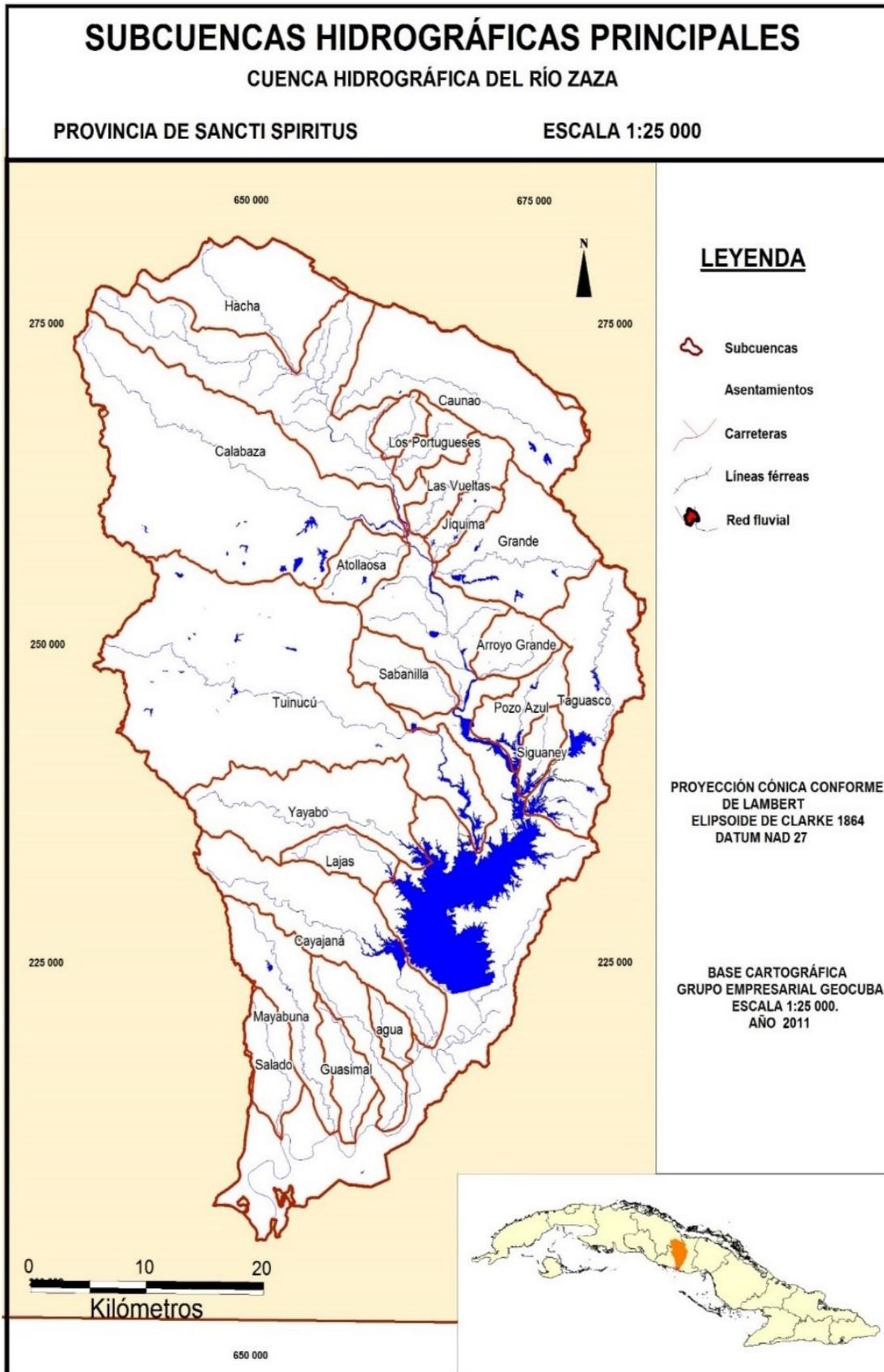


Figura 20. Subcuencas hidrográficas principales en la cuenca hidrográfica del río Zaza.

Río Piedra: río de 2do orden afluente del Calabazas que nace en una llanura alta ondulada de zócalo a los 22°07'50" LN y los 79°32'17" LO a 139 m.s.n.m. El valle es en forma de tina y se caracteriza por formar una cañada erosivo-acumulativa con escurrimiento superficial permanente y vegetación ribereña fundamentalmente secundaria. Fauna higrófila cercana al nacimiento.

Río Tres Atejes: río de 2do orden con nacimiento en los 22°06'20" LN y los 79°32'06" LO a 156 m.s.n.m., en una llanura denudativo erosivo alta en la región físico geográfica de Alturas y Llanuras de Cubanacán. Su nacimiento a partir de manantiales fisurales presenta una balka erosiva acumulativa con vegetación secundaria herbácea y una diversidad faunística baja. En el área predominan los paisajes agrarios con una intensidad de uso de fuerte a media y una estabilidad ecológica baja.

Río Mazamorra: nace en los 22°06'23" LN y los 79°30'22" LO a 153 m.s.n.m., en una llanura erosiva – denudativa alta, medianamente disecionada con tendencia a la elevación. El valle es en forma de tina y su fuente primaria de alimentación son aguas de manantiales fisurales. Nace cerca de la ESBE Sandino, es afluente del Calabazas y necesita de protección su fuente debido a que se encuentra enclavado en un paisaje de agricultura intensiva. Existe poca variedad faunística,

Río Seibacoa (Atoyaosa): afluente del río Zaza, su nacimiento se localiza en los 22°05'20" LN y los 79°30'22" LO a 135 m.s.n.m. Es una corriente fluvial que desde su nacimiento se desarrolla en una zona fuertemente antropizada con baja estabilidad ecológica y de capacidad de respuesta ecosistémica. Valle en forma de tina.

Río Sabanilla: nace entre Trece Palma de Poza, a los 22°05'17" LN y los 79°24'47" LO a 84 m.s.n.m., formando un cauce en forma de cubeta con vegetación de cultivos y secundaria. Carece de fauna relevante. Debe protegerse su nacimiento.

Río Tuinucú: nace en la ladera norte de Montañas de Sancti Spíritus en los 21°57'48" LN y los 79°36'52" LO a 385 m.s.n.m., en una zona de estribos y parteaguas denudativo-gravitacionales inclinados a partir de un manantial que forma una cañada en V semiabierta con un escurrimiento superficial permanente y vegetación ribereña conservada en su nacimiento, aunque el bosque de galería tiene invadido casi su curso por *Syzygium jambus* (Pomarrosa) y áreas con vegetación mesófila en estado regenerativo. Ocurren procesos que favorecen la erosión y pérdida de la biodiversidad. De los ríos de montaña es uno de los que menos riqueza faunística presenta. La hidrobiota está muy reducida.

Río Bufete: río de 2do orden afluente del Tuinucú. Nace en las laderas de Loma La Gloria en los 21°58'13" LN y los 79°37'42" LO a 390 m.s.n.m. Esta ladera pertenece a un conjunto montañoso carsificado. Su origen se debe a manantiales de surgencias cársticas con influencia tectónica que forma una cañada en forma de V y vegetación ribereña mixta.

Río Manacas: es un río de 2do orden, afluente del Tuinucú. Nace cerca de Manacas Ransola, Fomento en un área desde el punto de vista morfoestructural complejo en los 21°59'05" LN y los 79°38'06" LO a 300 m.s.n.m. El paisaje es de montañas bajas denudativo-erosivo en forma de cadenas con pastos, matorrales y restos de bosques semidecíduos mesófilos. La cañada es en forma de V con escurrimiento superficial y vegetación riparia algo degradada.

Río Las Vueltas: río de 3er orden que nace en los 22°02'41" LN y los 79°40'14" LO a 200 m.s.n.m., en las alturas tectónico estructurales de bloque, en cadenas, monoclinales poco diseccionadas que forman la Sierra de Cariblanca-Cerros de Fomento. Su origen es de surgencias que parten de la circulación cárstica en Cariblanca. La vegetación en el nacimiento del río es secundaria, en su cercanía se desarrolla una vegetación mogotiforme conservada. El zoocomplejo cárstico se encuentra muy bien desarrollado con especies endémicas locales. Su drenaje es en una cañada en forma de V con escurrimiento superficial permanente y vegetación ribereña degradada.

Río Limones: arroyo de 4to orden con nacimiento en los 22°05'09" LN y los 79°37'38" LO a 178 m.s.n.m., en una llanura denudativo erosivo de zócalo, alta y ligeramente desmembrada. La cañada a partir de un manantial de fisura forma un cauce de cubeta, escurrimiento estacional y vegetación ribereña de comunidades secundarias.

Río Santa Lucía: nace a 3 km de Poza, en el municipio de Cabaiguán en los 22°05'06" LN y los 79°37'12" LO a 191 m.s.n.m., en una llanura erosivo denudativa de zócalo con una fuerte asimilación económica del paisaje. En su nacimiento existe un pequeño embalse. La vegetación es de sabanas y de cultivos con sectores de vegetación espontánea, arbórea y arbustiva, especialmente marabú (*Dichrostachys glomerata*) y aromas (*Acacia sps*) con un complejo faunístico de sabanas muy degradados, con abundancia de lepidópteros, así como aves: Tomeguín del Pinar (*Tiaris canora*), Negrito (*Melopyorha nigra*) y otros que buscan en la vegetación secundaria alimentación y sitios hospederos para la reproducción. Valle en forma de tina.

Río Cayajaca: río de 2do orden que nace en los 22°05'11" LN y los 79°32'16" LO a 167 m.s.n.m. Su nacimiento es cercano al Purial en una llanura erosivo-denudativo de zócalo alta y algo

diseccionada con alturas residuales. El paisaje está muy asimilado económicamente, en sus inicios es un cauce en forma de U abierta con escasa o nula vegetación ribereña y fauna. Los principales centros de la diversidad biológica lo constituyen las cercas vivas.

Río Guayos: es un arroyo de 3er orden que nace en la cercanía de la Loma La Chicharra en los 22°04'57" LN y los 79°28'50" LO a 134 m.s.n.m. Está su nacimiento enclavado en una llanura erosivo denudativa de zócalo con pequeñas alturas petrogénicas en forma de testigos debido a la erosión diferencial. Su nacimiento se debe a manantiales fisurales de poco caudal y forma una cañada en U abierta con una fuente influencia agrícola y una estabilidad ecológica baja.

Río Guajen: arroyo de 3er orden que se localiza en los 22°04'17" LN y los 79°32'22" LO a 148 m.s.n.m. Su nacimiento está cercano al Troncón en una llanura denudativo-erosivo con suelos cubiertos de pastos, caña de azúcar y focos de cultivo. Forma una cañada de tipo U abierta sin vegetación riparia y una baja estabilidad ecológica.

Río Yayabo: río de 1er orden que nace en los 21°56'05" LN y los 79°35'50" LO a 440 m.s.n.m., en la macropendiente norte de Montañas de Sancti Spiritus cerca de la cadena de pequeñas montañas que forma Caballete de Casas. El lugar donde nace se denomina “El Cupeyal”. Este sitio es una localidad clásica de colecta en la geobotánica histórica cubana. El nacimiento se encuentra en un relieve cársticos denudativas con pastos, focos de cultivos, restos de bosques semidecíduos, matorrales secundarios y sabanas antrópicas. El bosque en galería ha sido invadido casi en todo su curso por *Syzygium jambas* (Pomarrosa). Se reporta un endémico para el distrito *Spirituanense*: el *Agave brittoniana ssp. sancti-spirituanensis* A. Álvarez. La fauna presenta menos riqueza en especie que otros ríos de montañas; a pesar de esto, de las 6 especies faunísticas reportadas como vulnerables para estas corrientes fluviales se reportan 2 para el Yayabao: *Epiorates angulifer* Bibro “Majá de Santa María”, *Accipiter gundlachi* Lawrece “Gavilán Colilargo”. Presenta una hidrobiota con cierta riqueza. Su nacimiento es debido a la circulación cárstica, es necesario reforestar su nacimiento.

Río Las Guanábanas: nace cerca de Chambelón, al NE de Las Tosas, en los 22°57'40" LN y los 79°28'30" LO a 105 m.s.n.m., en una llanura fluvio-denudativo alta, muy diseccionado con algunas alturas masivas aplanadas en una depresión litólogo-estructural con rocas granitoides. La vegetación original de sabana fue temporalmente cambiada por sabanas antrópicas y focos de cultivo. Forma una cañada en forma de U, con escurrimiento superficial permanente con vegetación ribereña de comunidades secundarias. Sus orígenes son manantiales fisurales.

Río Cayajaná: nace en las Alturas de Banao, Montañas de Sancti Spíritus en los 21°54'59" LN y los 79°35'08" LO a 665 m.s.n.m. Las Alturas de Banao forman montañas pequeñas en cadenas carsificadas. Su nacimiento se debe a manantiales cársticos surgentes. Presenta un bosque en galería que con excepción del mismo nacimiento está prácticamente invadido por *Syzygium jambos* (Pomarrosa), aunque presenta una flora pteridológica con una gran riqueza de especies y sabana de un fuerte componente edáfico (suelos cuarcíticos) en la localidad llamada El Helechal, sitio clásico de colecta en la botánica cubana. Además, en el área del nacimiento hay plantaciones de *Pinus caribea* y *Hibiscus eletus*. La fauna es variada y rica. De 6 especies vulnerables según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) se reportan 2 para el área. El valle forma una V con escorrentía permanente y una vegetación ribereña algo degradada.

Río Yaguá: río de 1er orden que nace en los 21°48'50" LN y los 79°28'16" LO a 68 m.s.n.m., en una región de transición paisajística entre llanuras denudativas ligeramente onduladas y la llanura erosiva, alta, colinosa, con alturas aisladas litoestructurales y petrogénicas. La vegetación es de cultivos y pastos con una escasa diversidad faunística. El valle de la cañada inicial es en forma de U.

Río Guasimal: río de primer orden que nace en los 21°45'15" LN y los 79°27'43" LO a 28 m.s.n.m., en la llanura acumulativa y erosiva acumulativa, mediana, ligeramente ondulada y plana que forma el río Zaza en su tercio inferior. El uso del suelo está dado por plantaciones de caña de azúcar, pastos, algunos focos de cultivo y matorrales espontáneos de marabú y aroma. El zoocomplejo faunístico es pobre. Su nacimiento es en una laguna. Valle en forma de cubeta.

Río Mayabuna: río de 1er orden, nace en los 21°51'12" LN y los 79°32'45" LO a 174 m.s.n.m., en la llanura de piedemonte de alturas tectónicas estructurales aplanadas de Montañas de Sancti Spíritus. La vegetación secundaria caracteriza el área abundando la palma cana (*Sabal ssp*). La fauna no es abundante. La cañada original es en forma de tina.

Río Salado: arroyo que vierte sus aguas al Zaza. Su nacimiento se encuentra en los 21°47'25" LN y los 79°32'45" LO a 68 m.s.n.m. Nace en la llanura abrasivo erosiva ondulada que se extiende al sur de Montañas de Sancti Spíritus. Su paisaje se encuentra muy transformado y antropizado. Su complejo faunístico no presenta especies carismáticas.

Los afluentes en la margen izquierda del río Zaza, en dirección tierra-mar, presentan las siguientes características en su nacimiento, según Acosta et *al.*, (2004):

Río Caonao: nace en los 22°13'28" LN y los 79°26'06" LO a 134 m.s.n.m., en una llanura fluvial alta que en la localidad de Piñero y sus alrededores presenta un elevamiento que hace que la

divisoria de las aguas presente una estructura de domo, que se expresa toscamente en el paisaje. El río transfluye por varias morfoestructuras antes de desaguar al Zaza. El complejo contexto geológico que existe en su nacimiento hace que se nutra de manantiales fisurales de rocas poco acuíferas alimentadas en el paisaje cárstico cercano. La vegetación original ha desaparecido y predomina un paisaje agrícola de cultivos menores y pastos que sustenta una fauna antropoxena donde la avifauna es el principal indicador de la biodiversidad. En sus inicios forma una cañada erosiva-acumulativa en forma de U abierta, con escurrimiento superficial permanente y vegetación ribereña de comunidades secundarias.

Río Pedro Barba: afluente de 1er orden del río Zaza que nace en los 22°13'28" LN y los 79°26'06" LO a 134 m.s.n.m. En su nacimiento el contexto paisajístico es de colinas lito-estructurales denudativas y erosivas, diseccionadas, formadas por rocas metamórficas sobre suelos esqueleticos fersialíticos poco profundos y pedregosos que sustentan una vegetación de plantaciones forestales y cuabales que alojan un complejo faunístico propio de este tipo de formación vegetal, es de tipo mesoxerófilo donde la diversidad genérica de los animales de este zoocomplejo no es grande. Los principales son coleópteros, algunos moluscos terrestres, mariposas, hormigas, arácnidos y lagartijas. La aviofauna es variada. En sus inicios fluye por un cauce en forma de cubeta con vegetación ribereña parcialmente secundaria. Se origina a partir de manantiales fisurales.

Río El Naranjo: este arroyo tiene su nacimiento en los 22°14'16" LN y los 79°23'54" LO a 168 m.s.n.m. Por sus características paisajísticas y lugar de nacimiento en la zona de colinas estructurales denudativas y erosivas, diseccionadas, es semejante al río Pedro Barba. Es un afluente de 2do orden.

Río Los Portugueses: este río nace cerca del centro de recría La Caoba y sus coordenadas son en los 22°13'26" LN y los 79°23'54" LO a 168 m.s.n.m., y desagua en el Zaza en Vega del Paso. Su nacimiento se origina en las colinas que forma las lomas de Pedro Barba, estas colinas lito-estructurales con procesos de denudación y erosión, sustentan una vegetación de bosques monodominantes, sabanas serpentinosas con gramíneas pequeñas, arbustos microfilicos, palmas enanas y pastos que sustentan el complejo zoofaunístico con características mesoxerófilas. Su origen es de manantiales fisurales en rocas poco acuosas que aprovechan las líneas de debilidad tectónica para su surgencia. El cauce es en forma de cubeta en sus inicios.

Río Pozo Prieto: afluente de 2do orden del Zaza, se localiza su nacimiento en los 22°12'42" LN y los 79°22'05" LO a 197 m.s.n.m. Sus características son similares a los ríos Pedro Barba, El Naranjo y Los Portugueses. Nace cerca de Las Minas de Jarahueca.

Río Las Vueltas: afluente de 1er orden del Zaza, que nace en los 22°11'31" LN y los 79°20'03" LO a 250 m.s.n.m., cerca de uno de los puntos culminantes de las lomas de Pedro Barba y es de las corrientes fluviales que parten de estas alturas alineadas la de mayor curso. Sus condiciones de paisaje son muy semejantes a las descritas para las corrientes fluviales Pedro Barba, El Naranjo, Los Portugueses y Pozo Prieto.

Río Arroyo Grande: nace en los 22°06'25" LN y los 79°16'38" LO a 150 m.s.n.m., a unos pocos kilómetros al norte del poblado de La Rana, en el municipio de Taguasco. Es un afluente de 1er orden del río Zaza y su nacimiento se localiza en una llanura denudativa-erosiva ondulada, de zócalo sobre rocas ígneas diseccionadas que sustentan una vegetación de pastos con árboles muy aislados y presencia de especies invasoras. Debe destacarse que cerca del nacimiento del arroyo existe una colonia de *Melocactus gutartii*, cactacea endémica de Sancti Spíritus. La fauna es pobre, destacándose la avifauna de los gremios insectívoros y granívoros. Su nacimiento se debe a manantiales que brotan fisuralmente, de poca potencia. Su valle se presenta en forma de U.

Río Taguasco: Río de 1er orden, afluente del Zaza que nace en los 22°06'40" LN y los 79°14'30" LO a 185 m.s.n.m., cerca del asentamiento Panchito Gómez Toro en el municipio de Taguasco. Su nacimiento se localiza en un cauce en forma de U que debe su origen a pequeñas vaguadas que se unen debido a la contribución que realizan pequeños manantiales. El paisaje de llanuras fuertemente modificado se caracteriza por presentar pastizales con sectores de vegetación espontánea arbórea y arbustiva especialmente de marabú y aroma. El zoocomplejo está muy poco diversificado.

Río Managuaco: arroyo que nace en los 21°54'45" LN y los 79°18'10" LO a 79 m.s.n.m. Su origen es en una llanura erosiva alta con vegetación muy antropizada, fauna antropoxena, valle en forma de U.

Río Palmas: afluente de 1er orden del río Zaza que nace en los 21°51'42" LN y los 79°18'10" LO a 98 m.s.n.m., en una llanura denudativa y erosiva denudativa con pastos y sectores de sembrados de caña de azúcar. Su cauce es en forma de cubeta y nace a partir de un grupo de manantiales.

En su curso, el río Zaza, forma meandros bien desarrollados y saltos como en la zona del Saltadero en el municipio de Cabaiguán; también cañones cársticos en Sierra de las Damas. En la cuenca existe un fuerte desarrollo de sistemas hidráulicos representado por 3 embalses (Zaza, Tuinucú y Siguaney)

con un volumen de embalse de aguas normales de 1 086,33 hm³ y 41 embalses pequeños con un volumen de embalse de 13,50 hm³ pertenecientes a las provincias de Sancti Spíritus y Villa Clara (CITMA, 2013).

La capacidad de embalse total es de 1 100,00 hm³ para una entrega garantizada de 730,20 hm³ que abastecen en gran proporción a través de una extensa red de canales (canal Zaza: 44,52 km, canal CP-1: 22,26 km, canal CP-4: 6 km) y sistemas de riego a las mayores empresas productoras de arroz y de azúcar de caña en Cuba. Además, existen importantes recursos de acuicultura y pesqueros, así como la presencia de valiosas riquezas naturales y de biodiversidad. El paisaje está evaluado como un geosistema de categoría mediano a fuertemente modificado, determinado por el manejo de los recursos naturales en función del desarrollo agropecuario y en menor escala el industrial (Hernández et *al.*, 2012).

Las aguas subterráneas en la cuenca Zaza se alimentan, en lo fundamental, de las precipitaciones atmosféricas. En la subcuenca Batey Colorado, perteneciente a la cuenca Meneses (SS-5), el manto freático se alimenta, además, de la recirculación de las aguas extraídas para el riego de cultivos varios. Otra fuente de recarga, de los acuíferos, lo constituyen los cuerpos de aguas superficiales (grandes embalses y pequeños embalses) destacándose, por su extensión superficial y presión sobre su lecho de contención, el embalse Zaza (CITMA, 2013).

La divisoria principal de las aguas subterráneas está situada en las elevaciones de la Sierra de Meneses y Cueto. A partir de este parte aguas subterráneo el flujo se desplaza hacia las vertientes norte y sur. La cuenca Zaza se encuentra al sur de esta “Sierra” por lo cual la dirección predominante del flujo en ella es de norte a sur (CITMA, 2013). Las fuentes de abasto subterráneo, pertenecientes a la red de calidad de las aguas, suman un total de 51 estaciones, dos de las cuales pertenecen a la rama pecuaria y dos a la industria, las restantes abastecen a la población. De acuerdo a los datos históricos de análisis químicos a ellas realizadas los sulfatos y los cloruros se mantienen por debajo de la concentración máxima admisible. En la costa sur, aproximadamente hasta un (1) km de la costa, tierra adentro, el agua subterránea no está apta para el consumo, debido a la intrusión salina. Desde el punto de vista microbiológico se presentan determinadas fuentes, en la relación coliformes fecales – coliformes totales con valores superiores a lo permitido en las normas cubanas NC -93-11 (1986) y NC-93-02 (1985), situación que ocurre generalmente en el período poco lluvioso, incrementándose ligeramente hacia el final del mismo (Hernández et *al.*, 2012).

Las aguas subterráneas se delimitan en 9 cuencas subterráneas, en la provincia Sancti Spíritus, **Tabla 1**, (SS-5 Meneses, SS-7 Potrerillo, SS-8 Iguará-Taguasco, SS-10 Sancti Spíritus, SS-11

Jatibonico, SS-17 Guasimal, SS-18 Sur del Jíbaro y un pequeño sector de las cuencas subterráneas SS-9 y la SS-20) y 2 cuencas subterráneas en la provincia Villa Clara (VC-X-2 Tramo Zaza, VC-x-3 Tramo Zaza), el potencial total explotable de aguas subterráneas es de 55,49 hm³. La profundidad del nivel estático es variable y fluctúan en dependencia de la época del año (CITMA, 2013).

Tabla 1. Unidades hidrogeológicas en la cuenca hidrográfica del río Zaza. **Fuente:** CITMA, 2013.

Provincia	Unidades hidrogeológicas	Profundidad de yacencia	Recurso Potencial Explotable (hm ³ /año)
Sancti Spíritus	Cuenca Meneses (SS-5)	5 - 10 m	2,12
	Cuenca Potrerillo (SS-7)	0 - 10 m	9,48
	Cuenca Iguará – Taguasco (SS-8)	5 - 10 m	3,30
	Cuenca Fomento (SS-9)	sin información	1,60
	Cuenca Sancti Spíritus (SS-10)	0 - 10 m	13,33
	Cuenca Jatibonico (SS-11)	0 - 10 m	0,50
	Cuenca Guasimal (SS-17)	0 - 20 m	4,76
	Cuenca Sur del Jíbaro (SS-18)	0 - 20 m	4,24
	Cuenca Sierra Escambray (SS-20)	sin información	sin información
Villa Clara	Cuenca VC-X-2 Tramo Zaza	sin información	14,16
	Cuenca VC-X-3 Tramo Zaza	sin información	2,00
Total			55,49

La cuenca del Zaza es afectada por peligros naturales extremos como: las sequías, los ciclones tropicales, las precipitaciones intensas y otros, siendo los más significativos: las sequías de los años (1966), (1974-1976), (1983-1985), (1987-1988), (1998-1999), (2003-2005), (2009-2010) y (2014-2016); los huracanes Kate (noviembre/1985), Lili (octubre/1996), George (septiembre/1998), Irene



Figura 21. Regulación de avenidas por el embalse Zaza, precipitaciones intensas de mayo-junio del 2002.

(septiembre/1999) y las precipitaciones intensas de mayo/1988, junio/1995, mayo-junio/2002 y mayo-junio/2012, **Figura 21.**

Al construirse el embalse Zaza, disminuyeron considerablemente las posibilidades de inundación en la zona deltaica. Actualmente sólo ocurren en condiciones meteorológicas significativas. El gasto máximo absoluto observado en el río Zaza ha sido de 3 858 m³/s en la estación hidrométrica Paso Ventura, año 2002 y el gasto mínimo de 0,01 m³/s en 1968, en la misma estación.

En la cuenca hidrográfica del río Zaza, como en Cuba, el paradigma de gestión del agua, se basa en un sistema de oferta y demanda. La oferta es brindada por el ciclo hidrológico, que pone el recurso agua al servicio del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos que entrega y cumple con la demanda realizada por los sistemas agroproductivos y urbanos (economía y sociedad) que son priorizados, y en términos menores a los ecosistemas naturales.

Este es uno de los aspectos importantes a revertir en la gestión del agua en Cuba, en la actualidad no se tiene en cuenta el **caudal ecológico** en la gestión de cuencas hidrográficas, y por tanto los impactos en los ecosistemas rivereños y costeros cada vez son mayores; repercutiendo de manera negativa en la calidad de estos ecosistemas y especialmente aguas abajo de los sistemas hidráulicos lo cual ha provocado importante estrés a la biodiversidad y afectaciones a la **Resiliencia** de los mismos, que incluye la muerte de ecosistemas de relevancia como, el bosque de mangle, **Figura 22**.



Figura 22. Impactos negativos en el delta del río Zaza y la zona costera sur por muerte del bosque de mangle.

3.2.6. Conocimientos del estado actual sobre vegetación, fauna y la conservación de la diversidad biológica

El entorno geográfico ocupado por las islas del Caribe ha sido clasificado como una de las llamadas “zonas calientes” de la diversidad biológica mundial (Mittermeier et *al.*, 1999) en García-Lahera y Pulido (2012)). En este contexto, Cuba posee la mayor riqueza florística y faunística del área del Caribe, y entre las diez más ricas de los sistemas insulares del mundo, con un endemismo muy alto: aproximadamente la mitad de las especies cubanas de la flora y de la fauna son únicas de nuestro país (García-Lahera y Pulido, 2008, 2012).

Vegetación

La cuenca del río Zaza, ubicada fitogeográficamente (según los criterios de Samek, (1973) en Hernández et *al.*, (2012) y González et *al.*, (1999)) en el Sector: Cuba central, Subsector: Cuba centro-oriental, ocupando parte de los Distritos: Escambray (Montañas de Guamuhaya), Serpentinillas de Santa Clara y Llanuras y Alturas de Cuba centro – oriental, dada la diversidad de tipos climáticos y

edáficos presentes, se desarrollan varias formaciones vegetales según (Capote y Berazaín (1984) en Hernández et *al.*, (2012) y González et *al.*, 1999) modificado, entre ellas:

Vegetación Primaria (Natural o Seminatural).

I. Formaciones arbóreas: bosques.

- Bosque siempreverde
- Bosque semideciduo
- Bosque de galería
- Bosque de ciénaga.
- Bosque de mangles

II. Formaciones arbustivas: matorrales.

- Matorral xeromorfo espinoso sobre serpentina (cuabal)

III. Formaciones herbáceas.

- Comunidades acuáticas en aguas dulces
- Herbazal de ciénaga
- Herbazales de orillas de arroyos y ríos

Vegetación Secundaria.

IV. Vegetación secundaria.

- Bosques secundarios
- Matorrales secundarios
- Comunidades herbáceas
- Sabanas antrópicas
- Vegetación ruderal
- Vegetación vegetal

V. Cultivos.

Las formaciones arbóreas tienen una inestimable importancia desde diferentes puntos de vista, en estos ecótopos dominados por árboles, se desarrolla el ciclo de vida de infinidad de animales; constituyen el refugio de especies de gran valor maderable, frutal y medicinal y protegen en muchos casos de la salinización y la erosión marina. En toda el área de la cuenca, no existen zonas de vegetación original donde no hayan ocurrido impactos antrópicos por lo que debe considerarse su estado general como antropizado. En este sentido, las formaciones que más ampliamente se encuentran representadas en la cuenca hidrográfica del río Zaza son las agrupadas en las formaciones vegetales secundarias **IV** (Vegetación secundaria) y **V** (Cultivos). La vegetación primaria puede

localizarse en puntos específicos de: alturas pequeñas, medianas y grandes (hasta 400 m.s.n.m.), asociadas a las montañas pequeñas de Montañas de Sancti Spíritus (hasta los 765 m.s.n.m.) y en los humedales (Hernández et *al.*, 2012) y (González et *al.*, 1999).

A continuación, se describe la vegetación primaria en la cuenca hidrográfica del río Zaza, teniendo en cuenta la presencia de sus principales formaciones vegetales:

Bosque Siempreverde

El bosque siempreverde, presenta menos de un 30% de elementos deciduos en su estrato arbóreo, con presencia de arbustos y herbáceas y poco desarrollo de epífitas, mayor cantidad de epífitos xerófitos. Posee, además gran abundancia de lianas (Orozco y García-Lahera, 2012).

El bosque siempreverde mesófilo de baja altitud aparece en montañas pequeñas entre 400 m y 650 m.s.n.m. Además, podemos encontrarlo en sectores de la parte alta de la cuenca Zaza asociado a las Alturas del Nordeste donde el volumen de las precipitaciones y el humedecimiento son elevados. Sobre suelos Pardos con elevada pluviosidad en las pequeñas montañas (Montañas de Sancti Spíritus) y sus llanuras periféricas en asociación con el bosque semidecíduo mesófilo típico que en estos sectores era dominante (Domínguez y Acosta, 2012). El bosque siempreverde micrófilo aparece asociado al manglar sobre sustrato arenoso en Punta Caney, se caracteriza por la alternancia de especies siempreverdes y semidecíduas arbóreas, que conviven con arbustos espinosos y cactáceas y puede aparecer asociado al complejo de vegetación de costa arenosa en Punta Ladrillo y Playa Bonita (Orozco y Domínguez, 2001) en Domínguez y Acosta, (2012)).

Bosque Semidecíduo

El bosque semidecíduo mesófilo, presenta de un 40-60% de elementos caducifolios, generalmente, en el estrato arbóreo superior; es rico en arbustos y lianas y presenta poco desarrollo de herbáceas y epífitas. Lo encontramos en parches conservados de la cuenca hidrográfica del río Zaza, en zonas onduladas, alturas cársticas y pequeñas montañas de Montañas de Sancti Spíritus por debajo de los 500 m.s.n.m., sobre suelos esqueléticos o medianamente esqueléticos, donde la asimilación económica ha resultado limitada debido al difícil acceso, y se conservan como “islas de caliza en un mar de agrosistemas” (Hernández, 2000) en Domínguez y Acosta, (2012)).

Los bosques semidecíduos mesófilos de humedad fluctuante, que se desarrollaban en áreas estacionales u ocasionalmente inundadas, con escurrimiento superficial desorganizado y lento, han desaparecido por la expansión agrícola y ganadera quedando sólo un exponente de su composición florística que por razones económicas se conservó mejor: los palmares de *Roystonea regia* y, principalmente, hacia el centro de la llanura meridional, los palmares de *Copernicia*, todos los

cuales constituyen indicadores para la determinación de la vegetación potencial (Borhidi y Muñiz, 1979) en Domínguez y Acosta, (2012)).

Bosque de Galería

El bosque de galería presenta un estrato arbóreo de 15-20 m; un estrato arbustivo; hierbas; lianas y epífitas. En el área de la cuenca Zaza se encuentra condicionado a las márgenes de los ríos de áreas poco antropizadas, fundamentalmente en las pequeñas montañosas de Montañas de Sancti Spíritus, sobre suelos aluviales y los caracterizan las especies más heliófilas de la vegetación circundante, entre ellas palmas y muchas lianas herbáceas (Orozco y García-Lahera, 2012).

Bosque Siempreverde de Ciénaga y Bosque de Mangle

El bosque siempreverde de ciénaga, aparece muy fragmentado por la antropización en áreas aisladas del delta del río Zaza en las zonas temporal o permanentemente inundadas paralelo al manglar, en un cinturón longitudinal estrecho pero fuera de la zona de intercambio mareal, por lo general, sobre suelos con alta salinidad y ricos en materia orgánica; y asociadas al bosque siempreverde de mangle, que como formación propia de la zona de interacción tierra-mar, con inundación permanente y una zonación característica de las especies que lo componen: *Rhizophora Mangle* (mangle rojo), *Avicennia germinans* (mangle prieto), *Laguncularia racemosa* (patabán) y *Conocarpus erectus* (yana). El primero (mangle rojo) en la zona de contacto agua-tierra, crece sobre turba salinizada profunda, mientras los restantes lo hacen sobre suelo hidromórfico pantanoso, acompañado por herbazales de Batis marítima (Domínguez y Acosta, 2012).

Matorral Xeromorfo Espinoso sobre Serpentina (Cuabal)

Según, Orozco y García-Lahera (2012), se localiza fundamentalmente en las zonas de Minas de Jarahueca en el municipio de Cabaiguán, donde se desarrolla un estrato arbustivo muy denso de 2-4 m, formado por arbustos esclerófilos micro y nanófilos espinosos; con arbolitos y palmas emergentes de hasta 6 m de altura; hierbas dispersas; palmas de los géneros *Coccothrinax* (con una subespecie que es un endémico local) y *Copernicia*; epífitas y abundantes lianas. La flórula de estos matorrales presenta un alto endemismo.

Comunidades Acuáticas en Aguas Dulces

Las Comunidades acuáticas en aguas dulces son comunidades con especies que pueden presentarse libremente flotando o enraizadas en lagunas y lagos naturales o en embalses. Entre las especies que se presentan en comunidades acuáticas libremente flotantes se observan *Eichhornia* spp., *Lemna minima*, *Pistia stratiotes*, *Salvinia* sp., *Utricularia juncea* y *Utricularia* sp. En las

comunidades acuáticas enraizadas se presentan las especies: *Nyphaea* spp., *Nyphoides grayanum* y *Potamogeton* spp., entre otras (Orozco y García-Lahera, 2012).

Herbazales

Las Comunidades halófitas se presentan en los saladares de dos formas: comunidades de plantas acuáticas halófilas y la vegetación halófila herbácea terrestre. El herbazal de ciénaga se presenta como herbazales altos de pantanos o de ciénagas. Los herbazales de las orillas de ríos y arroyos son escasos ya que en la mayoría de los casos esta vegetación original ha sido destruida por la actividad antrópica (Orozco y García-Lahera, 2012).

Fauna

La mayoría de la fauna cubana actual, y por extensión, la que encontramos en la cuenca hidrográfica del río Zaza muestra estrecha afinidad con la de América Central -como los moluscos terrestres y murciélagos-; con América del Norte -los insectívoros-; los roedores y perezosos tienen un remoto origen en América del Sur, mientras que las aves tienen un origen mixto norteamericano y sudamericano. Presentando particularidades que según Pérez y Hernández (2012), responden a las barreras de aislamiento -montañas, ríos, mares, etc.- y a su condición de zona transicional entre las regiones oriental y occidental de la Isla de Cuba.

Entre las características más notables de la fauna en la región central de Cuba encontramos: la gran riqueza de especies, con predominio de los grupos taxonómicos inferiores, acentuada faunación -potenciada por su condición de territorio transicional-, elevado endemismo, pobreza de vertebrados, escasez de mamíferos terrestres y pobreza de la ictiofauna dulceacuícola. Al igual que en la Flora, según Pérez y Hernández (2012), las regionalizaciones de la fauna se basan en el endemismo regional y local, pero la extensión y los límites de cada una de las unidades zoogeográficas se determinan por los factores geográficos relacionados con dicho endemismo y por la distribución de la flora y la vegetación.

La cuenca hidrográfica del río Zaza, pertenece a la región Neotropical, subregión Antillana, provincia Antillas Mayores, subprovincia Cuba-Bahamas occidentales, distrito Cuba central, donde se encuentran representadas porciones de los subdistritos zoogeográficos: Guamuhaya, costa sur de Cienfuegos-Trinidad y Llanos ondulados de Villa Clara.

La primera topología faunística de Cuba basada en los factores ecológicos que relacionan las poblaciones animales con las condiciones naturales -faunación-, especialmente con la humedad fue dada por (Panfilov (1970) en Pérez y Hernández, (2012)). Agrupando a los animales en tres grandes

conjuntos: animales higrófilos -con tres tipos o zoocomplejos-; los animales mesófilos -con cinco tipos o zoocomplejos- y animales mesoxerófilos xerófilos -con dos tipos o zoocomplejo.

En la cuenca hidrográfica del río Zaza están presentes los zoocomplejos siguientes:

i. Animales Higrófilos.

- Zoocomplejo de manglares, pantanos litorales y marismas (Pérez y Hernández, 2012): Son agrupaciones naturales distribuidas en las áreas costeras; incluyen relativamente pocas especies de animales terrestres y anfibios. De acuerdo con la proporción de cada grupo sistémico representa en el total de la biomasa en unidades del área que ocupan, los más importantes son: crustáceos, moluscos, peces, aves, insectos y arácnidos. Existen reportes en el delta del río Zaza del *Crocodylus acutus* Cuvier (caimán), de hábitos preferentemente marinos.
- Zoocomplejo de bosques perennifolios de llanura y de bosques de galería (Pérez y Hernández, 2012): Grupos naturales que constituyen el tipo más numeroso por las poblaciones animales de diferentes especies que lo integran, muchos de cuyos miembros viven en los árboles. Siguiendo el mismo criterio, los grupos más importantes son los insectos del orden de los Isópteros, como las termitas o comejenes, las hormigas, peces, anfibios, lagartos del género *Anolis*, aves comedoras de insectos, arácnidos, otros insectos y escasos mamíferos como murciélagos y dos especies de jutías: la conga (*capromys pilorides* Say) y la carabalí (*Mysateles prehensilis* Poeppig).

ii. Animales Mesófilos.

- Zoocomplejo de bosques semicaducifolios (Pérez y Hernández, 2012): Formado por grupos naturales y antropogénicos, ampliamente distribuidos en las llanuras y colinas. Predominan los insectos -hormigas, termitas, cucarachas, escarabajos y otros-, lagartos, aves insectívoras y granívoras, arácnidos y escorpiónidos.
- Zoocomplejo de bosques semidecuidos de alturas cársticas, llanuras calizas y llanuras costeras cársticas (Pérez y Hernández, 2012): Grupos naturales constituidos por tipos de comunidades bastantes ricos en especies endémicas muy localizadas. Presentan insectos, arácnidos, quilópodos, diplópodos, moluscos, gusanos, réptiles, aves insectívoras y rapaces, así como algunos mamíferos (murciélagos y jutías conga y carabalí).
- Zoocomplejo de sabanas bajas de arbustos y gramíneas (Pérez y Hernández, 2012): Formado por grupos antropogénicos muy semejantes a los del zoocomplejo de bosque semidecuido de sabana, del que se diferencia por la menor cantidad de animales termófilos -termitas,

escorpiones y lagartijas. Se extiende por amplias zonas del territorio y constituye un remanente de la biodiversidad que contiene el bosque semidecídúo, cuando este ha sido talado para la asimilación agropecuaria.

- Zoocomplejo de cuevas (Pérez y Hernández, 2012): Constituido por arácnidos, crustáceos, diplópodos, insectos, peces, anfibios, reptiles -entre los que se destacan varias especies de ofidios como: el majá de Santa María (*Epicrates angulifer* Bibron) y el majasito bobo (*Trophidophis melanurus* Schlegell); algunas aves como: la lechuza (*Tyto alba furcata* Temminck), el Sijú Cotunto (*Gymnoglaux lawrencii* P. L. Sclater y Salvin) y la Golondrina de Cuevas (*Hirundo fulva* Vieillot); varias especies de murciélagos, como el murciélago calentador de cuevas (*Phyllonycteris poeyi*) y la jutía conga (*Capromys pilorides*).

iii. Animales Mesoxerófilos o Xerófilos.

- Zoocomplejo de pinares y bosques esclerófilos (Pérez y Hernández, 2012): Grupos artificiales surgidos en las plantaciones forestales de pinos (*Pinus caribea* Morelet) que sustituyeron áreas de bosques secos que fueron talados, donde surgieron extensos palmares de Copernicias. Se caracteriza por grupos faunísticos desarrollados, especialmente, en las alturas serpentinitas -en el caso de los pinares- o en los palmares de Copernicias de las llanuras costeras de los municipios de La Sierpe y Sancti Spíritus. Predominan insectos como las hormigas, termitas, cucarachas, grillos, mariposas y otros; arácnidos y escorpiónidos; lagartos y aves insectívoras.
- Zoocomplejo de sabana con cactus, arbustos y palmas (Pérez y Hernández, 2012): Propio de las fajas costeras pedregosas y secas de la costa sur, principalmente. Su diversidad genérica es reducida, y dominan los insectos -sobre todo Coleópteros-, hormigas, mariposas, moluscos terrestres, arácnidos y escorpiones; entre los vertebrados son numerosos los réptiles, tanto Iguánidos como Ofidios.

Fauna extinta

En la cuenca hidrográfica del río Zaza encontramos el yacimiento paleontológico Domo Zaza, en el municipio La Sierpe ((MacPhee e Iturralde-Vinnet, 1994) en Rojas, (2005)). Es un afloramiento artificial situado en ambos lados del canal de distribución de la Presa Zaza, distante aproximadamente a un kilómetro hacia el sur de la cortina del embalse, a unos 18 km al SE de la ciudad de Sancti Spíritus. La sección estratigráfica aflorada en el yacimiento Domo Zaza ha sido propuesta por (MacPhee e Iturralde-Vinent (2003) en Rojas (2005)), como localidad Cotipo para la Fm. Lagunitas, en un corte de aproximadamente un kilómetro de longitud, donde afloran en ambas orillas del canal

magistral Zaza la serie carbonatado – siliciclástica. Se observan superficies fósiles de intemperismo o paleosuelos.

El corte está formado por varios niveles estratigráficos, donde se repiten las facies sedimentarias, con cambios generalmente verticales bruscos y laterales graduales, marcando cierta ciclicidad; muy probablemente asociada a cambios del nivel marino, en parte con emersiones temporales. De edad Mioceno Inferior (18,5–14,68 Millones de años) según datos geológicos, micropaleontológicos y análisis de isótopos de Estroncio.

El Paleoambiente según las litofacies y secuencias que integran la sección estratigráfica presente en el yacimiento, así como el registro fósil, permiten interpretar el ambiente de formación del depósito de origen aluvio-marino a marino. Donde las rocas siliciclásticas estuvieron asociadas al aporte de un río, a través de paleocanales y distributarios submarinos. Las rocas arcillosas se depositaron en lagunas costeras y los carbonatos se consolidaron en un mar abierto muy poco profundo. Se deduce la existencia en el área, durante el Mioceno temprano, de un ambiente transicional, donde se combinaban las tierras emergidas, un estuario, lagunas marinas costeras y un mar somero, caracterizado por una rica y diversa fauna (Rojas, 2005).

La Localidad tiene elevados valores geológicos y paleontológicos para varios taxones de vertebrados fósiles, descritos por primera vez para la Ciencia o primeros reportes para Cuba, en este yacimiento del Mioceno, el más importante del Gran Caribe. Estos incluyen tanto animales terrestres como marinos, entre los que se encuentran un mono fósil, un roedor, un perezoso, sirénidos, cocodrilos, tortugas, ballenas, tiburones y rayas. El yacimiento presenta una alta paleobiodiversidad, a juzgar por el material identificado, donde no se descarta el hallazgo de nuevos taxones aun no descritos (Rojas, 2005). La excelente aflorabilidad permite la observación de las características sedimentológicas de la unidad y el enriquecimiento continuo del registro paleontológico reportado para el yacimiento.

Riqueza taxonómica del depósito, según Rojas, (2005):

Vertebrados Terrestres:

1. *Paralouatta marianae* (Mono)
2. *Imagocnus zaza* (Perezoso)
3. *Zazamys veronicae* (Roedor)
4. *Metaxytherum riveroi* (Sirenido)
5. *Metaxytherum* sp.

Vertebrados Marinos:

6. Crocodilian indet. (Cocodrilo)
7. Pelomeducidoide indet. (Tortuga)
8. *Cetacean* sp. A. (Ballena)
9. *Cetacean* sp. B. (Ballena)
10. *Carcharhinus obscurus* (Tiburón)
11. *Negaprion brevirostris* (Tiburón)
12. *Sphyrna mokarran* (Tiburón)
13. *Aetobatus arcuatus* (Raya)
14. *Myliobatis* sp. (Raya)

Invertebrados marinos:

15. *Crassostrea vauhani insularis* (Molusco bivalvo)
16. *Clycymeris* aff. *guaica* (Molusco bivalvo)
17. *Clycymeris jamaicanus* (Molusco bivalvo)
18. *Clamys* spp. (Molusco bivalvo)
19. Moluscos gasterópodos indet. (abundantes)
20. Moluscos bivalvos indet. (abundantes)
21. Crustáceos (Jaibas, Cangrejos y Langostas)
22. *Balanus* sp. (Cirrípedos o escaramujos)
23. Foraminíferos (13 especies)
24. Ostracodos (12 especies)
25. Icnitas indet.

Conservación de la diversidad biológica

La diversidad biológica en la región central, al igual que en todo el archipiélago cubano, ha evolucionado signada por la insularidad, que le confiere gran fragilidad a sus ecosistemas.

En el territorio de la provincia de Sancti Spíritus, según García-Lahera y Pulido (2008) y (2012) se presentan problemáticas, que pueden ser extendidas a la cuenca hidrográfica del río Zaza, las cuales generan impactos en la biodiversidad: 1) la vocación marcadamente agrícola de gran parte de los suelos y el uso cotidiano de los mismos desde prematuros tiempos en la civilización en la isla; y 2) la presencia de alturas y pequeñas montañas, con biotas muy vulnerables, colmados de especies de la flora y la fauna con innumerables usos y por ende con alta demanda para el consumo humano.

Las causas principales que han provocado la pérdida de diversidad biológica en Cuba, expresadas en la Estrategia Ambiental Nacional en los ciclos (2007-2010) y (2011-2015), y que se manifiestan concretamente en la cuenca hidrográfica del río Zaza son:

- Alteraciones, fragmentación o destrucción de hábitat, ecosistemas y/o paisajes, debido fundamentalmente al cambio del uso del suelo y al empleo de prácticas inadecuadas de cosecha y preparación de los suelos para la agricultura y esfuerzos pesqueros no apropiados.
- Sobreexplotación de los recursos forestales.
- Degradación del suelo por la larga asimilación económica del territorio y los propios ciclos agrarios de la geoeconomía territorial.
- Introducción de especies exóticas.
- Insuficiente aplicación de mecanismos y capacidad de la actividad regulatoria para prevenir y sancionar actividades ilícitas como la caza y la pesca furtivas, así como el comercio de especies amenazadas y otros recursos de la naturaleza.

Ejemplos específicos de estas causales, según (García-Lahera y Pulido, 2008 y 2012) están presentes en:

- El desmonte de grandes extensiones de bosques en llanuras, alturas y montañas pequeñas para el monocultivo de caña de azúcar, la ganadería y la agricultura comercial.
- El asentamiento poblacional humano en zonas aledañas a varios de los mejores ecosistemas ribereños debido a las facilidades que los paisajes fluviales representaban al poblamiento, como en la cuenca de los ríos Zaza, Tuinucú y Yayabo, y costeros como Tunas de Zaza.
- Las necesidades insoslayables del desarrollo continúan degradando y fragmentando importantes ecosistemas, ejemplos: las construcciones de obras hidráulicas, de viales y electrificación; la extracción de roca caliza y mármoles en las canteras Nieves Morejón, Caja de Agua y Cariblanca; y por otra parte la extracción furtiva de arena de río en los alrededores del Yayabo y Tuinucú, entre otros.
- La explotación mediante la práctica de la “corta, quema y abandono” de campos en localidades premontañosas de Montañas de Sancti Spíritus ((García-Lahera *et al.*, 2001) en García-Lahera y Pulido (2008 y 2012)).
- La sobreexplotación de terrenos cercanos a la costa en los municipios de Sancti Spíritus y La Sierpe para el cultivo de arroz, caña de azúcar y ganadería extensiva, donde se han desarrollado procesos de degradación por salinización de los suelos.

- Colecta indiscriminada de especies como: varias de la familia de las orquídeas, helechos y otras especies ornamentales de la flora; y de la fauna, como aves canoras de elevada importancia zoogeográfica entre las que resaltan: el negrito (*Melophyrria nigra*), el cabrero (*Spindalis zena*), el tomeguín del pinar (*Tiaris canora*), el periquito (*Aratinga euops*) y la cotorra (*Amazona leucocephala*), todas ellas especies y subespecies endémicas cubanas.
- La inapropiada selección de especies para los trabajos de reforestación, creando bosques con prevalencia de una sola especie que aportan muy poco o nada a la ecología regional, como por ejemplo el uso extensivo de especies exóticas como la teca (*Tectona grandis*), los eucaliptos (*Eucaliptus* spp.) o la casuarina (*Casuarina equisetifolia*).

Conservación “*in situ*”:

Las acciones relacionadas con medidas de conservación *in situ* se realizan a través del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP), el cual tiene unidades sistémicas en cada una de las provincias del país (SPAP).

El Sistema de Áreas Protegidas en la cuenca hidrográfica del río Zaza cuenta con las siguientes áreas:

- Reserva Ecológica Lomas de Banao.
- Elemento Natural Destacado Hornos de Cal.
- Refugio de Fauna Tunas Zaza.
- Refugio de Fauna Palmar de Romero.

Región Especial de Desarrollo Sostenible:

- Montañas de Sancti Spíritus en Montañas de Guamuhaya.

Hasta el 2015, **Tabla 2**, han sido aprobadas legalmente 2 áreas protegidas (AP) en la cuenca hidrográfica del río Zaza: la Reserva Ecológica (RE) Lomas de Banao y el Refugio de Fauna (RF) Tunas de Zaza.

Tabla 2. Áreas protegidas con administración. **Fuente:** SPAP Sancti Spíritus

Nombre del área protegida	Nivel de Significación	Estatus Legal	Categoría de Manejo	Superficie (km ²)		
				Total	Terrestre	Marina
Lomas de Banao	N	A	RE	6 1,91	6 1,91	0,0
Tunas de Zaza	L	A	RF	6 0,44	5 3,12	7,32

N: Área Protegida de Significación Nacional.

L: Área Protegida de Significación Local.

A: Áreas aprobadas.

Conservación “*ex situ*”

La conservación *ex situ* conceptualmente se considera como la conservación de componentes de la diversidad biológica fuera de sus hábitats naturales. Las modalidades de conservación fuera del hábitat natural son diversas, y se realizan, en forma de ejemplares completos (colecciones en campo o bancos genéticos de campo), bancos de semillas, bancos de polen, colecciones *in vitro* (células y tejidos), jardines botánicos y zoológicos (García-Lahera y Pulido, 2012).

En la cuenca hidrográfica del río Zaza la modalidad conservacionista *ex situ* se lleva a cabo, con diferentes niveles de organización y proyección estratégica, en las entidades siguientes:

- ✓ Jardín Botánico de Sancti Spíritus (Centro de Servicios Ambientales, CITMA)
- ✓ Estación Experimental del Tabaco de Sancti Spíritus (MINAGRI)
- ✓ Estación Experimental de Pastos y Forrajes de Sancti Spíritus (Instituto de Investigaciones de Pastos y Forrajes, MINAGRI)
- ✓ Estación Experimental del Arroz de Sancti Spíritus (MINAGRI)
- ✓ Centro Nacional de Hibridación de la Caña de Azúcar de Sancti Spíritus (AzCuba)
- ✓ Empresa Provincial de Semilla de Sancti Spíritus (MINAGRI)
- ✓ Parque Zoológico Provincial de Sancti Spíritus (Empresa de Servicios Comunales, MEP)

3.3. Caracterización del subsistema social

La población de la cuenca Zaza se encuentra, de forma general distribuida uniformemente, aunque hacia el centro se presenta una concentración mayor, al ubicarse la ciudad de Sancti Spíritus en las márgenes del río Yayabo, y existir un agrupamiento de asentamientos a lo largo de la carretera central; el área de más baja densidad poblacional lo constituye la porción oeste de la cuenca, ocupada por Montañas de Sancti Spíritus, donde están presentes fuertes limitaciones por lo accidentado de la topografía, el déficit de redes viales y la presencia del área protegida Reserva Ecológica Lomas de Banao (CITMA, 2013).

En los principales centros socio–económicos (capitales municipales y provincial) se agrupa el 70% de la población total de la cuenca Zaza, lo que representa el 79% de la población urbana; mientras que en otros asentamientos urbanos habita el 16% del total de la población, y el 21% del total urbano. Las zonas rurales tienen una población, que representan el 23% del total, distribuyéndose en asentamientos mayores de 200 habitantes, el 13% del total, lo que representa el 57% de la población rural total.

En asentamientos menores de 200 habitantes vive el 3% del total, (15% de la población rural). La población dispersa, representa el 7% del total y el 30% de la población rural, propiamente dicho. La población en asentamientos es de aproximadamente 270 000 habitantes, el 93% del total. En la cuenca se concentra el 7% de la población total residente en la provincia Villa Clara, el resto pertenece a Sancti Spíritus, representando aproximadamente el 50% de su población total.

Con relación a la vivienda, los residentes en la cuenca presentan un índice de 3,18 habitantes por viviendas. La provincia Sancti Spíritus tiene el 79,3% del total de estas viviendas y Villa Clara el restante 20,7%. Entre la tipología del fondo habitacional, predomina la de Tipo I (con más del 40%), cuyas viviendas poseen: paredes de hormigón, ladrillos, bloques y mampostería; con techos de hormigón, vigas de madera o vigas de metal y losa o bovedilla. El estado constructivo que predomina es bueno, cerca del 60%, con respecto al total (CITMA, 2013).

El índice de habitante por vivienda es superior en la población dispersa, donde el valor promedio es de 3,6 habitantes, mientras que la población rural concentrada se registra un mínimo valor de 3,04 habitantes. Para la población urbana, el valor oscila entre 3,13 en las cabeceras municipales y 3,19 en la ciudad de Sancti Spíritus, para alcanzar un valor promedio de 3,17 habitantes; muy similar al resto de los asentamientos urbanos, que es de 3,18; lo cual indica la no existencia de graves problemas de hacinamiento en la cuenca Zaza (Puerta de Armas, 2004).

En las comunidades surgidas después de 1959 en áreas rurales, donde se construyeron edificios (de 4 o 5 plantas), los patrones de urbanización no se corresponden en su totalidad con las funciones productivas y las costumbres de sus habitantes. Y con excepción de las cabeceras municipales, en el resto de los asentamientos el empleo femenino es una disyuntiva social, al tiempo que la zona de montaña se encuentra prácticamente despoblada, localizándose sólo tres asentamientos (Puerta de Armas, 2004); (CITMA, 2013).

3.4. Caracterización del subsistema económico

La provincia Sancti Spíritus, en la cuenca Zaza con territorios de seis (6) municipios (Yaguajay, Fomento, Cabaiguán, Sancti Spíritus, Taguasco y La Sierpe), ocupa un área de 2 100 km², el 87% del total de los 2 413 km², mientras que la provincia Villa Clara en la parte alta de la cuenca con territorios de dos (2) municipios (Placetas y Remedios) está representada por 313 km² (13%). La economía desarrollada, está dirigida en lo fundamental a las producciones agropecuarias, aunque existen polos industriales importantes en los municipios Sancti Spíritus, Placetas, Cabaiguán y Taguasco.

En la cuenca Zaza, según (CITMA, 2013), el uso de los suelos más extendido es el de pastos y forrajes, con 72 344 hectáreas, **Figura 23**. Se corresponde con suelos de baja agroproductividad

general, tipos Pardo sin carbonatos y Esqueléticos. En la parte central de la cuenca este tipo de usos se extiende desde la premontaña, y se asocia principalmente a suelos Pardo grisáceo, Ferralíticos pardo rojizos y Oscuros plásticos y en la parte baja de la cuenca, en la llanura baja, se asocia a suelos Ferralíticos principalmente.

Los cultivos varios constituyen el segundo uso de mayor distribución con 43 500 hectáreas. Su distribución está más dispersa en la cuenca, ocupando los mejores suelos agrícolas, por lo general los Pardos con carbonatos, los Aluviales y los Ferralíticos rojos, así como los de menores limitaciones dentro de los Ferralíticos pardo rojizos, los Pardo grisáceos y los Pardo sin carbonatos.

El área más productiva en la cuenca se localiza sobre el complejo terrígeno carbonatado, formando

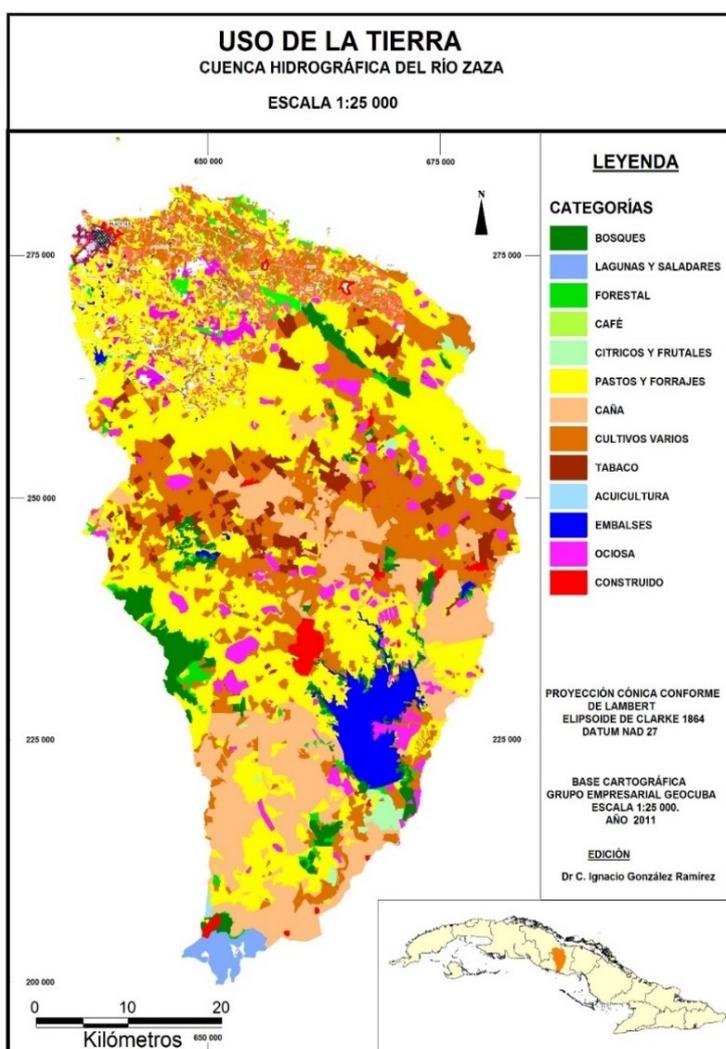


Figura 23. Uso de los suelos en la cuenca hidrográfica del río Zaza. **Fuente:** CITMA, 2013.

una faja desde el municipio Fomento, Cabaiguán y hasta Taguasco. La caña de azúcar es el tercer mayor uso de los suelos con un área ocupada de 38 560 hectáreas. Ocupando suelos de buena agroproductividad, formando un macizo alargado en la parte central de la cuenca Zaza; el área mayor en este tipo de usos está ocupando la parte baja de la cuenca, desde los asentamientos Banao y Paredes por el Norte, hasta El Salado por el Sur.

Los bosques ocupan 12 612 hectáreas, su distribución es bastante dispersa, las mayores áreas están en Montañas de Sancti Spíritus, las Alturas del Nordeste y el resto en algunas alturas sometidas a algún tipo de protección. En el delta del río Zaza las áreas de bosques de mangle se encuentran fuertemente impactadas.

En la cuenca Zaza, encontramos dos grandes Empresas estatales de cultivos

varios; una en el Valle del río Caonao en el sur del municipio Yaguajay parte alta de la cuenca Zaza y otra en Banao en el municipio Sancti Spíritus, además existen en los municipios restantes

(Remedios, Placetas, Fomento, Cabaiguán, Taguasco y La Sierpe), Empresas dedicadas al cultivo de: viandas, vegetales, hortalizas, frutales, cítricos, plantaciones forestales, café, cacao, pastos y forraje; así como caña de azúcar, arroz y la ganadería.

El tabaco es cultivado fundamentalmente en los municipios Cabaiguán, Taguasco, Sancti Spíritus y Fomento. Se desarrolla una agricultura de bajos insumos en suelos de uso privado, por familias y cooperativas que aportan aproximadamente el 80% de las producciones agrícolas obtenidas en la cuenca; y se consiguen importantes producciones de frutas, verduras y hortalizas por la agricultura urbana y suburbana en ciudades, asentamientos urbanos y rurales.

La producción industrial en la cuenca queda adscripta a los Ministerios de: Industrias, Industria Alimentaria, Comunicaciones, Energía y Minas, Construcción, Comercio Interior, Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, Interior y Agricultura; a Organismos como: el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) y otros; y Grupos Empresariales como: el Grupo Azucarero (AzCuba) y otros. Además, existen otras Industrias de subordinación local pertenecientes al Poder Popular.

La economía de servicios, (Puerta de Armas, 2004); (CITMA, 2013), generalmente se presta en aquellos asentamientos de mayor rango (capital provincial y capitales municipales) como sigue a continuación:

En el área de la cuenca, existen importantes instalaciones dedicadas a los servicios de salud pública y asistencia social. En la atención primaria: los consultorios del médico de la familia (CMF), las postas médicas y los policlínicos prestan servicios de consultas, laboratorio clínico, estomatología, rayos X, entre otras. Además, se dispone de nueve hospitales para la atención secundaria, de ellos un hospital clínico-quirúrgico-docente en la ciudad de Sancti Spíritus, dos maternos infantiles, un pediátrico; un hospital psiquiátrico, un hospital de rehabilitación y cuatro clínicas estomatológicas. Para la asistencia social se cuenta con dos centros comunitarios de salud mental, un hospital para enfermos de VIH-SIDA, un hogar para impedidos físicos, tres hogares maternos, seis hogares de anciano, casas de abuelos, ópticas y farmacias.

El Ministerio de Educación cuenta con 200 escuelas, de ellas 17 de la enseñanza preescolar, las cuales se ubican en asentamientos urbanos. En total se contabilizan 128 unidades docentes de la enseñanza primaria, 12 de secundaria básica, 10 de enseñanza preuniversitaria, 9 escuelas especiales (de idioma, vocacionales de arte, de instructores de arte, de iniciación deportiva, militares y politécnica de la salud) y 10 de enseñanza técnico-profesional. El Ministerio de Educación Superior dispone de dos universidades: la Universidad de Ciencias Médicas “Dr. Faustino Pérez” y la Universidad “José Martí”; mientras que la enseñanza para adultos cuenta con diez unidades docentes.

La red vial en la cuenca Zaza es de más de 900 km, entre las provincias Villa Clara y Sancti Spiritus, con una densidad de 0,49 km/km². Esta red vial posee un 35% de carreteras de interés nacional, 13% de otras carreteras, 37,5% de caminos socioeconómicos y 14,5% de caminos agropecuarios. El área de la cuenca es favorecida al ser atravesada de oeste a este por la carretera central, la autopista y el ferrocarril nacional (Puerta de Armas, 2004).

Los asentamientos urbanos y rurales se encuentran electrificados; más del 95% de la población se halla conectada al Sistema Electroenergético Nacional, solo una minoría, sobre todo la población dispersa no disfruta de este servicio. Para las comunicaciones, se cuenta con emisoras provinciales y municipales de radio, telecentros y corresponsalías de televisión, correo postal, telefonía fija y móvil, clubes de computación, telepuntos y puntos wifi de conexión a internet de banda estrecha.

Se dispone de servicio de acueducto en 59 asentamientos, siendo la población beneficiada de aproximadamente el 60% del total residente en el área de la cuenca Zaza, mientras el servicio de alcantarillado solo lo recibe poco más del 20% de la población. La calidad del agua servida en su gran mayoría adolece de un tratamiento de desinfección adecuado, siendo las causas fundamentales la antigüedad de las plantas potabilizadoras, la falta de mantenimientos, deficiencias en el suministro de gas cloro y la rotura de equipos. Las aguas residuales mayormente carecen de tratamiento y son vertidas a las corrientes receptoras totalmente crudas y con una alta carga orgánica.

La mayoría de los asentamientos no poseen alcantarillado y los que lo tienen no cubren la totalidad de la población, los sistemas de tratamiento que existen operan de manera ineficiente (CITMA, 2013); dado la tipología de las viviendas, este problema tiene una solución paliativa, con la construcción de fosas sépticas. Extremadamente compleja es la situación higiénico-sanitaria de los asentamientos urbanos y rurales en relación con la gestión y manejo de los desechos sólidos.

En la cuenca Zaza encontramos un total de 57 instituciones culturales como: la Casa de la Guayabera, casas de cultura municipal y comunitarias, bibliotecas, museos, teatros, cines, salas de video, expositivas y de conciertos, librerías y otras instituciones; de las cuales más del 60% se localizan en las capitales municipales y provincial, careciéndose de este servicio en casi todos los asentamientos rurales. Existen, además, gimnasios, piscinas, estadios y salas polivalentes deportivas, parques de diversión infantil, feria agropecuaria expositiva, parques zoológicos, jardín botánico y otras instalaciones como: cabarets, discotecas, hoteles, villas, moteles, restaurantes, hostales, servicios extra-hoteleros, campismos populares y otros, tanto para el turismo nacional como internacional. El centro histórico de la ciudad de Sancti Spiritus con más de 500 años de fundada, es el principal atractivo turístico y recreativo.

Bibliografía

Álvarez, R., y González, I.; 2011; Potencialidades de reforestación de la cuenca hidrográfica del río Zaza. Sancti Spíritus, Cuba: Consejo de Cuenca Hidrográfica Provincial. Inédito.

Anuario Estadístico; 2014; Sancti Spíritus. Oficina Nacional de Estadística e Información. La Habana, Cuba. [http://www.one.cu/aed2014/28Sancti%20Spiritus/00Sancti%20 Spiritus.pdf](http://www.one.cu/aed2014/28Sancti%20Spiritus/00Sancti%20Spiritus.pdf)

Arz, J.A., Arenillas, I., Menéndez-Peñate, L., Rojas-Consuegra, R., Meléndez, A., Grajales-Nishimura, J.M., Rosales-Domínguez, M.C. y Ceballo-Melendres, O. ; 2012; Resultados preliminares sobre la edad y emplazamiento de una unidad clástica relacionada con el impacto de Chicxulub, en Fomento (Cuba central). Libro de resúmenes de las XXVIII Jornadas de la Sociedad Española de Paleontología, 19-22. España. ISBN: 978-84-370-8993-5.

Censo de Población y Vivienda.; 2012; Oficina Nacional de Estadística e Información. La Habana, Cuba. <http://www.one.cu/informenacional2012.htm>

CITMA; 1997; Diagnóstico de la Cuenca Hidrográfica del río Zaza, 1997. Delegación del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Sancti Spíritus, Cuba.

CITMA; 2007; Estrategia Ambiental Nacional (2007-2010). Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. La Habana, Cuba.

CITMA; 2011; Estrategia Ambiental Nacional (2011-2015). Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. La Habana, Cuba.

CITMA; 2013; Informe de diagnóstico para el ordenamiento ambiental de la cuenca del río Zaza. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Sancti Spíritus, Cuba. Inédito.

Consejo de Cuenca Provincial; 2002; Diagnóstico de la Cuenca Hidrográfica del río Zaza, 2002. Delegación del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Sancti Spíritus, Cuba.

Consejo de Cuenca Provincial; 2014; Consejo Específico. Cuenca hidrográfica del río Zaza. Sancti Spíritus. Cuba.

Domínguez, A.; 2003; Análisis y diagnóstico geoecológico de los paisajes en la provincia de Sancti Spíritus. (pp. 113). La Habana, Cuba: Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en ciencias geográficas. Facultad de Geografía. Universidad de La Habana. Inédito.

Domínguez, A. Z. y Acosta E.; 2012; Características ambientales de la provincia de Sancti Spíritus. En A. Z. Domínguez, M. Torres e Y. G. Puertas de Armas (Eds.), Experiencias en la protección de la biodiversidad y el desarrollo sostenible en la provincia de Sancti Spíritus (pp. 11-43). La Habana, Cuba: Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. ISBN:978-959-287-033-8.

García-Casco, A., Iturralde-Vinent, M., Pindell, J.; 2008; Latest Cretaceous Collision/Accretion between the Caribbean Plate and Caribean: Origin of Metamorphic Terranes in the Greater Antilles. *International Geology Review*: v. 50, n. 9, p. 781-862.

García-Lahera, P. y Pulido E.; 2008; Conservación de la diversidad biológica. En Domínguez, A.Z.; Ceballo, O.; García-Lahera, J.P. y González, I. (Eds.). Situación ambiental provincia Sancti Spíritus (pp. 73-82). Villa Clara, Cuba: Editorial Feijóo, Universidad Central de Las Villas. ISBN: 978-959-250-390-8.

García-Lahera, J. P. y Pulido E.; 2012; Acciones para la conservación de la diversidad biológica. En A. Z. Domínguez, M. Torres e Y. G. Puertas de Armas (Eds.), Experiencias en la protección de la biodiversidad y el desarrollo sostenible en la provincia de Sancti Spíritus (pp. 135-141). La Habana, Cuba: Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. ISBN:978-959-287-033-8.

González, I., Domínguez A. Z., Orozco, A., Pérez, B., García-Lahera, J. P., Pérez A., Hernández, A. y F.; 1999; Diversidad Natural de la Cuenca Zaza. (pp. 73). Sancti Spíritus, Cuba: Delegación del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Sancti Spíritus. Inédito.

González, I.; 2007; Modelo alternativo de diagnóstico para la planificación ambiental en cuencas hidrográficas. Aplicación a las subcuencas Tuinucú-Yayabo, Sancti Spíritus, Cuba. (pp. 132). Ancona, Italia: Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor. Facultad de Agraria. Universidad Politécnica de La Marche. Inédito.

González, I., Díaz, A., y Ceballo, O.; 2012; Experiencias en el manejo integrado de cuencas hidrográficas en Sancti Spíritus. En A. Z. Domínguez, M. Torres e Y. G. Puertas de Armas (Eds.), Experiencias en la protección de la biodiversidad y el desarrollo sostenible en la provincia de Sancti Spíritus (pp. 141-149). La Habana, Cuba: Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. ISBN:978-959-287-033-8.

Goto, K. S. Yamamoto, D. Garcia, R. Rojas-Consuegra. ; 2008; Discovery of the possible Cretaceous/Tertiary boundary spherule layer in the Fomento section, central Cuba. Online: www.soc.nii.ac.jp/jepsjmo/cd-rom/2005cd-rom/.../j033-010_e.pdf.

Goto, K., S. Yamamoto, D. García, R. Rojas-Consuegra ; 2010; Descubrimiento de una capa de esférulas posiblemente del límite K/T en la sección Fomento, Cuba central. Boletín de la Sociedad Cubana de Geología, 10(1): 12-13. ISSN 0864-3636.

Hernández, D. F. (Ed.); 2012; Diagnóstico, para el ordenamiento territorial de la cuenca hidrográfica del río Zaza. (pp. 110). Sancti Spíritus, Cuba: Dirección Provincial de Planificación Física (IPPF). Sancti Spíritus. Cuba. Inédito.

Instituto de Geología y Paleontología (IGP); 2013; Léxico Estratigráfico de Cuba. La Habana. Versión digital CD ROM.

Iturralde-Vinent, M. A.; 1998; Sinopsis de la Constitución Geológica de Cuba. Acta Geológica Hispánica, v. 33 (1998), nº 1-4, pp. 9-56.

Iturralde-Vinent, M.A. (Ed.); 2012; Compendio de Geología de Cuba y del Caribe. Segunda Edición. DVD-ROM. Editorial CITMATEL, La Habana, Cuba.

Meléndez Hevia, A., J. A. Arz, I. Arenillas, L. Menéndez, R. Rojas-Consuegra, J. M. Grajales-Nishimura, M. C. Rosales y Ceballo O.; 2013; Depósitos de grainflow unidireccionales en una unidad clástica relacionada con el impacto de Chicxulub en Fomento, provincia de Sancti Spíritus (Cuba). Resumen en: X Congreso Cubano de Geología, V CONVENCION CUBANA DE

CIENCIAS DE LA TIERRA, GEOCIENCIAS'2013. Memorias en CD-Rom, La Habana, 1 al 5 de abril de 2013. GEO2-3. 1p. ISSN 2307-499X.

ONEI ; 2015 ; Panorama Ambiental. Cuba 2015.

Orozco, A. y García-Lahera J. P.; 2012; Biodiversidad: conocimiento actual de la flora y la vegetación natural. En A. Z. Domínguez, M. Torres e Y. G. Puertas de Armas (Eds.), Experiencias en la protección de la biodiversidad y el desarrollo sostenible en la provincia de Sancti Spíritus (pp. 93-107). La Habana, Cuba: Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. ISBN:978-959-287-033-8.

Pérez, J. B. y Hernández, A.; 2012; Estado de los conocimientos sobre la fauna de la provincia. En A. Z. Domínguez, M. Torres e Y. G. Puertas de Armas (Eds.), Experiencias en la protección de la biodiversidad y el desarrollo sostenible en la provincia de Sancti Spíritus (pp. 107-134). La Habana, Cuba: Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. ISBN:978-959-287-033-8.

Puerta de Armas, Y. G.; 2004; Estudio ambiental para la planificación y gestión sostenible de la cuenca hidrográfica del río Zaza. (pp. 100). La Habana, Cuba: Tesis de Diploma. Facultad de Geografía. Universidad de La Habana. Inédito.

Rojas, R.; 2005; Aval para la categorización y protección patrimonial de sitios de interés paleontológicos. Museo Nacional de Historia Natural. La Habana, Cuba. Inédito.

CAPÍTULO 4

Capítulo 4. Uso de la herramienta AQUATOOL+ para la gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca hidrográfica del río Zaza

Para la realización de este capítulo se participa junto a estudiantes y profesores del Curso de Pregrado en Ciencias Ambientales y del Master en Recursos Hídricos y Medio Ambiente de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Málaga, España; en cuatro (4) investigaciones que aportaron una valiosa experiencia para la gestión de los recursos hídricos y del medio ambiente en Cuba; con la implementación del Programa de Voluntariado Internacional en Cooperación para el Desarrollo de la Universidad de Málaga, a través del proyecto, “Estudio y mejora de la planificación y gestión de los recursos hídricos en la cuenca hidrográfica del río Zaza (Cuba). Definición de políticas y estrategias de adaptación a los futuros impactos del cambio climático global (ESGEREHIZA)”.

El proyecto financiado por la Junta de Andalucía y la Universidad de Málaga, curso académico 2015/2016, expone como objetivo general:

- La caracterización de los sistemas hídricos superficiales y subterráneos de la cuenca del río Zaza, incluidos los procesos relacionados con los riesgos hidrológicos y geológicos como las inundaciones, para que pueda llevarse a cabo una gestión hídrica integrada que tenga en cuenta estrategias de adaptación a los efectos producidos por el cambio climático.

Los resultados en el trabajo de campo y procesamiento de importantes bases de datos primarias, uso de programas computacionales como el Sistema de Soporte a la Decisión, “AQUATOOL+”, y otras metodologías y herramientas por primera vez obtenidas y aplicadas para la cuenca hidrográfica del río Zaza y en Cuba; fueron implementadas con el apoyo institucional y organizativo de la Universidad de Málaga, la Universidad de Sancti Spíritus, la Delegación del Ministerio de Ciencias, Tecnología y Medio Ambiente, la Unidad de Medio Ambiente, el Centro Meteorológico Provincial, la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico, el Centro de Servicios Ambientales, el Jardín Botánico, el SPAP y otras Instituciones y Organismos de la Administración Central del Estado (OACEs) en la provincia Sancti Spíritus y del nivel nacional. Además, con la colaboración y participación en los resultados obtenidos de la Università Politecnica della Marche, Italia.

4.1. Metodología utilizada

Para la simulación de la gestión de los recursos hídricos de una cuenca, utilizando el software “AQUATOOL+” es necesario realizar diferentes pasos que incluyen un exhaustivo tratamiento de datos,

para obtener los elementos básicos que requiere el modelo, así como su calibración para verificar que se ajusta a la realidad.

Las simulaciones se basan en diferentes alternativas planteadas para optimar la gestión de los recursos hídricos en la cuenca hidrográfica del río Zaza y obtener las mejores garantías de poder suministrar las distintas demandas.

Modelo de simulación de la gestión de los recursos hídricos

Se trata de un modelo diseñado para la gestión de los recursos hídricos procedentes de todas las fuentes posibles (utilización conjunta) de una cuenca, cuyo objetivo principal es optimizar el uso de los recursos disponibles, para aumentar las reservas mediante acciones estructurales (Andreu et *al.*, 1996).

Dicho modelo se construye considerando las singularidades que caracterizan a la cuenca Zaza, incluyendo la posibilidad de atender una zona de demanda con recursos de distinto origen, estableciendo prioridades de abastecimiento entre los distintos usos, integrando los acuíferos en el esquema de gestión –en este caso, debido a la escasa información disponible, acuíferos conectados hidráulicamente al sistema superficial para registrar las filtraciones incluidas en el modelo, se consideran depósitos aislados donde no se producen intercambios, ya que estos se desconocen–, fijando los requisitos mínimos para asegurar el buen estado ambiental de los cauces e incorporando otros usos no consuntivos, como los aprovechamientos hidroeléctricos al esquema general, todo ello con el propósito de representar lo más fiel posible la complejidad del sistema (Andreu et *al.*, 1994).

Para la creación del modelo se utiliza el software AQUATOOL+, el cual es una interface concebida para dicho fin que permite la edición, simulación, revisión y el análisis de alternativas de gestión de los recursos hídricos para cuencas hidrográficas (Andreu et *al.*, 2007). Este software se incluye en un grupo de herramientas denominadas Sistema de Soporte a la Decisión (DSS, por sus siglas en inglés), las cuales tratan de integrar la modelización como herramienta fundamental para los gestores del medio ambiente a la hora de abordar una problemática ambiental (de Kok y Wind, 2003).

Además, constituye el principal programa utilizado en España por la mayor parte de confederaciones hidrográficas, como las del Tajo y el Segura (donde además se llevó a cabo el desarrollo y validación del modelo de simulación) y otras como las del Ebro, Duero, Júcar y las Demarcaciones Hidrográficas (DH) de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas, para la gestión eficiente de sus recursos hídricos, lo cual da buena cuenta de la robustez del mismo (Andreu et *al.*, 1996).

4.1.1. Fundamentos del modelo SIMGES de AQUATOOL+

La extensión del software AQUATOOL+ encargada de ejecutar las simulaciones es el modelo de cálculo SIMGES, que reproduce a escala de tiempo mensual, el funcionamiento de la cuenca estudiada a partir del esquema topológico que se ha diseñado en AQUATOOL+, el cual está compuesto por todos los elementos hidrológicos reales –elementos de almacenamiento superficiales y subterráneos, de captación, de transporte, de consumo y de recarga artificial, si procede– dispuestos en el espacio de forma que dicho esquema reproduzca al sistema hidrológico real.

La simulación se efectúa de forma que el flujo a través de los subsistemas superficiales sea calculado por balance (considerando también las pérdidas por evaporación), mientras que para los subsistemas subterráneos es simulado mediante modelos de celda unicelular, cuantificando tanto las entradas (infiltraciones) como las salidas de volúmenes de la celda (extracciones). Debido a la ausencia de información disponible, para la cuenca Zaza, acerca de la relación entre aguas superficiales y subterráneas, no es posible tener en cuenta las filtraciones en embalses y cauces, considerándose nulo el intercambio de aguas entre ambos sistemas; a excepción de las bases de datos de volúmenes mensuales infiltrados que se introduce al modelo para cada acuífero definido.

La simulación y gestión del sistema de aguas superficiales se efectúa simultáneamente mediante el uso de un algoritmo de optimización de redes de flujo conservativo. Dicho algoritmo sirve para determinar el flujo en el sistema atendiendo a unas reglas de operación que tratan de mantener un nivel de llenado en los embalses a partir de unas curvas de zonación de embalse que se definen cuando se introduce el elemento durante la construcción del esquema topológico (Andreu et *al.*, 2007). El algoritmo determina el flujo respetando también los caudales ecológicos o sanitarios impuestos y las diferentes prioridades de abastecimiento otorgadas a las distintas demandas.

El esquema topológico de la cuenca, es un sistema abierto, en el que hay nudos donde se produce almacenamiento (embalses) y salidas (tomas de abastecimiento y las propias desembocaduras de los ríos). El algoritmo de SIMGES opera sobre redes de flujo cerradas, por lo que la primera tarea que realiza el modelo es readaptar dicho sistema abierto para que cumpla el requisito de ser conservativo. El resultado será una red de flujo interna más compleja que la que ha sido diseñada y que será sobre la cual trabaja el modelo, pero que no conlleva mayores implicaciones a la hora de operar SIMGES.

Durante la simulación, el algoritmo resuelve la gestión del sistema por optimización utilizando una función objetivo que trata de minimizar la suma de una serie de términos correspondientes a cada tipo de elemento –embalses, tramos de río tipo 1, tramos tipo 2, demandas consuntivas, demandas no consuntivas, bombeos y recargas artificiales, si proceden–, y que busca de esta forma satisfacer las

demandas, al mismo tiempo que adaptarse al máximo a las condiciones óptimas de llenado de embalses. El desarrollo matemático de las ecuaciones que acompañan a cada término de la función objetivo puede ser consultado en el manual del modelo SIMGES (Andreu et *al.*, 2007).

Respecto al modo de operar con las demandas, como consecuencia de esta función objetivo, en la que cada término se explica como una suma de costes⁴, un déficit en una demanda de mayor prioridad (menor número) supone mayores costes y, por tanto, mayor desvío del objetivo de minimización. Así, el modelo tratará de satisfacer en primer lugar las demandas con número de prioridad menor, pero satisfaciendo antes los caudales ecológicos o sanitarios, puesto que estos priman a las demandas consuntivas y un déficit sobre este elemento se traduciría en mayores costes. Igualmente, el modelo SIMGES establece grupos isoprioritarios con las demandas que comparten el mismo número de prioridad, y en caso de registrarse un déficit en el suministro, el agua disponible se repartirá entre las demandas de un grupo de forma proporcional al valor punta (mayor demanda mensual en un año) que cada una presente.

Aplicando, igual razonamiento al mantenimiento de los niveles de llenado de embalses, tendrá mayor coste mantener un embalse de máxima prioridad en la zona de llenado óptimo, dejando a otro de menor prioridad en la zona de reserva, que mantener a ambos en la misma zona de llenado, aunque ésta no sea la óptima. Por tanto, el algoritmo tenderá a mantener a todos los embalses en la misma zona de llenado, y ya dentro de ella desembalsar primero el que tenga mayor número de prioridad (o lo que es igual, el menos prioritario). Además, el algoritmo, regido por la función objetivo de minimizar costes, permitirá desembalsar agua para satisfacer demandas de todas las zonas excepto de la de reserva, la cual solo será usada para cumplir caudales ecológicos o sanitarios.

Además de la función objetivo, SIMGES resuelve la gestión de otros elementos –evaporación de embalses, filtraciones, simulación de acuíferos y reglas de operación tipo alarma-restricción– sometiendo la solución de la función objetivo a un proceso iterativo para adaptarla a las condiciones impuestas por estos elementos (Andreu et *al.*, 2007). En el caso concreto de las reglas de operación tipo “alarma-restricción” consiguen modificar sensiblemente el resultado de la gestión, puesto que éstas pueden cambiar las asignaciones de agua de forma arbitraria (alterándose el orden de prioridad de los grupos isoprioritarios) en función de que se active el estado de alarma por escasez de recursos en la fuente que suministre a las demandas afectadas.

⁴ El concepto de costes que utiliza el modelo *SIMGES* para simular la gestión del sistema hace referencia al peso que cada variable de la función objetivo de minimización suma a la misma y que, por tanto, el algoritmo tratará de aumentar el valor de las variables de la función objetivo cuyo peso (costes) sea menor con el objetivo de mantener la función objetivo al mínimo posible. Es necesaria esta aclaración para no interpretar dicho concepto como costes económicos.

4.1.2. Criterios de garantía de abastecimiento

Cuando la simulación finaliza, se procede con el cálculo de garantías de abastecimiento. Éstas se calculan de forma mensual para las conducciones sometidas a un caudal ecológico, y de forma mensual y volumétrica para las demandas consuntivas.

La garantía mensual se obtiene con la fórmula:

$$G_m = \left(1 - \frac{\text{n}^\circ \text{ de fallos}}{\text{n}^\circ \text{ de meses totales}}\right) * 100$$

Donde el número de fallos se calcula como el número de meses con fallo del total de meses simulados. En el caso de garantía de un caudal ecológico, se considera fallo cuando no se alcanza el caudal mínimo mensual, teniendo en cuenta un nivel de déficit admisible que se defina; es decir, se contará fallo cuando el déficit sobre el caudal mínimo supera el nivel de déficit de caudal mínimo admisible. En el caso de garantía de abastecimiento de una demanda, se considera fallo cuando el déficit mensual sea mayor que un porcentaje (A%) que se defina sobre la demanda mensual.

La garantía volumétrica se calcula como:

$$G_v = \frac{\text{volumen suministrado}}{\text{volumen total demandado}} * 100$$

Atendiendo, al criterio marcado por la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH) del 2008 para Planes Hidrológicos⁵, el modelo calcula una garantía de tipo anual, que cuenta como fallo los años en los que se produce alguno de los siguientes supuestos: 1) que en algún mes el déficit supere un porcentaje (B%) definido de la demanda mensual, 2) y/o que el déficit anual supere un porcentaje (C%) definido de la demanda anual. Esta misma, IPH del 2008, fija un criterio restrictivo de cumplimiento para las demandas urbanas según el cual el déficit, durante toda la simulación, no debe superar en un mes, el 8% de la demanda mensual; ni en 10 años, el 10% de la demanda anual.

Por último, se calcula una garantía según un criterio denominado “Utah DWR”, (Estrada, 1991), la cual considera fallo cuando se produce alguno de los siguientes supuestos: 1) que en un año el déficit supere un porcentaje (D%) definido de la demanda anual, 2) que en dos años consecutivos el déficit supere un porcentaje (E%) de la demanda anual, 3) y/o que en 10 años consecutivos el déficit supere un porcentaje (F%) de la demanda anual. La IPH del 2008, establece para demandas agrarias

⁵ Debido a que no existe la definición de criterios de garantía en la normativa cubana, se decide utilizar como referencia los criterios de garantías para demandas urbanas y agrícolas propuestos por la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH) vigente en España.

valores de $D > 50\%$, $E > 75\%$ y $F > 100\%$ como fallo en el cumplimiento del criterio de garantía tipo Utah DWR.

4.2. Construcción del modelo

La construcción del esquema topológico de la cuenca Zaza, constituye la base elemental del modelo de simulación, el cual supone un exhaustivo tratamiento de datos –hasta el punto de ser la parte del trabajo que necesita mayor dedicación– para generar los archivos de información que el programa requiere, así como para recopilar otros datos e información de carácter técnico acerca de las infraestructuras de la red, disponibles por la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Sancti Spiritus (EAHSS), gestor del balance de agua en la cuenca.

A continuación, se exponen las sucesivas etapas del diseño de dicho esquema, se detallan las tareas realizadas para completar cada una de ellas, y se incluye el modelo para la cuenca hidrográfica del río Zaza y su la calibración, según (Alarcón, 2016).

4.2.1. Etapas del diseño y tratamiento de datos

Nudos

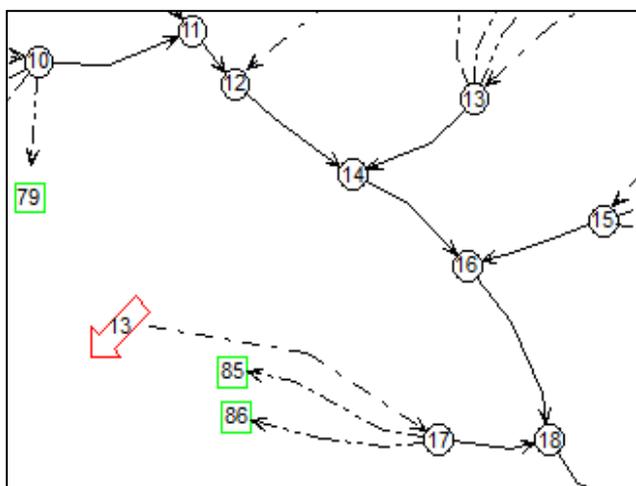


Figura 24. Nudos de un segmento del modelo (círculos del 10 al 18).

dónde se producen esas conexiones ya descritas.

Puesto que el organismo que administra las cuencas, la EAHSS, no dispone de un inventario de la red completa del drenaje de las mismas, para identificar los afluentes que aportan agua a los ríos principales se ha recurrido al uso de los sistemas de información geográfica (GIS, por sus siglas en inglés).

El primer elemento con que se comienza a diseñar el modelo, es el nudo. Los nudos son puntos significativos del esquema, como confluencias de ríos o conducciones, puntos de entrada de flujo (aportaciones superficiales y bombeos de acuíferos), o puntos de salida (lugar al que se conectan las tomas de demandas), por lo que se les podría considerar como las articulaciones del modelo, **Figura 24**.

Para colocarlos se necesita conocer, previamente, cómo se configuran las cuencas y

A partir del modelo digital del terreno (MDT) para la cuenca hidrográfica del río Zaza –se pueden deducir las divisorias de las aguas– se digitaliza el área de las subcuencas de los afluentes identificados por la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico; generándose en GIS el área de las subcuencas que permite conocer la posición que ocupan en el esquema del sistema y, por tanto, colocar los nudos correspondientes en el modelo.

El resto de nudos se sitúan en aquellos puntos clave donde se producen tomas para abastecer demandas, se unen conducciones, se vierte el agua de los embalses o retornan las aguas turbinadas por la Pequeña Central Hidroeléctrica (PCHE).

Embalses

Los embalses son nudos (puntos de entrada y salida de flujo) con capacidad de almacenamiento, **Figura 25**. Para su inclusión en el modelo, se deben introducir datos físicos diversos (número de prioridad, tasa de evaporación mensual y caudal máximo de sueltas, entre otros), información respecto al volumen máximo, mínimo y objetivo definibles para cada mes (permitiendo así considerar resguardos de avenidas temporales) y datos batimétricos para obtener las curvas, cota-

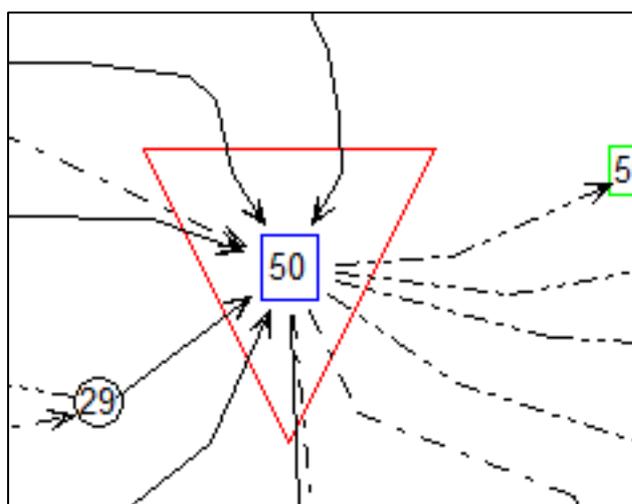


Figura 25. Representación del embalse Zaza en el modelo.

superficie-volumen, que permiten al modelo conocer la morfometría del embalse.

La tasa mensual de evaporación fue calculada con la serie histórica de datos (1979-1993) de la estación hidrometeorológica embalse Zaza, (actualmente no operativa), y datos técnicos e históricos pertenecientes al Departamento de Balance Hídrico de la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico Sancti Spíritus (EAHSS).

Aportaciones

Las aportaciones, son flujos de agua superficial que se van incorporando al sistema a través de los nudos, es decir, los afluentes de los ríos estudiados, **Figura 26**. Para cada uno, el modelo requiere una base de datos que contenga los caudales mensuales registrados durante el periodo simulado.

La obtención de dichos datos supone un proceso largo y complejo, ya que la información hidrométrica es muy escasa (sólo dos estaciones hidrométricas en la cuenca Zaza), por lo que, se decide utilizar los registros pluviométricos disponibles en formato digital, para la cuenca Zaza (excluyendo previamente los pluviómetros con series muy cortas y discontinuas y asegurando una buena representatividad), y se estima, para cada subcuenca, la precipitación media mensual (octubre de 1995 - septiembre de 2015).

El área de cada subcuenca se calcula con la herramienta de análisis espacial disponible en sistema de información geográfica (GIS, por sus siglas en inglés); y para estimar la precipitación media de dichas superficies se recurre al método de los Polígonos de Thiessen, el cual permite que el área representativa para cada pluviómetro no varíe para cada mes; pueden ser utilizados otros métodos, como el de curvas de isoyetas.

Una vez conocida la precipitación media mensual para cada subcuenca, se estima la escorrentía generada utilizando un coeficiente de escorrentía determinado para la estación hidrométrica Paso Ventura, situada en la cuenca alta del río Zaza, en un tramo fluvial donde la litología mayoritaria es carbonatada-terrágena y, por tanto, representativa de las condiciones generales de la cuenca Zaza. Este coeficiente se ha medido de forma anual desde que se realizan los registros hidrométricos, comparando la lámina de precipitación (mm/año) con la lámina de escorrentía (mm/año) medidas en dicha estación hidrométrica, por lo que a cada año del periodo simulado se le aplica su correspondiente coeficiente de escorrentía y así ésta viene estimada mensualmente en cada subcuenca, obteniéndose la base de datos con los volúmenes mensuales que requiere el modelo para cada aportante.

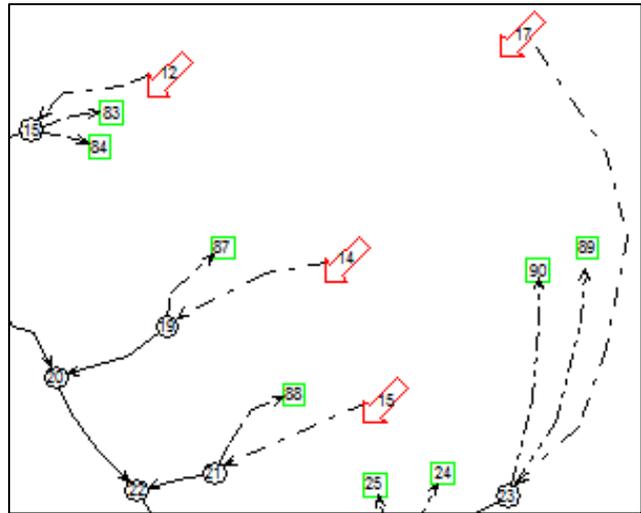


Figura 26. Representación de las aportaciones en el modelo (flechas rojas).

Demandas

Las demandas son los elementos del modelo que consumen agua, **Figura 27**. Para el diseño de estos elementos se necesita realizar una clasificación de todas las demandas en primer lugar por fuentes (embalses, ríos y acuíferos) y, a partir de ésta, una clasificación por usos (demandas urbanas, agropecuarias e industriales), permitiendo así asociar cada demanda al punto del que toman el agua y, posteriormente (al introducir las tomas en el modelo) asignar prioridades de suministro a las diferentes agrupaciones definidas.

En relación a esto último, se asigna prioridad uno (1) al abastecimiento urbano, prioridad dos (2) a demandas agropecuarias y prioridad tres (3) a demandas industriales y otros usos no especificados. Esta priorización sirve para indicarle al modelo qué demandas suministrará primero durante la simulación, lo cual es esencial durante los periodos deficitarios.

En el caso particular de las demandas que toman el agua de forma directa de los cauces, para poder

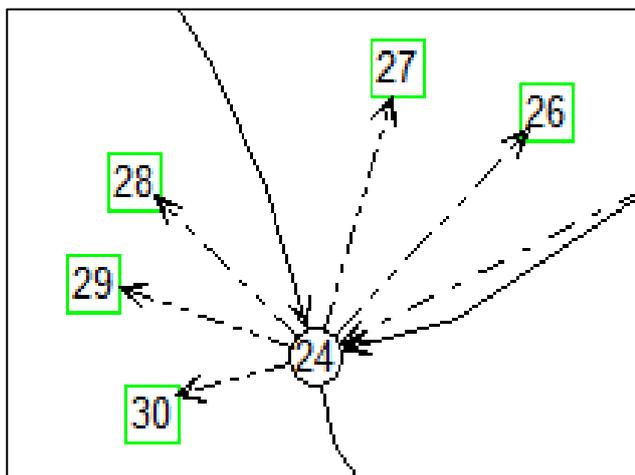


Figura 27. Representación de las demandas en el modelo (cajas verdes). Las flechas discontinuas son las tomas.

asociarlas con la subcuenca de la que se abastecen se recurre, con la ayuda de los (GIS, por sus siglas en inglés) al posicionamiento geográfico mediante coordenadas (X, Y), puesto que existe un registro de usuarios donde se indica dichas coordenadas, pero no explícitamente en qué subcuenca se incluyen, que es el objetivo de este trabajo (asociar las demandas a su fuente).

Al incluir una demanda en el modelo, es necesario definir la demanda bruta mensual, los umbrales de cumplimiento de garantía permitidos

y las reglas de ahorro para los momentos de la simulación en que se necesite ahorrar agua. Respecto a las garantías, se deben indicar los porcentajes de déficit asumibles respecto el volumen demandado, a partir de los cuales dicha garantía se incumple, tanto para la mensual como la anual y las específicas para demandas agrícolas tipo “Utah DWR” y urbanas tipo IPH del 2008.

En relación a las reglas de ahorro (regla de operación alarma-restricción), en una de las alternativas de gestión que se plantean se ha introducido una (1) por la cual, en función del volumen mensual medido en el embalse Zaza, se aplicará un coeficiente de restricción en las principales agrupaciones de demandas agrícolas, que será mayor cuanto menor sea el volumen almacenado.

Tomas

Las tomas son elementos del modelo que conectan las demandas con las fuentes que las abastecen. Si ésta es un embalse, la toma la conectará con la demanda, y si es un río o un acuífero, la toma conectará a la demanda con el nudo que va a posibilitar la salida del flujo hacia la misma. En el caso del abastecimiento urbano, la toma representa también la Estación de Tratamiento de Agua Potable (ETAP) correspondiente, reflejando por tanto las limitaciones volumétricas de capacidad que corresponda. Las demandas pueden abastecerse con una o con varias tomas, conectadas a la misma o a distintas fuentes, y a cada una asignarle el mismo orden de prioridad o uno distinto, con el objetivo de flexibilizar el sistema y proceder de una u otra forma en función de los recursos disponibles en cada momento de la simulación.

Los datos que aportan al incluir una toma al modelo son: 1) el caudal punta mensual, que indica el caudal máximo que puede suministrarse por mes, 2) la dotación anual, que igualmente indica la capacidad anual máxima de abastecimiento que permite la toma, y 3) el número de prioridad de ésta, relacionado con el grado de importancia de la demanda, en caso de producirse una situación de déficit y no poder suministrar todas las demandas que dependen de una misma fuente. En el modelo diseñado, las demandas que reciben mayor prioridad son las urbanas, seguidas por las agropecuarias y, en tercer lugar, las industriales y otros usos.

Central hidroeléctrica

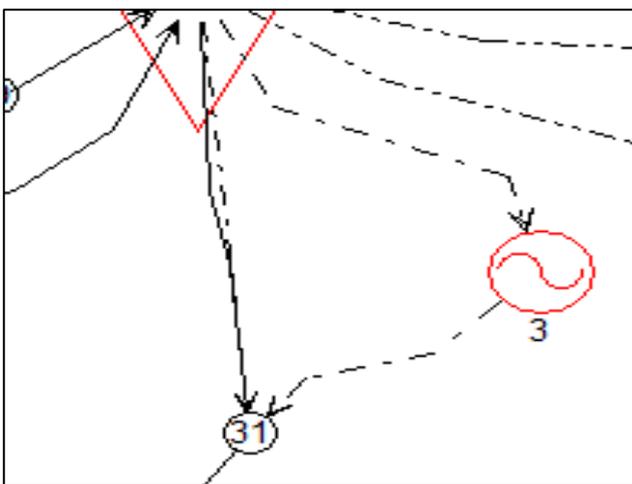


Figura 28. Central hidroeléctrica en el modelo (3), a los pies del embalse Zaza.

La central hidroeléctrica es considerada una demanda no consuntiva, puesto que toma el agua y la reintegra in situ, sin afectar al flujo continuo, **Figura 28.** La cuenca Zaza dispone de una Pequeña Central Hidroeléctrica (PCHE), a los pies del dique del embalse Zaza, aprovechando el caudal que se suministra al canal Magistral, el cual es turbinado antes de ser entregado a éste. Por tanto, el canal Magistral comienza a la salida de la PCHE, donde recolecta el agua que ésta libera.

Al incluir la PCHE en el esquema, solo hay que aportar datos referentes al caudal objetivo mensual, que debe coincidir con el caudal suministrado al canal Magistral, para abastecer la demanda agraria, otras demandas, y la cota mínima de turbinado, que marca la cota de la lámina de agua en el embalse, necesaria para garantizar el funcionamiento de

la PCHE, y que en este caso es de 30,06 m.s.n.m., correspondiente a un volumen de 300 hm³ embalsados (de los 1 020 hm³ de capacidad del embalse Zaza).

Conducciones

Las conducciones representan los cauces fluviales de las cuencas, sean naturales o canales artificiales. Conectan todos los nudos (de almacenamiento o no) del esquema topológico, por lo que constituyen el esqueleto del modelo,

Figura 29. El sistema permite definir conducciones conectadas hidráulicamente con el acuífero subyacente, o conducciones impermeables, que consideran nulas las filtraciones. En este estudio, ha sido necesario simplificar esta cuestión y representar los cauces en el modelo con conducciones impermeables,

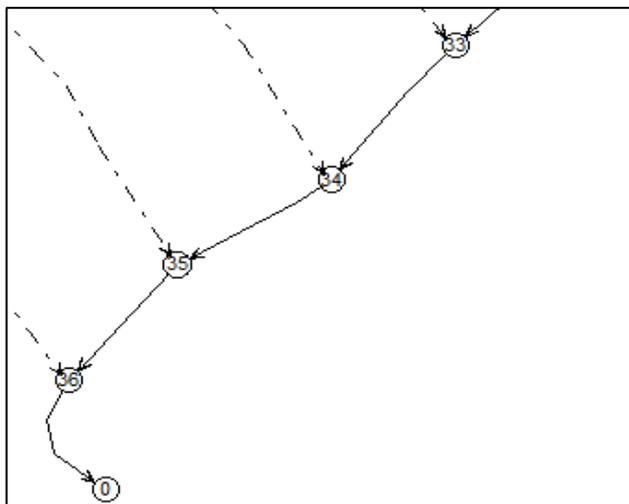


Figura 29. Conducciones conectando varios nodos del río Zaza.

puesto que no hay información disponible acerca del comportamiento hidráulico (tramos ganadores, perdedores o neutros). Tan solo se han introducido conducciones filtrantes para la definición de los sistemas acuíferos.

Para su inclusión en el modelo, solo es necesario que exista un nudo inicial y otro final, introduciéndose tantos segmentos de conducciones como nudos haya que conectar en el esquema. AQUATOOL+ permite definir los caudales mínimos y máximos mensuales, el primero necesario para los casos que se exija el cumplimiento de un caudal ecológico o sanitario, y el segundo para cuando se quiera limitar la capacidad de conducción de un canal artificial.

Respecto al cumplimiento de los caudales ecológicos o sanitarios, AQUATOOL+ define reglas de operaciones sobre las conducciones para que, en situación de escasez de recursos, se reduzcan dichos caudales de forma excepcional.

Acuíferos

Debido a la escasa información hidrogeológica disponible, se selecciona, de entre los diversos modelos matemáticos para la simulación del comportamiento de los acuíferos, uno de los más básicos, en cuanto a que requiere menor cantidad de datos, pero igualmente eficaz. El modelo unicelular considera al acuífero un depósito aislado, pero conectado hidráulicamente con el sistema superficial.

Para introducir estos acuíferos en el modelo, **Figura 30**, se incluye a la vez un elemento aportación (con su correspondiente base de datos de los volúmenes mensuales infiltrados), que representa el agua que se ha estimado que se infiltra; un nudo inicial, que recibe el agua de dicha aportación; una conducción de tipo permeable, que asume que las filtraciones son del 100% (para filtrar al acuífero todo el agua que se ha introducido al modelo por la aportación); y un nudo final, para cerrar este circuito ficticio que tiene como objetivo ejecutar el proceso de filtración desde el sistema superficial que, cabe recordar, se ha considerado impermeable en la construcción del modelo como simplificación necesaria.

La base de datos de volúmenes de infiltración mensual para cada acuífero se estima por balance

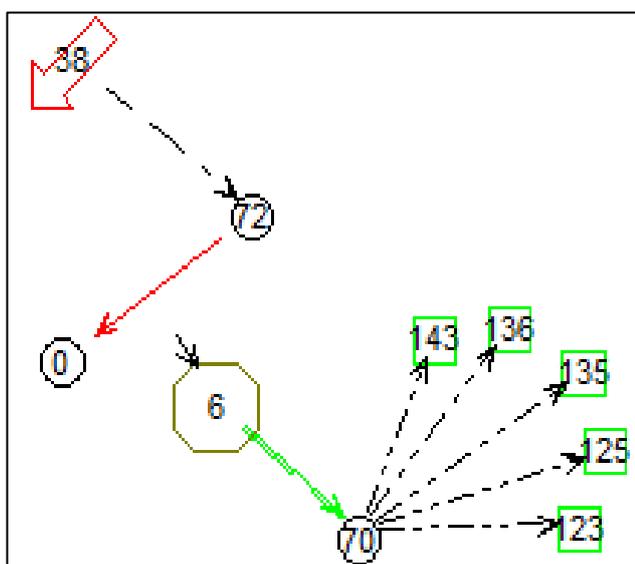


Figura 30. Esquema del acuífero: la aportación (38), el nudo inicial (72), la conducción permeable (flecha roja), el nudo final (0) y el acuífero (6). La flecha verde que parte del acuífero representa el bombeo.

hídrico. Una vez conocidas las precipitaciones (P) y la escorrentía (R) por subcuenca, se utilizan los datos de evapotranspiración (ETP) de la estación meteorológica Sancti Spiritus.

La infiltración (I) se calcula como:

$$I_{(mm)} = P_{(mm)} - R_{(mm)} - ETP_{(mm)}.$$

Conociendo el área de las distintas subcuencas que alimentan a cada acuífero (relación que ha sido previamente calculada superponiendo en (GIS, por sus siglas en inglés) las superficies de los acuíferos, con las superficies de las subcuencas) y operando con el calculador de áreas, se puede determinar el volumen que se infiltra en cada unidad hidrogeológica.

Bombeos

Los bombeos se incluyen en el modelo para extraer el agua de los acuíferos y ponerla a disposición de las demandas, siendo necesario insertar un nudo a través del cual añadir el agua al sistema superficial. Al introducir un bombeo para un acuífero, hay que indicar el caudal máximo de bombeo mensual, relacionado con la capacidad instalada y con el impacto negativo admisible en los volúmenes almacenados.

Reglas de operación

Las reglas de operación son elementos de restricción aplicables en situación de escasez de recursos en todo o en una parte del sistema. Son aplicables sobre los caudales mínimos y sobre las demandas cuando los volúmenes embalsados, aportados por un río o almacenados en los acuíferos se sitúan por debajo de unos límites indicados, con el objetivo de ahorrar agua. Al diseñar una regla, se deben especificar los valores límites relativos al embalse sobre el cual se aplica y el porcentaje de restricción asociado a esos

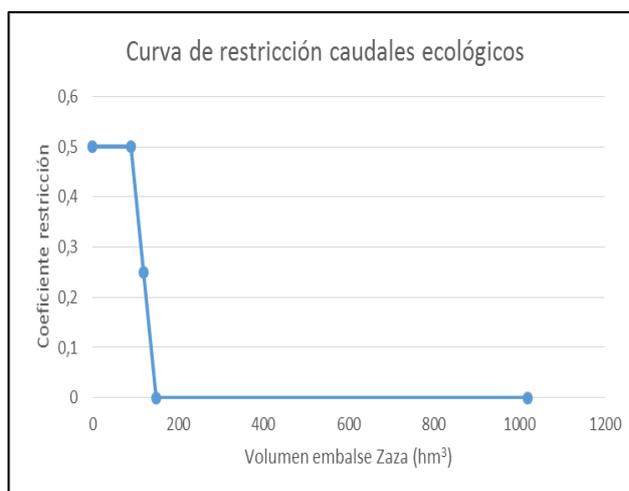


Figura 31. Curva de restricción para los caudales ecológicos o sanitario. **Fuente:** Alarcón, 2016.

valores, para definir así una curva lineal progresiva de la que se sirve el modelo para aplicar o no la restricción y con qué intensidad durante la simulación.

En el modelo diseñado se han incluido dos reglas de operación, una sobre los caudales ecológicos, en Cuba se utiliza el concepto de caudal o gasto sanitario, **Figura 31**, y otra sobre el ahorro para la demanda agrícola, las cuales han sido aplicadas en una o varias simulaciones.

Calibración del modelo

Una vez completado el diseño del modelo y verificado que éste no presenta errores (mediante la opción para la validación del modelo), según (Alarcón, 2016), se realiza la simulación en condiciones reales del sistema con el modelo de cálculo SIMGES; utilizando el hidrograma real histórico de entrada de agua al embalse Zaza para la calibración.

La elección del hidrograma real histórico de entrada de agua al embalse Zaza, para calibrar el modelo obtenido por SIMGES, y no otro, -como pudiera ser el uso de la “evolución del volumen embalsado”-, se debe a que si se utiliza este último, va a responder a unas circunstancias que no se verifican siempre durante el periodo simulado, puesto que en la simulación, se supone que se hace entrega de todas las demandas asociadas anualmente al embalse Zaza hasta que esta alcanza su volumen mínimo definido, cuando en realidad los gestores del embalse, ante la ocurrencia de periodos deficitarios, limitan las entregas previstas para paliar los efectos en los niveles del embalse.

En cambio, no ocurre igual con el hidrograma histórico de entrada de agua al embalse, cuya evolución si debe responder a las condiciones de escorrentía ocurridas en la cuenca durante el periodo simulado. Igualmente, se ha elegido el embalse Zaza y no otro elemento del esquema topológico; por

considerarlo componente principal de todo el sistema cuenca Zaza, por su ubicación en una posición de cierre de la cuenca media, capaz de reflejar la evolución de lo acontecido aguas arriba, por su importante función para el control de avenidas y por los impactos que genera aguas abajo.

El hidrograma de entrada obtenido en la simulación, según Alarcón (2016), se ha comparado con los datos –de la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Sancti Spíritus (EAHSS)– de caudal mensual de entrada de agua al embalse, **Figura 32**. De la comparación, se deduce, que ambos se ajustan satisfactoriamente, si bien el modelo tiende a infravalorar los grandes eventos de avenidas (picos rojos) y a sobrevalorar ligeramente las entradas de numerosos meses del periodo comparado.

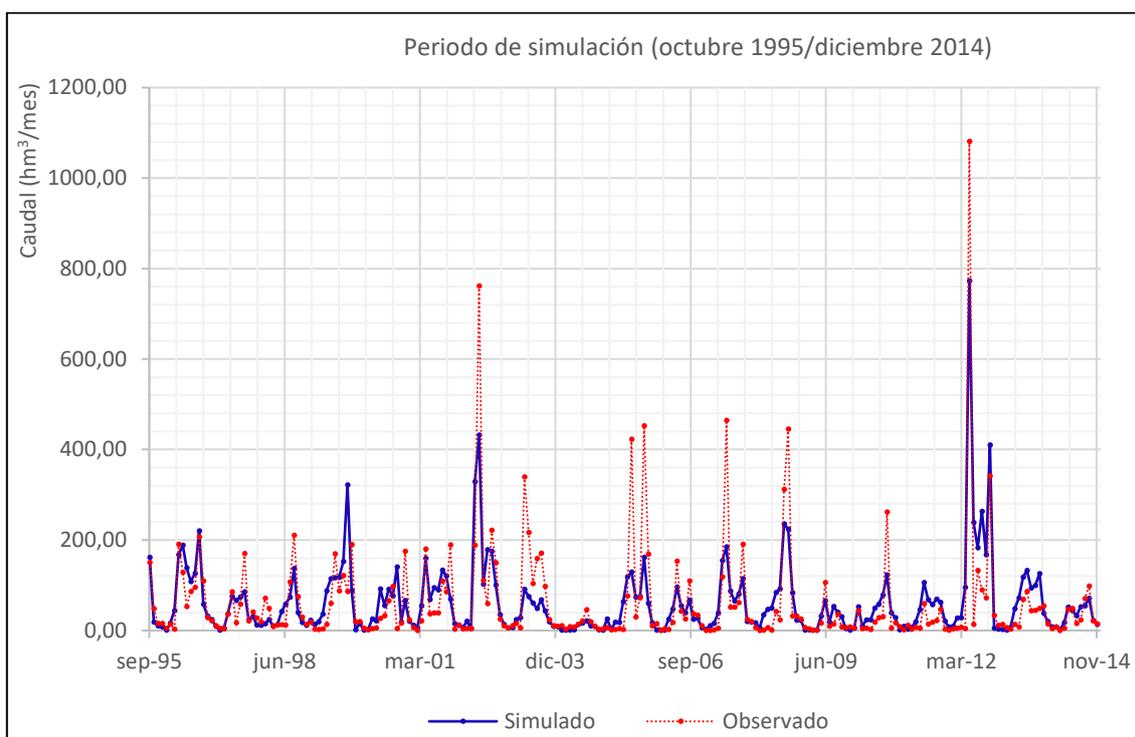


Figura 32. Hidrograma de entrada al embalse Zaza simulado por AQUATOOL+ (en azul) e hidrograma de entrada de agua medido por el organismo gestor del embalse (en rojo). **Fuente:** Alarcón, 2016.

El coeficiente de correlación arroja un resultado $R = 0,82$ (valores de $R > 0,80$ consideran un grado de dependencia alto entre ambas series de datos), mientras que el coeficiente de determinación (grado de correlación entre las variables) mide un $R^2 = 0,67$, lo cual confirma una suficiente bondad del ajuste y validez del modelo (Riu et *al.*, 2001).

Si se calcula el grado de ajuste mediante el coeficiente de eficiencia (E) –más conocido como coeficiente Nash-Sutcliffe–, el cual es el utilizado habitualmente para la calibración de modelos hidrológicos (Nash y Sutcliffe, 1970). Éste coeficiente, mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación, para el caso de estudio según (Alarcón 2016), arroja

un valor de coeficiente Nash-Sutcliffe = 0,65, en línea con el valor del coeficiente de determinación R^2 .

Molnar (2011), cifra los valores referenciales del coeficiente Nash-Sutcliffe y define cinco categorías de ajuste para valores de E comprendidos entre 0 y 1, desde un ajuste insuficiente ($E < 0,2$) hasta un ajuste excelente ($E > 0,8$). Atendiendo a esta clasificación, se puede considerar para el modelo diseñado, según Alarcón (2016), un grado de ajuste, muy bueno ($0,6 < E < 0,8$).

El modelo de simulación podría ajustarse más a la realidad y obtener así valores de E y R^2 superiores si se estudiase, según Alarcón (2016):

- i. Cómo se produce la conexión hidráulica entre los subsistemas superficial y subterráneo en las subcuencas y cómo definir tramos de ríos filtrantes ganadores o perdedores en el modelo.
- ii. Considerar que se producen ligeros desajustes mes a mes en el hidrograma debido a que se ha estimado una variable continua (generación de escorrentía en el tiempo) de forma discreta (generación de escorrentía mes a mes a partir de los datos de precipitación mensual), esto influye negativamente en el ajuste.
- iii. Y, por último, el hidrograma es fruto de una simulación que considera unas demandas sobre el embalse Zaza y aguas arriba constantes durante todo el periodo, cuando esto no es real en la praxis de gestión del balance de agua (las demandas anuales en la cuenca Zaza evolucionan a lo largo del tiempo y las entregas se cumplen en mayor o menor grado en función del estado del sistema).

4.3. Simulación ejecutada aguas abajo de embalse Zaza

A partir del resultado de la calibración y tras aceptar la validez del modelo, se simula usando el modelo, AQUATOOL+, la gestión de los recursos hídricos aguas abajo del embalse Zaza en la cuenca hidrográfica del río Zaza, **Figura 33**.

El periodo escogido (octubre 2013-julio 2015) coincide con la ocurrencia de un evento de sequía en la región central de Cuba (2014-2016) y la observación en el tiempo de un retroceso en la línea de costa, el deterioro del bosque de mangle e impactos negativos en otros ecosistemas de la zona costera asociados al delta del río Zaza a partir de: **1)** la construcción del embalse Zaza en 1973 y sistemas de riego y drenaje asociados, **2)** la agricultura intensiva de altos insumos para la producción de arroz y caña de azúcar, **3)** la construcción de sistemas de lagunas artificiales para la producción de camarón, **4)** la ganadería y **5)** los asentamientos humanos.

El delta del río Zaza está estrechamente vinculado a la dinámica fluvial y muy condicionado por la gestión que se realice en el embalse. La construcción de la misma, supuso una barrera insalvable al flujo de agua dulce, responsable de contener la intrusión salina y al aporte natural de sedimentos

terrágenos y energía necesarios para la regeneración continua del delta frente la acción erosiva del mar.

No obstante, la situación podría revertirse si como medida de gestión de la cuenca Zaza se incluyese un programa de sueltas controladas que actuase como avenidas regeneradoras del cauce natural del río y por ende de la zona deltaica.

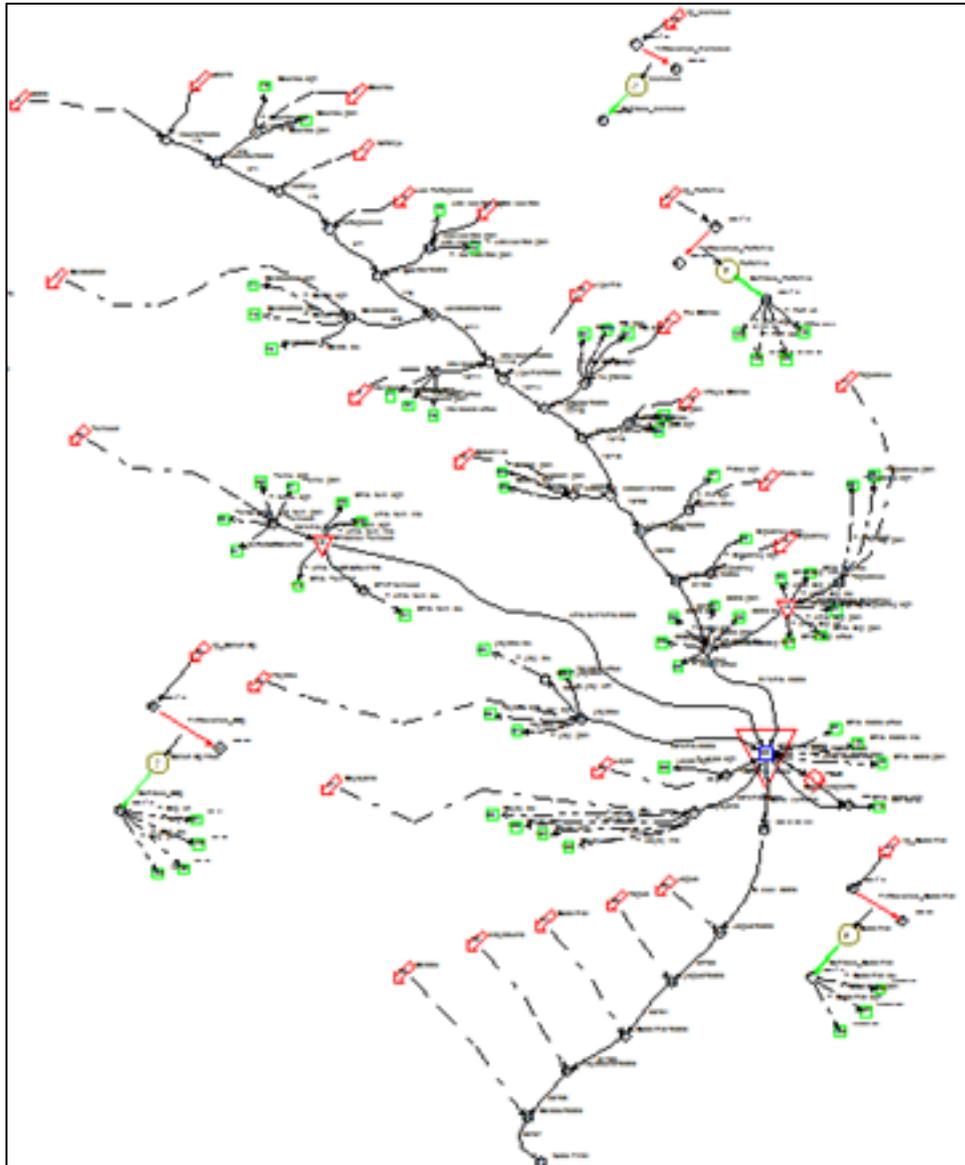


Figura 33. Esquema topológico, cuenca Zaza, para simulación con AQUATOOL+. **Fuente:** Alarcón, 2016.

4.3.1. Volumen almacenado

La evolución del volumen almacenado en el periodo temporal seleccionado (octubre 2013-julio 2015), considerando que se cumplen todas las demandas asociadas al embalse Zaza, se presenta en la **Figura 34.**

Se aprecia que, tras finalizar el año hidrológico 2012/2013 con el máximo volumen permitido de 920 hm³ establecido por la Empresa de Aprovechamiento Hídrico Sancti Spiritus (EAHSS), y el posterior vaciado correspondiente al periodo poco lluvioso o invernal y de mayor demanda agrícola, los niveles no se recuperan durante el periodo lluvioso del año 2014, por las escasas precipitaciones ocurridas; situación que se repite durante el año hidrológico siguiente, 2014/2015 (periodo de sequía meteorológica que deriva en sequía hidrológica).

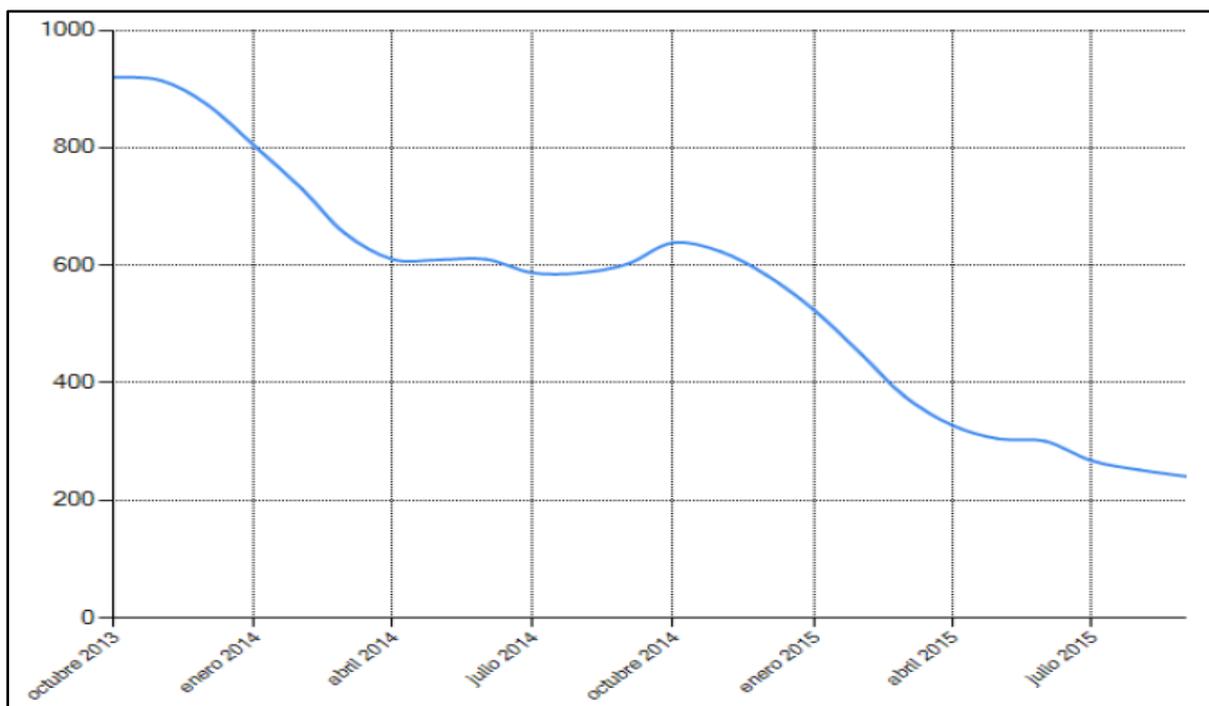


Figura 34. Comportamiento del volumen del embalse Zaza en (hm³), en los años 2013-2015.

Para la simulación, no se ha introducido ninguna regla de operación que imponga restricciones o ahorros de agua, por lo que del análisis de demandas se aprecia que la garantía de abastecimiento a la demanda agrícola es total, a pesar del impacto en el volumen almacenado. En el año 2014, se cumplieron todas las demandas, y en el 2015, ante la persistencia de las condiciones de sequía no se hicieron efectivas todas las entregas con el objetivo de paliar el descenso volumétrico, aunque en esta simulación se considera que, si se ha hecho entrega de todas las demandas programadas y que el embalse, por tanto, muestra la evolución descrita.

La **Tabla 3**, muestra que se han cumplido los criterios de garantía de abastecimiento para todas las demandas que toman el agua del embalse Zaza en el periodo (octubre 2013- julio 2015). No sería así, si se aplicaran las reglas operacionales necesarias (restricciones y ahorros) para la correcta gestión de los recursos almacenados. Dichas restricciones, sólo fueron aplicadas por parte de la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico (EAHSS) durante el año 2015, ante la pertinaz e intensa sequía, pero se

desconocen cuáles fueron los volúmenes no entregados para paliar el descenso del nivel en el embalse Zaza.

Tabla 3. Criterios de garantía de abastecimiento, cumplidos, para todas las demandas en el embalse Zaza

* 14-Emb. zaza. agr.													
	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	TOTAL
DOTACION	14.233	16.871	33.783	52.040	57.882	52.046	36.587	31.796	29.776	33.078	29.371	19.362	406.817
SUM. SUPERF	14.233	16.871	33.783	52.040	57.882	52.046	36.587	31.796	29.776	33.078	29.371	19.362	406.817
SUM. SUBT	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
DEFICIT	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
PRDC. SUM. SUP. POR TOMAS:													
1-T. emb. zaza agr.	14.233	16.871	33.783	52.040	57.882	52.046	36.587	31.796	29.776	33.078	29.371	19.362	406.817
NO. FALLOS:	0.	GARANTIA: 100.0%	GAR .	VOLUMETRICA: 100.0%	MAX. DEF. MENS.:	0.000	MAX. DEF. 2 MES:	0.000					
CRITERIO ANUAL:	NO.FALLOS: 0.	GARANTIA: 100.0%											
CRITERIO IPH08(AGRICOLAS):	CUMPLE	(1: 0.0%, 2: 0.0%, 10: 0.0%)											
CRITERIO IPH08(URBANAS):	CUMPLE												
* 15-Emb. Zaza gan.													
	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	TOTAL
DOTACION	0.876	0.876	0.876	0.878	0.878	0.878	0.878	0.878	0.878	0.877	0.877	0.877	0.927
SUM. SUPERF	0.876	0.876	0.876	0.878	0.878	0.878	0.878	0.878	0.878	0.877	0.877	0.877	0.927
SUM. SUBT	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
DEFICIT	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
PRDC. SUM. SUP. POR TOMAS:													
1-T. emb. zaza gan.	0.876	0.876	0.876	0.878	0.878	0.878	0.878	0.878	0.878	0.877	0.877	0.877	0.927
NO. FALLOS:	0.	GARANTIA: 100.0%	GAR .	VOLUMETRICA: 100.0%	MAX. DEF. MENS.:	0.000	MAX. DEF. 2 MES:	0.000					
CRITERIO ANUAL:	NO.FALLOS: 0.	GARANTIA: 100.0%											
CRITERIO IPH08(AGRICOLAS):	CUMPLE	(1: 0.0%, 2: 0.0%, 10: 0.0%)											
CRITERIO IPH08(URBANAS):	CUMPLE												
* 16-Emb. zaza ind.													
	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	TOTAL
DOTACION	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	11.000
SUM. SUPERF	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	11.000
SUM. SUBT	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
DEFICIT	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
PRDC. SUM. SUP. POR TOMAS:													
1-T. emb. zaza ind.	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	11.000
NO. FALLOS:	0.	GARANTIA: 100.0%	GAR .	VOLUMETRICA: 100.0%	MAX. DEF. MENS.:	0.000	MAX. DEF. 2 MES:	0.000					
CRITERIO ANUAL:	NO.FALLOS: 0.	GARANTIA: 100.0%											
CRITERIO IPH08(AGRICOLAS):	CUMPLE	(1: 0.0%, 2: 0.0%, 10: 0.0%)											
CRITERIO IPH08(URBANAS):	CUMPLE												

4.3.2. Aportaciones al embalse Zaza

El hidrograma de entrada de agua (hm^3) al embalse Zaza, **Figura 35**, refleja las aportaciones deficitarias durante todo el periodo (octubre 2013-julio 2015), más acusado en el segundo año hidrológico (2014/2015), y evidencia también el carácter bimodal del periodo de lluvias, con un mínimo en julio, sequía intraestival, que se cumple en la mayoría de los años.

Respecto a los volúmenes entrantes en el embalse, el modelo se ajusta con buena precisión a las entradas reales medidas para el embalse Zaza, usado en el balance hídrico, por la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico Sancti Spiritus (EAHSS).

No obstante, se producen desajustes mes a mes debido a que se mide una variable continua (generación de escorrentía en el tiempo) de forma discreta (generación de escorrentía mes a mes a partir de los datos de precipitación mensual), pero que resultan compensados considerando la suma de los dos meses contiguos.

Así, se tiene que en octubre 2013 las entradas fueron de 130 hm³, y en noviembre 30 hm³, cuando en realidad se registró una mayor entrada en noviembre que en octubre. El desajuste queda compensado considerando los dos meses en conjunto.

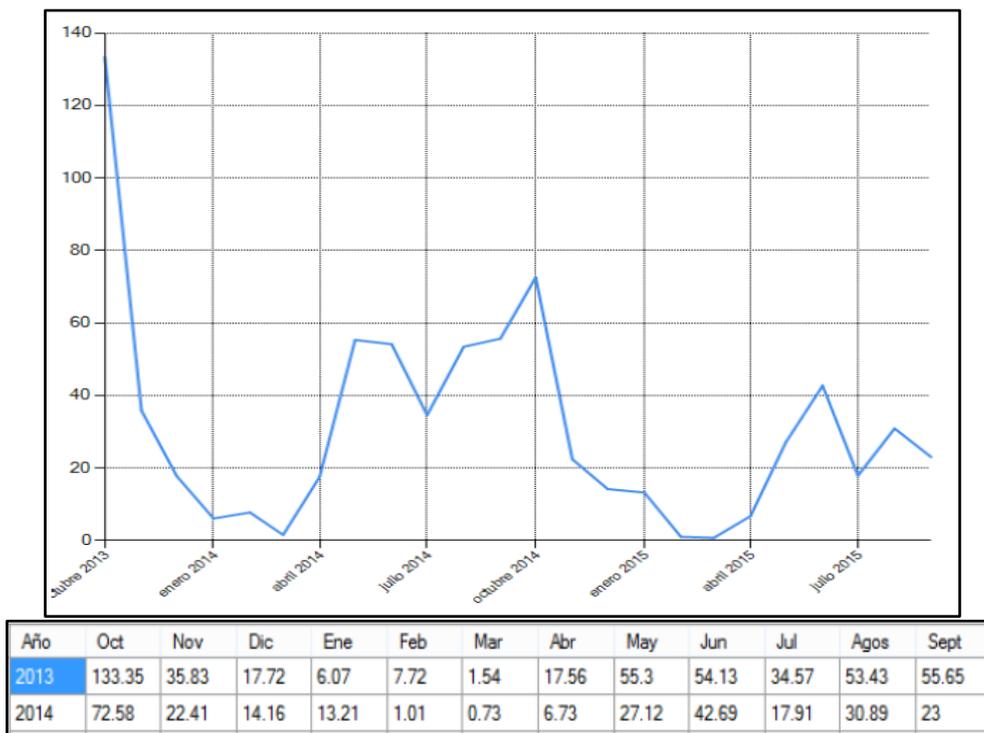


Figura 35. Hidrograma de entrada de agua en (hm³) al embalse Zaza, (2013-2014).

4.3.3. Seltas en el embalse Zaza

El hidrograma de salida de agua embalsada en (hm³), **Figura 36**, del embalse Zaza.

A excepción del primer pico, las salidas fluctúan periódicamente en respuesta a la demanda principal asociada al embalse, la agrícola para la producción intensiva de arroz, la cual es mayor al comienzo del año durante el periodo poco lluvioso y desciende paulatinamente durante el periodo lluvioso.

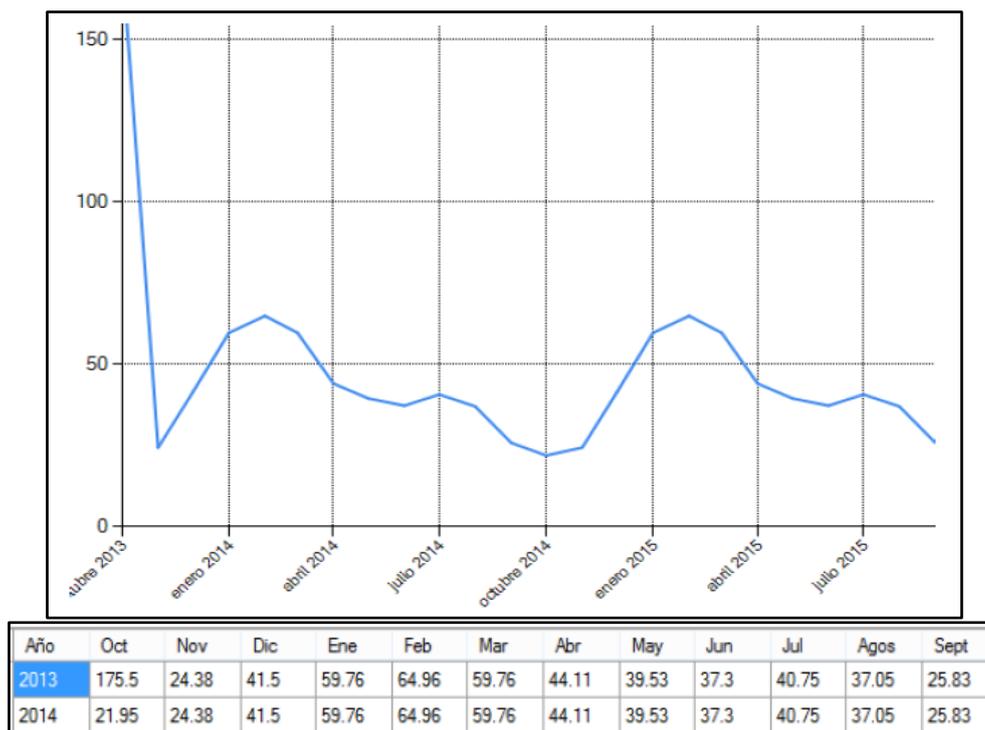


Figura 36. Hidrograma de salidas del embalse Zaza en (hm^3).

4.3.4. Caudal sanitario

El caudal sanitario, introducido en el modelo ha sido establecido por la EAHSS, y se mantiene constante a lo largo del año, se cumple siempre, lo cual evidencia que está subestimado, **Figura 37**, y que, atendiendo al mal estado ecológico de los ecosistemas aguas abajo del embalse Zaza hasta la línea de costa, debe ser cambiado el concepto y cálculo de caudal sanitario aplicado en Cuba, por el concepto y cálculo de caudal ecológico aplicado por la GIRH, que cumpla con los principios de Dublín.

El hidrograma realizado a la salida de la Pequeña Central Hidroeléctrica (PCHE), muestra que se ha hecho entrega del caudal sanitario durante todo el periodo, el cual se ha fijado entre los $5,93 \text{ hm}^3$ y los $6,56 \text{ hm}^3$, **Figura 38**, cumpliéndose al 100%.



Figura 37. Compuerta en el canal Magistral sobre el arroyo Palmas. Punto por el cual se hace entrega del caudal sanitario al río Zaza.

Sin embargo, no se cumple con las funciones ambientales que se le atribuyen, por lo que urge incrementarlo, aplicando conceptos bioéticos y de economía ambiental para la gestión integrada de los recursos hídricos.

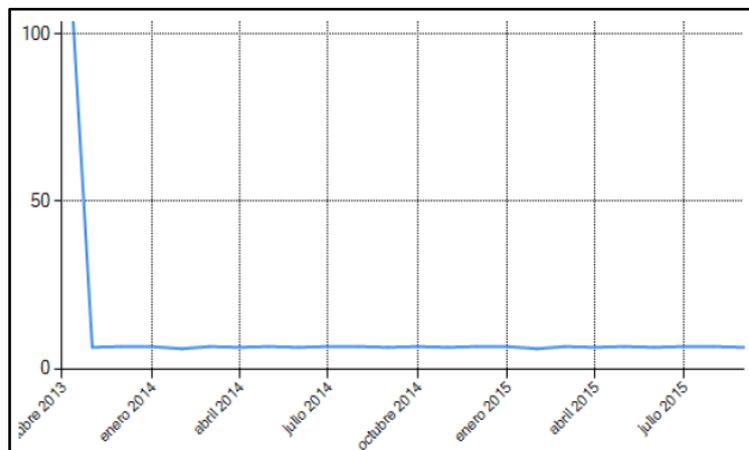


Figura 38. Caudal sanitario aguas abajo del embalse Zaza (hm³).

La modelización realizada con AQUATOOL+, muestra el funcionamiento del sistema hidrológico superficial relacionado con el embalse Zaza. Y evidencia que, con el nivel de explotación actual del embalse, el agotamiento del mismo durante un periodo deficitario de precipitaciones se produciría en dos periodos hidrológicos. Además, asociado a este déficit, durante el periodo simulado no se han producido avenidas naturales ni programadas que garanticen la estabilidad del ecosistema fluvial aguas abajo del embalse Zaza, en los ecosistemas ribereños y en el delta del río Zaza.

Analizando el momento idóneo para realizar sueltas programadas, se proponen dos alternativas:

1) al **comienzo del periodo lluvioso** (mayo-octubre), al finalizar el mes de “junio”, condicionada a que el nivel de agua embalsada en ese momento sea muy favorable (volumen almacenado por encima del nivel medio histórico para ese momento del año); y

2) al **inicio del periodo poco lluvioso** (noviembre-abril), en el mes de “noviembre”, condicionada a que el caudal entrante al embalse en el periodo lluvioso sea superior al normal y las reservas se hayan incrementado considerablemente hasta producir el llenado total del embalse y ocurra en el mes de noviembre un evento de intensas lluvias producido por un ciclón tropical u otro tipo de fenómeno.

Según (García, 2016), el caudal generador de estas sueltas programadas o naturales para que logren impactos positivos en el arribo de sedimentos, agua dulce y energía al delta del río Zaza y la zona costera asociada, deben ser al menos de 1000 m³/s, (durante **cinco días**, y cada **cinco años**); desembalsando un volumen total de agua de 435 hm³.

Bibliografía

Alarcón, S.; 2016; Diseño y aplicación de un modelo de simulación de la gestión de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Zaza y Jatibonico del Sur, Cuba. Trabajo Fin de Máster en Recursos Hídricos y Medio Ambiente. Facultad de Ciencias. Universidad de Málaga, Málaga. España. Inédito.

Andreu, J., Capilla, J. y Cabezas, F.; 1994; Los Sistemas Soportes de Decisión en la planificación y gestión racional de los recursos hídricos. *Ingeniería del Agua*, vol. 1 (2), pp. 7-20.

Andreu, J., Capilla, J., Ferrer, J. y Solera, A.; 2007; Modelo *SIMGES* de Simulación de la Gestión de los Recursos Hídricos, incluyendo la Utilización Conjunta. Versión 3.00. Manual de Usuario. Valencia: Ed. Universidad Politécnica de Valencia.

Andreu, J., Capilla, J. & Sanchís, E.; 1996; AQUATOOL+, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. *Journal of Hydrology*, vol. 177, pp. 269-291.

Andreu, J., Ferrer, J., Paredes, J., Pérez, M. A. & Villalobos, A.; 2007; Drought management Decision Support System by means of risk analysis models. En Rossi *et al.* (eds.), *Methods and Tools for Drought Analysis and Management*. Springer, pp. 15-216.

Andreu, J., Paredes, J. y Solera, A.; 2015; AQUATOOL+. Entorno de desarrollo de sistemas de ayuda a la decisión en materia de planificación de la gestión de cuencas hidrográficas incluyendo utilización conjunta y criterios de calidad de aguas. Manual de Usuario. Recuperado de: https://www.upv.es/aquatool/es/manuales_es.html.

Andreu, J., Paredes, J. y Solera, A.; 2016; Aquatool+ (Versión 5.82.9) [Software]. Universitat Politècnica de València. Obtenido de: http://www.upv.es/aquatool/es/descargas_es.html.

De Kok, J.-L. & Wind, H. G.; 2003; Design and application of decision-support systems for integrated water management: lessons to be learnt. *Physics and Chemistry of the Earth*, vol. 28, pp. 571-578.

García, D.; 2016; Estudio preliminar de los requerimientos ambientales del río Zaza, aguas debajo de la presa Zaza, Cuba. Trabajo Fin de Máster en Recursos Hídricos y Medio Ambiente. Facultad de Ciencias. Universidad de Málaga, Málaga. España. Inédito.

IPH; 2008; BOE nº229 de 22 de septiembre de 2008. "ORDEN ARM/2656/2008, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica". Recuperado de: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2008-15340>.

Molnar, P.; 2011; "Calibration". *Watershed Modelling*, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.

Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V.; 1970; River Flow Forecasting through Conceptual Models. Part I – A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, vol. 10, pp. 282-290.

Riu, J., Boqué, R., Laso, J., Maroto, A. y Rius, F. X.; 2001; Calibración de equipos de medida. *Técnicas de Laboratorio*, vol. 23 (260), pp. 226-228.

CAPÍTULO 5

Capítulo 5. Análisis espectral con imágenes Landsat y uso de la metodología MESMA. Caso de estudio bosque de mangle en la costa sur de la provincia de Sancti Spíritus, Cuba

En los Pequeños Estados Insulares, la limitación de recursos, la dispersión geográfica, el aislamiento y la fragilidad de su ecología hacen del desarrollo sostenible un tema vital; donde los impactos naturales y antrópicos necesitan tener respuestas rápidas, holísticas e integradas. El recalentamiento del planeta y un aumento en el nivel del mar las hace vulnerables a las tormentas y puede causar la pérdida de partes importantes de su territorio. Los recursos de agua dulce son una parte indispensable de todo ecosistema terrestre. En algunas regiones, las inundaciones y las sequías, parte del ciclo hidrológico, se hacen cada vez más extremas. El cambio del clima global y la contaminación ambiental podrían repercutir sobre la disponibilidad de agua dulce y constituir una amenaza para los ecosistemas, en particular en las zonas costeras bajas y en las islas pequeñas (Agenda 21, 1992).

Según el *artículo 1.1* de la Convención de Ramsar, (1971), se entiende por humedales “las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros”. Además, a efectos de proteger sitios coherentes, el *Artículo 2.1* de esta Convención estipula que los humedales que se incluirán en la Lista de Ramsar de Humedales de Importancia Internacional: “podrán comprender sus zonas ribereñas o costeras adyacentes, así como las islas o extensiones de agua marina de una profundidad superior a los seis metros en marea baja, cuando se encuentren dentro del humedal”.

En general, se reconocen cinco tipos de humedales principales, Convención de Ramsar (1971):

- Marinos (humedales costeros, inclusive lagunas costeras, costas rocosas y arrecifes de coral);
- Estuarios (incluidos deltas, marismas de marea y manglares);
- Lacustres (humedales asociados con lagos);
- Ribereños (humedales adyacentes a ríos y arroyos); y
- Palustres (es decir, “pantanosos” - marismas, pantanos y ciénagas).

Se pueden clasificar como humedales artificiales, los estanques de cría de peces y camarones, estanques de granjas, tierras agrícolas de regadío, depresiones inundadas salinas, embalses, estanques de grava, piletas de aguas residuales y canales. La Convención de Ramsar ha adoptado un Sistema

Ramsar de Clasificación de Tipos de Humedales que incluye 42 tipos, agrupados en tres categorías: humedales marinos y costeros, humedales continentales y humedales artificiales.

Para la gestión de las zonas costeras en áreas tropicales y subtropicales y de los ecosistemas frágiles que las componen como deltas, bosque de mangle, ciénagas, pantanos, marismas entre otros; se dificultan las investigaciones en el terreno por las difíciles condiciones de acceso. En estos casos, la teledetección permite obtener información relevante para el monitoreo, manejo y la conservación de áreas naturales y antropo-naturales. Logrando determinar las diferencias existentes entre la información espectral de los componentes naturales (suelos, agua, vegetación y otros) y componentes antrópicos presentes en las zonas costeras.

El uso del sensor multiespectral permite a regiones y países que no tienen acceso a información satelital referida a los sensores hiperespectrales; procesar una valiosa información y establecer procedimientos y metodologías que en condiciones de países en desarrollo y pequeños estados insular, como el caso de Cuba, puedan obtener nuevos conocimientos vinculados a la mitigación de impactos y a la adaptación en las zonas costeras, en relación con el Desarrollo Sostenible.

Los manglares constituyen importantes ecosistemas en los humedales. Una evaluación realizada en el 2005 (FAO, 2007), estimó que en los últimos 25 años la superficie ocupada por los manglares había disminuido en 3,6 millones de hectáreas, cuando en 1980 existían 18,8 millones de hectáreas, lo que representa el 20%.

El bosque de mangle se define, según Feller y Sitnik, (1996), como un conjunto de árboles tropicales y arbustos que crecen en la zona intermareal. Los que incluyen aproximadamente 16 familias y de 40 a 50 especies (dependiendo de la clasificación). Según (Tomlinson (1986) en Feller y Sitnik, (1996)), se requieren los siguientes criterios para que una especie sea considerada verdadera o estrictamente como “manglar”:

- Total afinidad con el medio ambiente de manglar.
- Jugar un papel importante en la estructura de la comunidad y tener la capacidad de formar estratos puros.
- Especialización morfológica para la adaptación al hábitat.
- Especialización fisiológica para la adaptación a su hábitat.
- Aislamiento taxonómico de sus parientes terrestres.

Estas características tan particulares del bosque de mangle son las que le atribuyen una respuesta específica cuando se utilizan procedimientos de teledetección que nos permiten obtener diferencias espectrales entre los componentes de la comunidad vegetal, como entre otros componentes, tanto

naturales como antrópicos. Proporcionando información importante a gran escala y a largo plazo; usando herramientas de monitoreo y levantamiento cartográfico rentables que permitan realizar, según Kuenzer et *al.*, (2011).

- Inventarios de hábitat (determinación de arribos, especies y composición y estado de salud);
- Detección de cambios y monitoreo (uso del suelo, cubierta del suelo, conservación, reforestación, silvicultura y acuicultura);
- Soporte para la evaluación del ecosistema;
- Evaluación de la productividad (estimación de la biomasa);
- Estimación de la capacidad de regeneración;
- Solicitudes de gestión múltiple (pesca, acuicultura, gestión de la conservación, líneas directrices de gestión y estrategias);
- Planificación de investigaciones de campo;
- Evaluación de la calidad del agua;
- Obtener información para la gestión de desastres; y
- Obtener una mejor comprensión de las relaciones ecológicas y biológicas y procesos, funciones y dinámica.

Influye negativamente para el uso de procedimientos de teledetección en los manglares que estos crecen en la interface tierra-mar y en regiones con valores elevados de cobertura nubosa. Por lo tanto, las tres características principales que contribuyen a la composición de píxeles en imágenes satelitales (vegetación, suelos y el agua) se ven afectados por la mezcla y la apariencia en superficie se ve influida por las interacciones entre mareas estacionales y diurnas, (Blasco et *al.*, 1998) en Kuenzer et *al.*, (2011)) y la nubosidad. Estas circunstancias afectan en gran medida la caracterización espectral de los componentes de la imagen. Describiéndose como los principales obstáculos para una caracterización radiométrica rigurosa.

Características del bosque de mangle en los datos ópticos de sensores remotos, según, Kuenzer et *al.*, (2011):

- Las características texturales y espectrales de la cubierta y las hojas; son las principales propiedades utilizadas para distinguir entre las comunidades de manglar (Ramsey and Jensen, 1996)
- Su aspecto estructural parcialmente homogéneo o heterogéneo, depende de varios factores como: la composición de las especies, patrón de distribución, crecimiento, densidad y la altura de la base.
- Meza Díaz y Blackburn, (2003), describen las variaciones espectrales de la reflectancia del dosel como una función de varias propiedades ópticas, tales como índice de área foliar (LAI), reflectancia de fondo, y la inclinación foliar.

- La firma espectral de una sola especie se define por la edad, la vitalidad, fenología y las características fisiológicas (Blasco et *al.*, 1998).
- Los cambios climáticos periódicos influyen en la dinámica foliar y la senescencia de las hojas, también pueden tener un impacto en la respuesta espectral (Wang et *al.*, 2008).
- Wang et *al.*, (2008), observó brotes de hojas en el mangle rojo en el inicio del periodo lluvioso en Panamá. Esto lo llevó a la conclusión de que las imágenes del inicio de la estación lluviosa son muy útiles, debido a la mayor distinción espectral entre las especies.

Según Somers y Asner (2013), mediante la combinación de información espectral de diferentes períodos de la temporada de crecimiento y de diferenciación fenológica entre especies de plantas pueden ser capturadas y, en consecuencia, mejorada la precisión de detección y mapeo para imágenes satelitales. A pesar de que esta hipótesis es bien reconocida, según los autores, el número de estudios que evalúan la separabilidad espectral temporal entre las especies de plantas es limitado.

Los efectos fenológicos de la vegetación en especies existentes en el chaparral californiano fueron estudiadas por (Dennison y Roberts, 2003). Y Hesketh y Sanchez-Azofeifa, (2012), evaluaron la división espectral por estaciones al nivel de las hojas en los bosques secos panameños. Somers y Asner, (2013) han demostrado los beneficios de la integración de series de tiempo de Hyperion en la metodología de Análisis de Mezcla Espectral de Múltiples Endmember (MESMA) para el mapeo de las especies invasoras localizadas en la selva hawaiana y han observado exitosamente un aumento significativo en la identificación de especies invasoras cuando incorporan MESMA en la información espectral pertenecientes a diferentes momentos del crecimiento de dichas especies invasoras. Adicionalmente, han desarrollado un método de multipaso que permite obtener una imagen compuesta perteneciente a diferentes meses construidos a partir de las cuatro regiones espectrales: visible (VIS), infrarrojo cercano-1 (NIR1), (NIR2) e infrarrojo medio (SWIR).

5.1. Área de estudio

El área de estudio ocupa una extensión de 1608,17 Km² (áreas marinas y terrestres) en la costa sur de la provincia de Sancti Spíritus (UTM Zona 17, WGS 84; X₁: 591094.32 m Y₁: 2380724,03 m y X₂: 706320,94 m Y₂: 2414462,33 m;). De oeste a este, (río Cabagán, límite político-administrativo con la provincia de Cienfuegos y este de Palo Alto, límite político-administrativo con la provincia de Ciego de Ávila), comprendiendo la zona costera de los municipios Trinidad, Sancti Spíritus y La Sierpe en la región central de la isla de Cuba, **Figura 39**.

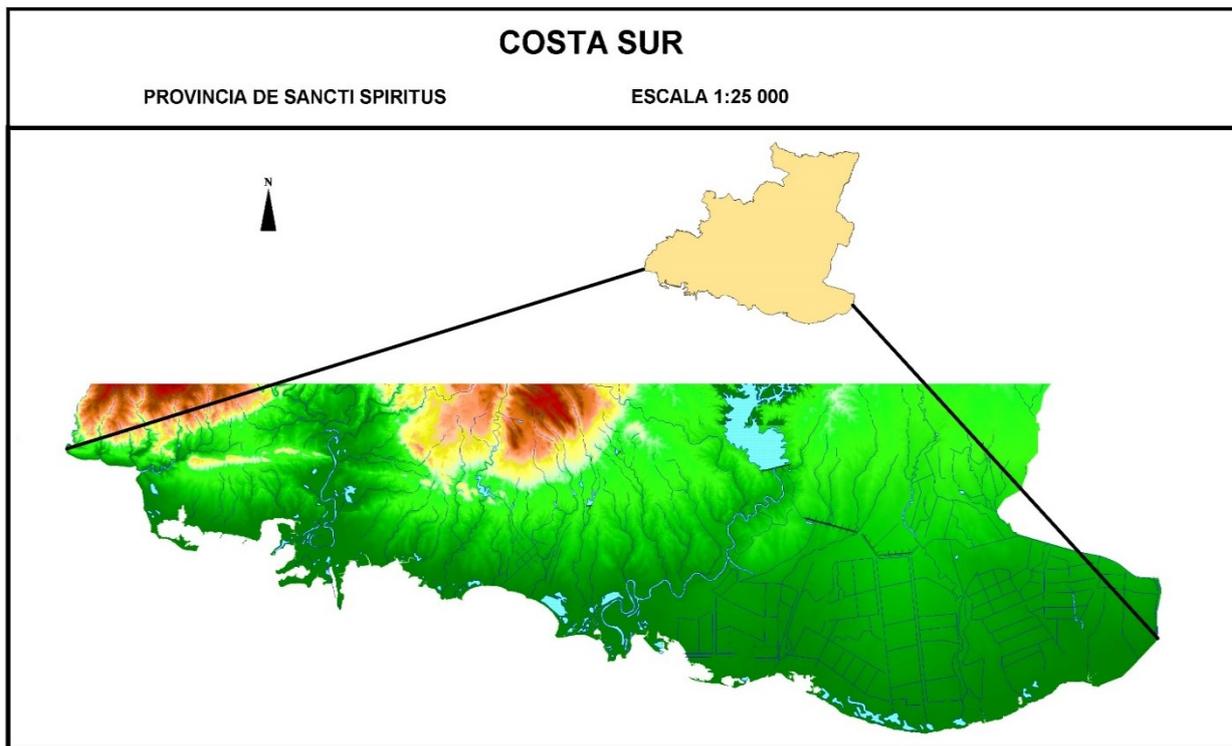


Figura 39. Costa sur de la provincia de Sancti Spiritus, Cuba.

La geología en la zona costera meridional en la provincia de Sancti Spíritus se caracteriza por la presencia de rocas y estructuras del Neoaútóctono cubano que se originaron, según Iturralde-Vinent, (1998), después de la consolidación del substrato plegado, a partir del Eoceno Superior. Durante éste periodo y hasta el presente, dominan los movimientos verticales oscilatorios, que dieron lugar a la formación de una estructura de bloques distintamente elevados; aunque se presentan algunas fallas sinistras de rumbo NE y E-W activas.

La zona costera se comporta como un graben al comparar las tendencias de los movimientos verticales de las estructuras cubanas en el periodo post-Eoceno. Esta estructura se extiende hasta Ciego de Ávila y Camagüey y está formada por rocas sedimentarias carbonatadas de las (Formaciones Paso Real, Güines, Vedado y Jaimanitas) y terrígenas (Formaciones Guevara y Villarroja), de edad Eoceno superior a Cuaternario, además de los sedimentos recientes de tipo aluvial y palustre.

Formación Paso Real (P. J. Bermúdez, 1950), son característicos en ella los cambios litológicos abruptos tanto vertical como lateralmente. Predominan las alternancias de calizas y margas. Las calizas son arcillosas, biodetríticas arcillosas y más subordinadamente calizas biohémicas, calizas dolimitizadas, dolomitas y calcarenitas. Las calizas arcillosas por desagregación originan pseudoconglomerados calcáreos de matriz margoso- arenácea. En

general son masivas. Las margas, al igual que las calizas son fosilíferas. Aparecen intercalaciones de areniscas y limolitas calcáreas y arcillas (principalmente esmectita) que contienen en algunos horizontes pirita, yeso, halita y lignito. En el área tipo se observa en la base un conglomerado polimíctico de matriz margosa, fosilífera. La estratificación está enmarcada por los cambios litológicos y es frecuentemente lenticular. Colores crema, blancuzco y grisáceo en los horizontes carbonáticos y grisáceo y verdoso en los terrígenos. De edad Oligoceno Superior- Mioceno Superior basal.

Formación Güines (A. Humboldt, 1826a, b), constituida por calizas biodetríticas de grano fino a medio, fosilíferas, calizas biohémicas, calizas dolomíticas, dolomitas, calizas micríticas sacaroidales y lentes ocasionales de margas calcáreas y calcarenitas. La dolomitización es secundaria. Son por lo general masivas, más raramente estratificadas. Coloración blanca, amarillenta, crema o gris. De edad Mioceno Inferior parte alta- Mioceno Superior parte basal.

Formación Vedado (Brönnimann y Rigassi, 1963), constituida por calizas biohémicas coralino-algáceas y biodetríticas, masivas o con estratificación local poco clara, duras, a veces aporcelanadas, en parte porosas y cavernosas, recristalizadas, que contienen corales en posición de crecimiento o sus fragmentos, con frecuencias dolomitizadas. Su matriz puede ser micrítica o micrito-arenítica. Contienen por lo general, numerosas impresiones tubulares del coral, *Acropora prolifera*. Contiene rellenos de un material rojizo carbonato arcilloso con goethita. Puede contener lentes de calcarenitas. Color blanco, amarillento y a veces rosado. De edad Plioceno Superior - Pleistoceno Inferior.

Formación Guevara (I. P. Kartashov et al., 1976), constituidas por arcillas plásticas (montmorilloníticas y montmorillonito-caoliníticas), arenas silíceas, gravas finas, fragmentos de corazas ferríticas (*hardpan*). Presenta alto contenido de pisolitas y nódulos ferríticos. La estratificación es indefinida, paralela. Su coloración es variable, abigarrada. Por posición estratigráfica se le ha asignado una edad Pleistoceno Inferior- Medio.

Formación Jaimanitas (J. Brödermann, 1940), constituida por calizas biodetríticas masivas, generalmente carsificadas, muy fosilíferas conteniendo principalmente conchas bien preservadas, corales de especies actuales y ocasionalmente biohermos. Las bolsas cársticas se encuentran rellenas por una fina mezcla carbonato-arcillosa ferruginosa de color rojo ladrillo. Pasan a calcarenitas masivas o finamente estratificadas y a veces contienen intercalaciones de margas. La cementación es variable. La coloración predominante es

blancuzca o amarillenta. De edad según criterios geomorfológicos y por su posición estratigráfica ha sido considerada como Pleistoceno Superior.

Formación Villarroja (I. P. Kartashov et al., 1976a), constituida por arcillas arenosas y areno- limosas, arenas arcillosas y arenas cuarzosas de distintas granulometrías, pigmentadas por hidróxidos de hierro (goethita). Contiene finos lentes y capas de grava de tamaño variado, frecuentemente con buen redondeamiento y selección, constituidos por cuarzo y más subordinadamente por fragmentos de hardpan, así como concreciones ferruginosas. Las arcillas son principalmente esmectita y caolinita. La estratificación es poco discernible, localmente lenticular. Tonalidades variables, de rojo amarillento a rojo violáceo. De edad según su posición estratigráfica se ha considerado como Pleistoceno Superior.

Los suelos en la llanura costera suroccidental entre los ríos Cabagán y Guaurabo son del tipo ferralíticos rojos ocupando las terrazas abrasivas y su origen se estima sea por el traslado de sedimentos terrígenos procedentes de las montañas al norte, lo que explica, según Domínguez et *al.* (2012), su discontinuidad, delgadez y presencia en los depósitos aluviales de los ríos que atraviesan esta estrecha llanura costera. A escala local, alternando con ellos y vinculados genéticamente a las calizas, encontramos suelos húmicos calcimórficos del tipo rendzina roja, en litorales rocosos de costa alta.

Los suelos ferralíticos cuarcítico amarillo lixiviado ocupan escalones intermedios de la llanura marina, alternando localmente con el ferralítico rojo lixiviado y el ferralítico cuarcítico amarillo-rojizo lixiviado. Además, encontramos suelos oscuros plásticos, cuyas propiedades vérticas y alto contenido de arcilla montmorillonita le confieren un drenaje deficiente, formando catenas con los suelos hidromórficos, que se ubican en niveles inferiores –en las ciénagas- y con los pardos con carbonatos, de los niveles superiores. Los litorales cenagosos con llanuras acumulativas lacuno-palustres y deltaicas, se caracterizan por suelos hidromórficos, formados sobre depósitos turbomargosos y arcillo-limosos, en una posición geomorfológica muy baja.

La costa meridional de la provincia de Sancti Spíritus está caracterizada por seis tramos costeros, (Domínguez et *al.*, 2012):

- 1) Del río Cabagán al río Guaurabo: costas dentadas abrasivo – tectónicas expuestas a un alto régimen de oleaje. Presenta el litoral emergido con varios niveles de terrazas marinas (2–3), paisaje único de su tipo en la provincia y barras fluvio–marinas en la desembocadura de los ríos Cabagán, Guanayara y Cañas, simulando tibaracones.

2) De la Boca del río Guaurabo a Punta Ancón: Predominan las costas aplanadas abrasivo – acumulativas y acumulativas, existiendo tramos rocosos expuestos a altos regímenes de oleaje entre La Boca y las Caletas y costas rocosas protegidas en María Aguilar, así como un amplio sector de costas arena – arcillosas en aguas tranquilas: Ancón⁶. Esta es el área con mayor uso turístico al presentar las playas La Boca, María Aguilar y Ancón con 50 m, 585 m y 4 000 m de longitud respectivamente. En este tramo se conservan relictos de la vegetación original de la asociación florística típica de costa arenosa.

3) De Punta Ancón a la Bahía del Macío: la costa es acumulativa biogénica de manglar y producto de la barra arenosa de Ancón se forma la Ensenada de Casilda, mid – bay que alberga el puerto pesquero trinitario.

4) De la Bahía del Macío a la Bahía de San Pedro: la costa es de origen potamogénico o deltaico. El delta del río Agabama, con su forma de pata de gallina, resulta un ecosistema fluvio – marino muy importante para el funcionamiento ecológico de la zona.

5) De la Bahía de San Pedro a la desembocadura del río Zaza: la costa acumulativa biogénica se entrelaza con costas acumulativas de lagunas y costa potamogénicas con el delta bicúspide que forma el río Higuanajo y el delta de río Zaza.

6) A partir del río Zaza hacia el este hasta Palo Alto: se desarrolla un tramo costero acumulativo de lagunas, con predominio de costas limosas protegidas en aguas tranquilas debido al ancho platafórmico que une las lagunas meso infralitorales y las albuferas.

La única fuente de alimentación que determina el comportamiento de los procesos asociados al escurrimiento fluvial, tanto de manera directa, como a través de la alimentación subterránea lo constituyen las precipitaciones. Este fenómeno, propio también para el resto de Cuba, se refleja en el irregular régimen hídrico de los ríos, con avenidas y estiajes que coinciden con los periodos lluvioso y poco lluvioso.

En la zona costera sur de la provincia Sancti Spíritus ocurre la mayor parte del escurrimiento superficial asociado con sistemas fluviales notables para Cuba como son: los ríos Agabama, Zaza y Jatibonico del sur. Así en la periferia sur de Montañas de Trinidad, el drenaje, se produce a través de

⁶ *Ecosistemas de playa, lagunas y bosque de mangle el cual está siendo intensamente impactado por el uso público y con la construcción de infraestructura asociada al desarrollo turístico.*

las formas cársticas la cual es atravesada por ríos alóctonos cuyas cuencas hidrográficas durante su recorrido se reducen prácticamente al área del cauce (Domínguez et *al.* 2012).

Por su parte, en la periferia sur de Montañas de Sancti Spíritus la densidad de cauces se incrementa como resultado de la combinación de varios factores, de manera importante la presencia de un relieve ondulado y altos valores de precipitaciones los que originan corrientes caudalosas en los ríos Cayajaná, Yagua, Guasimal, Mayabuna, Salado -todos afluentes pertenecientes a la vertiente oeste del río Zaza-, y los ríos Banao, Tayabacoa, Higuanojo, San Pedro entre otros (Domínguez et *al.* 2012); algunos de ellos represados como el Banao e Higuanojo donde principalmente en este último ocurre azolvamiento y reducción importante de su calado en la desembocadura.

En el caso de las zonas deltaicas y de ciénagas estas carecen de escurrimiento fluvial organizado; su alimentación proviene no sólo de las precipitaciones y los ríos que en ellas desembocan, sino también del escurrimiento subterráneo que ocurre en las formaciones de relieve aguas arriba. En estas zonas, son comunes las lagunas de agua salobre, concentradas en su mayoría en las formaciones deltaicas de los ríos Agabama, Higuanojo, Zaza y Jatibonico del Sur. La drástica reducción del suministro de agua dulce a las ciénagas en el sector asociado al delta del río Zaza, ocurre fundamentalmente debido a encontrarse aguas arriba el mayor embalse del país -la presa Zaza- capaz de embalsar 1020 millones de m³, y la construcción y uso actual de estanques para la cría intensiva del camarón que provocaron al ecosistema fuertes impactos por desbroce de áreas de bosque de mangle e interrupción de los flujos de agua dulce entre el río Zaza, los sistemas de lagunas y el mar.

En otro sector costero al este, con la construcción de complejas obras hidráulicas destinadas al riego para los cultivos de caña de azúcar y arroz, se han generado diversos procesos de degradación e impactos en la biodiversidad, principalmente en los sistemas lagunares y el litoral costero; excesos de agua se desembalsan de terrazas y diques destinados a la producción intensiva de arroz con altos porcentos de sedimentos y residuales químicos que por canales y esteros llegan hasta las zonas lagunares provocando la muerte del manglar en importantes áreas asociadas a la desembocadura del río Jatibonico del Sur.

La climatología del archipiélago cubano se caracteriza por la presencia de dos periodos climáticos con marcadas diferencias, un periodo lluvioso (de mayo a octubre) y un periodo poco lluvioso (de noviembre a abril), **Figura 40**. En las zonas costeras encontramos además, la influencia de la geología, la geomorfología, la hidrografía e hidrogeología, los suelos, las mareas, las características locales del tiempo y el clima y los negativos efectos antrópicos los cuales impactan determinadas características ecosistémicas con una expresión importante en las formaciones vegetales y la flora.

Las temperaturas en el área de estudio tienen un comportamiento en correspondencia con las registradas en la zona costera meridional de la región centro-occidental cubana, con valores de temperatura media de 25,8 °C, temperatura mínima media de 21,9 °C y temperatura máxima media de 30,7 °C, según la norma (1981-2010).

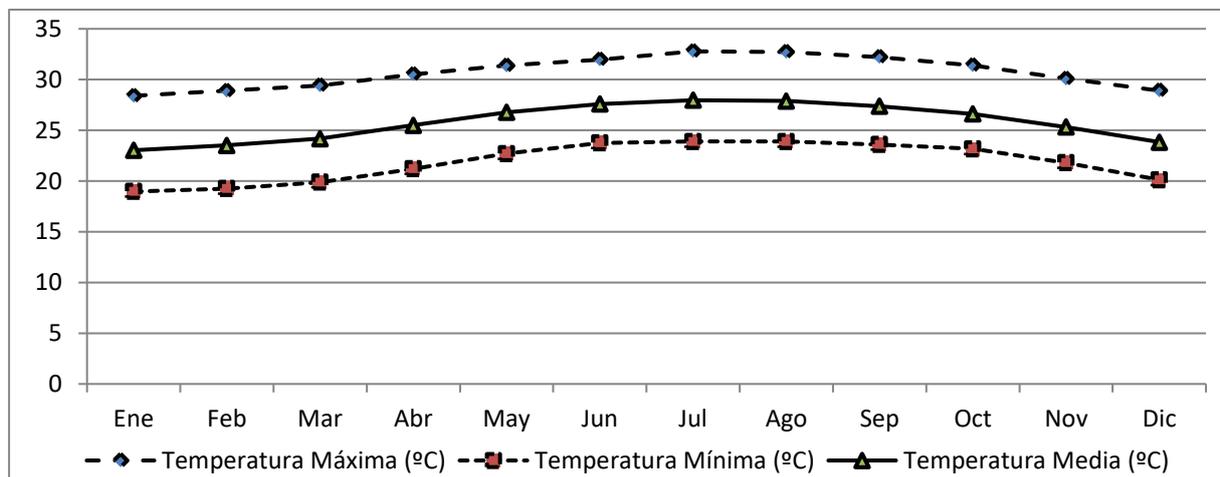


Figura 40. Comportamiento en el área de estudios de la temperatura media, mínima y máxima, según norma (1981-2010).

Las temperaturas máximas ocurren en los meses de julio y agosto con valores cercanos a los 33 °C, mientras las temperaturas mínimas suceden en el mes de enero con valores de 19 °C. Estos altos valores de temperaturas mínimas, máximas y medias históricas junto a importante déficit de precipitaciones, más las condiciones geológicas, hidrogeológicas y edáficas hacen que en los ecosistemas del área de estudio estén presentes condiciones de fragilidad las cuales pueden ser modificadas por impactos antrópicos y provocar daños irreversibles especialmente a los deltas y a sus ecosistemas asociados como el bosque de mangle, sistemas lagunares, marismas, etc.

Las precipitaciones en la zona costera sur tienen un valor medio anual de 1106,88 mm, **Figura 41**, esto representa una diferencia de 350,46 mm (76%) con respecto al valor medio anual de la provincia Sancti Spíritus que es de 1457,34 mm, según la norma 1971-2000.

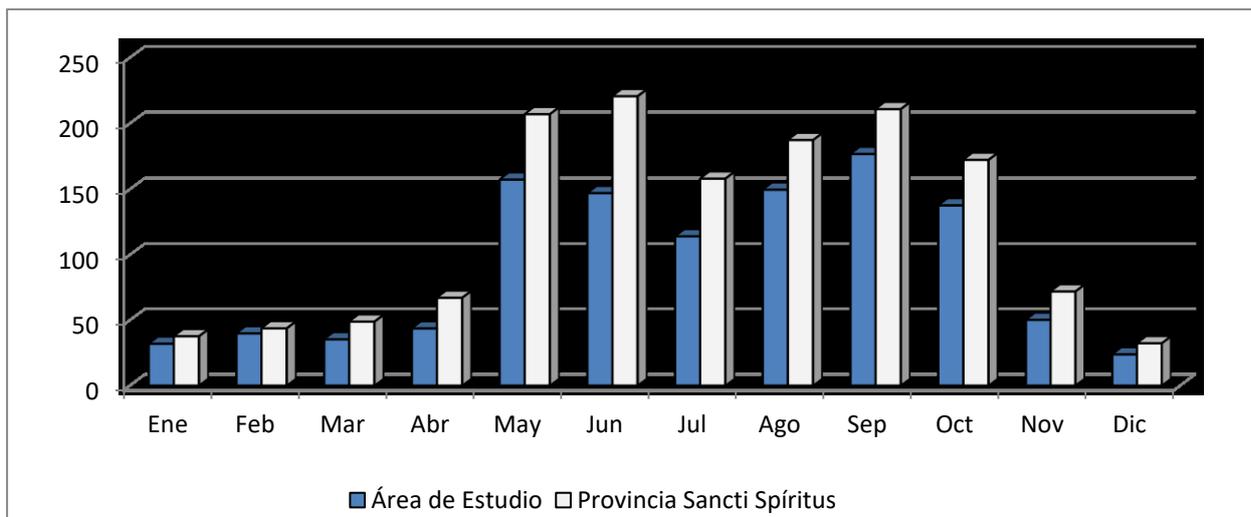


Figura 41. Comportamiento mensual de las precipitaciones (mm) en el área de estudio y la provincia de Sancti Spiritus, según norma (1971-2000).

En el periodo poco lluvioso la precipitación media es de 224,80 mm (21%), siendo noviembre el mes que más precipita con 50,22 mm y el de menos diciembre con 23,80 mm, **Figura 42a**. En el periodo lluvioso la precipitación media total es de 882,08 mm (79%), siendo septiembre el mes que más precipita con 176,69 mm y el de menos Julio con 114,04 mm, **Figura 42b**.

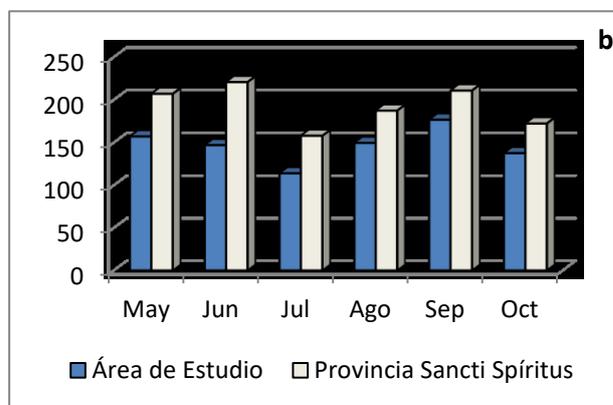
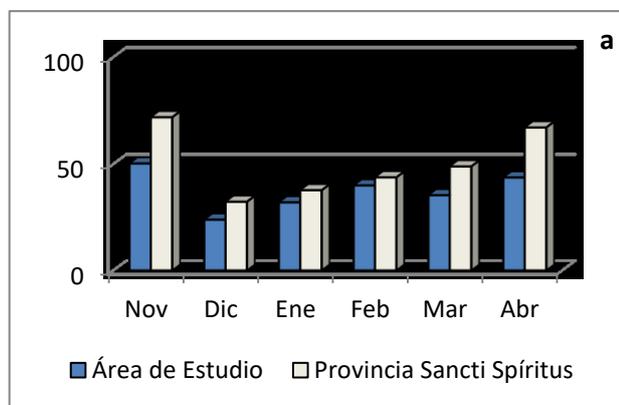


Figura 42. Comportamiento en el periodo poco lluvioso (a) y periodo lluvioso (b) de las precipitaciones (mm) en el área de estudio y la provincia de Sancti Spiritus, según norma (1971-2000).

El peligro de inundación costera por penetración del mar está dado por una combinación de factores físico-geográficos que conforman el escenario de peligro y factores meteorológicos que constituyen el factor disparador. (UNDRO, 1991). Entre los factores físicos-geográficos están la morfología de la costa (tipo de costa y pendiente costera) y la batimetría de la plataforma insular. Por su parte el factor meteorológico se expresa en la surgencia, o elevación anormal y temporal del nivel del mar sobre la marea astronómica pronosticada, a causa de la tensión provocada por los fuertes

vientos y (en menor grado) por la caída de la presión atmosférica que se genera al paso de un ciclón tropical (CT). El peligro por inundación costera puede expresarse por la siguiente ecuación:

Peligro= [surgencia + altura máxima estimada de la ola] + [morfología de la costa + batimetría]

La provincia de Sancti Spíritus se encuentra en una zona de alta densidad de trayectorias de penetración de ciclones tropicales (CT): "región I" o "región occidental". Al soplar el viento tormentoso producido por eventos ciclónicos sobre la superficie marina generan el efecto de apilamiento y oleaje; este fenómeno se puede diferenciar en dos tipos: Por la acción directa del arrastre del viento, conocido como "wind set up", y por el efecto de rompiente brusca del oleaje conocido como "wave set up".

El efecto producido por wind set up, ocurre en las costas de pendiente muy suave, como las que predominan en la costa sur de la provincia Sancti Spíritus, ocurriendo que la velocidad del movimiento superficial es tal, que se rompe el equilibrio habitual de desagüe por la corriente marina del fondo, por lo que el agua se acumula hacia la orilla y producen fuertes inundaciones, que ascienden en ocasiones por el cauce de los ríos provocando el desbordamiento de sus aguas que afectan e inundan áreas ocupadas por asentamientos, cultivos e instalaciones de la economía y la sociedad; igualmente son afectados los suelos, bosques y áreas protegidas que se encuentran en el valle de inundación de los ríos Agabama, Higuanojo, Zaza y Jatibonico del Sur.

El fenómeno de wave set up sólo aparece en la costa sur en los tramos costeros del río Cabagán al río Guaurabo y de La Boca a Las Caletas en el tramo costero del río Guaurabo a Punta Ancón en el municipio Trinidad, este efecto es más notable en las pendientes abruptas.

Otro fenómeno conocido y el más devastador que acompaña a los Ciclones Tropicales la "surgencia de huracán"; se manifiesta en aguas profundas como una onda larga, donde su longitud es proporcional al radio de vientos máximos del organismo, con escala espacial de varios kilómetros y temporal de varios días, coincidiendo con el tiempo de vida del ciclón tropical. Las surgencias pueden alcanzar grandes proporciones, del orden de varios metros, con penetraciones del mar en tierra que producen inundaciones catastróficas, con graves pérdidas económicas, afectación de viviendas y peligrosidad para la vida humana. La situación empeora si a su favor se encuentra la marea astronómica en su fase creciente, (W.M.O, 1978). La costa sur de la provincia de Sancti Spíritus a estado sometida a este tipo de eventos en años recientes, provocando graves impactos.

5.2. Características generales y fenológicas del bosque de mangle

Las especies vegetales que conforman los manglares poseen características y especializaciones morfológicas y funcionales que le dan un carácter colonizador a la vez que le permiten desarrollarse

en condiciones extremas en un medio acuático y salino y en suelos fangosos e inestables. Usando órganos especiales de respiración y sostén, metabolismo adaptado a altas concentraciones de sal, viviparidad y largo poder germinativo ((Menéndez et *al.*, 2000; Sánchez-Páez et *al.*, 2000) en Menéndez et *al.*, 2006)).

A diferencia de los bosques pluviales tropicales donde existen ciclos de elementos muy cerrados y la pérdida o exportaciones se reducen al mínimo, los bosques de mangle constituyen un sistema abierto que importa y exporta materiales; precisamente la alta productividad y la alta tasa de exportación son las características que le confieren al manglar tan elevada importancia en la ecología de las zonas costeras ((Cintron et *al.*, 1980) en Menéndez et *al.*, (2006)). Los manglares constituyen ecosistemas altamente especializados que mueren bruscamente cuando uno de los parámetros de su entorno se modifica, es por esto que, en las costas tropicales, son los primeros en detectar las variaciones del régimen hídrico, por pequeñas que estas sean ((Blasco, 1991) en Menéndez et *al.*, (2006)).

A través de los sistemas fluviales, el manglar se enlaza con los ecosistemas terrestres. Los ríos le entregan nutrientes que son utilizados por el manglar y más tarde exportados en forma de hojarasca convertida en detrito. Las alteraciones de los flujos naturales de nutrientes hacia el manglar traen graves alteraciones en la estructura y productividad de este ecosistema (UNESCO, 1979). La renovación de las aguas constituye un factor importante en la determinación directa o indirecta de las características más notables del bosque de mangle. A través del proceso de renovación de las aguas se produce el movimiento de las sustancias nutritivas por el manglar, la evacuación de las sustancias tóxicas y la entrada y salida de sustancias hacia o desde el sistema ((Lugo et *al.*, 1980) en Menéndez et *al.*, (2006)).

Los manglares cubanos ocupan de manera general las costas biogénicas, acumulativas, cenagosas y con esteros, donde el efecto de las mareas y los escurrimientos de agua dulce determinan su presencia; y constituyen una reserva forestal muy valiosa, representando el 26% de la superficie boscosa del país y conformando extensas masas boscosas ((Menéndez y Priego, 1994) en Menéndez et *al.*, (2006)).

Principales servicios ambientales que brindan los bosques de mangle en Cuba, según Menéndez et *al.*, (2006).

- Constituyen una franja de bosque protectora de las costas con función ecológica, económica y estratégica
- Mantiene el equilibrio en la zona costera impidiendo el avance de la intrusión salina.

- Contención de la erosión costera
- Reducción del riesgo de daños que puedan causar a la población, infraestructura productiva y cultivos agrícolas, eventos naturales como marejadas, tormentas tropicales y huracanes.
- Conservación de biodiversidad, sirviendo de hábitat permanente o temporal para especies importantes, ya sea por ser endémicas, raras, amenazadas o en peligro de extinción
- Mantenimiento de pesquerías locales a través de proteger el hábitat de especies comerciales capturadas in-situ.
- Mantenimiento de las pesquerías costeras o de altura, a través de servir de refugio a especies comerciales durante sus etapas juveniles.
- Fuente de recursos no pesqueros, como madera de construcción, carbón, leña, tanino y productos no maderables.
- Captura y almacenamiento de carbono atmosférico con efectos globales.
- Constituyen sitios de valores escénicos con importancia para el turismo

Los bosques de mangle pueden ser monodominantes y/o mixtos, estableciéndose una gran variedad de comunidades o tipos ecológicos. *Rhizophora mangle* (mangle rojo), ocupa generalmente la primera línea de la costa formando una franja prácticamente mono específica, también se localiza en los bordes de los canales, esteros y las lagunas costeras. En dependencia de las condiciones ecológicas e hidrológicas en Cuba, pueden desarrollarse bosques considerados como altos que pueden sobrepasar los 15 metros de altura, y achaparrados o enanos cuando la salinidad aumenta y los nutrientes son deficitarios (Menéndez et *al.*, 2006).

El *Avicennia germinans* (mangle negro) y *Laguncularia racemosa* (pataban) se localizan frecuentemente detrás de esta primera franja de *Rhizophora mangle*, a veces conformando bosques mixtos, y en otras ocasiones distribuyéndose por franjas; generalmente la franja de *Avicennia germinans* se localiza detrás de la franja de *Rhizophora mangle*. Es posible localizar áreas con bosque mono dominantes de *Laguncularia racemosa*, denominados patabanales detrás del bosque de mangle mixto o en sitios donde el efecto de marea y la inundación son menores. La *Conocarpus erectus* (yana) ocupa en general la última faja del manglar y en muchas ocasiones está asociado con parches de vegetación halófito baja en aquellos sitios salinos; se localizan bosque monodominantes de esta especie, conocido como yanales en extensas zonas situadas en el borde de la franja de mangle y con mínima inundación (Menéndez et *al.*, 2006). Las especies *Laguncularia racemosa* y *Conocarpus erectus* se le reconocen en su conjunto en Cuba como mangle blanco.

Los tramos costeros en el área de estudio definen ecosistemas diversos, donde el bosque de mangle, juega un papel fundamental en la estabilidad ecológica formado por las especies: *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* y *Canocarpus erectus*, catalogada esta última especie como pseudo mangle o especie periferal, según Menéndez et *al.*, (2006). A estas cuatro especies formadoras del bosque de mangle se asocian otras según aparecen y caracterizan los ecosistemas de los deltas de los ríos: Agabama, Zaza y Jatibonico del Sur, en la zona costera sur de la provincia de Sancti Spíritus.

En el **delta del río Agabama** sobre la línea de costa, **Figura 43**, se establece un importante estrato

de *Rhizophora mangle* achaparrado (los manglares achaparrados, enanos o de pequeña talla que no sobrepasan los dos metros de altura, situados en sitios altamente tensionados, tanto por la pobreza de los suelos como por los altos valores de salinidad, pudieran ser considerados como matorrales (Menéndez et *al.*, 1987; Vilamajó y Menéndez, 1987; Menéndez y Priego, 1994)); en los sectores este y oeste, alejado de la influencia directa del impacto de las avenidas



Figura 43. *Rhizophora mangle* (mangle rojo) achaparrado, sobre un sustrato rico en sílice.

del río y sobre un sustrato con predominio de sedimentos ricos en sílice, que le confieren escasos nutrientes, un alto grado de acidez y bajo contenido de materia orgánica, Orozco y García-Lahera, (2014). Los cayos al sur del delta del Agabama y paralelos a la línea de costa se caracterizan por la presencia casi en su totalidad de *Rhizophora mangle*, en estos casos de mayor envergadura.

En la zona de influencia y formación del delta encontramos elementos del complejo de vegetación de costa arenosa, se observan pocos individuos de *Rhizophora mangle*, con la presencia de *Ipomoea pes-caprae* (boniato de costa), *Guilandina bonduc* (guacalote amarillo), *Arundo donax* (caña de castilla), *Iva cheiranthifolia* (artemisa de playa), *Canavalia rosea* (mate de costa), *Sesuvium portulacastrum* (verdolaga de playa) y *Batis maritima* (grama de costa). La especie *Avicennia germinans* aparece en varios sectores “muerto” probablemente por el impacto del viento, el oleaje, la surgencia y la colmatación de esteros y canales que generó el huracán Denis en el año 2004; en otros sectores aparece de manera achaparrada con un fuerte estrés, apreciándose su recuperación en las diferentes fases de regeneración natural.

En dirección a los sectores emergidos encontramos *Canocarpus erectus* en asociación con gramíneas, *Cryptostegia grandiflora* (estrella del norte), *Ambrosia sp.*, *Acacia farnesiana* (aroma amarilla), *Terminalia catappa* (almendra), *Casuarina equisetifolia* (casuarina), *Ipomoea alba* (flor de la Y), *Mimosa pigra* (weyler), *Macroptilium lathyroides* (maribari), *Thespesia populnea* (majagüilla), *Turnera ulmifolia* (marilope). En los saladares los cuales constituyen zonas de intercambio entre la zona más antropizada y más conservadas, inundadas temporalmente, encontramos, *Quadrella cynophallophora* (aceitunillo), *Parkinsonia aculeata* (pararrayo), *Avicennia germinans*, *Cryptostegia grandiflora*, rodeando las lagunas aparecen franjas monoespecíficas de *Laguncularia racemosa*. En el estrato herbáceo predomina *Batis maritima*. Sobre algunos individuos se encuentra *Dendropemon confertiflorus* (palo caballero).

Los sectores de suelos completamente emergidos se caracterizan por la presencia de extensiones de bosque y matorrales secundarios o sinantrópicos. Las especies que lo conforman son *Samanea saman* (algarrobo del país), *Muntingia calabura* (guinda), *Guazuma ulmifolia* (guásima), *Cordia dentata* (ateje blanco), *Melicoccus bijugatus* (mamoncillo), *Lysiloma latisiliquum* (soplillo). Otras especies abundantes son: *Jacquinia aculeata* (espuela de caballero), *Pisonia aculeata* (zarza), *Pluchea carolinensis* (salvia), *Dichrostachys cinerea* (marabú), *Cryptostegia grandiflora*, *Mimosa pigra* y *Acacia farnesiana*. El sotobosque es muy ralo, con individuos de *Petiveria alliacea* (anamú), *Achyranthes aspera*, *Solanum bahamense* (ajicón), *Heliotropium indicum* (alacrancillo), *Sida ulmifolia* (malva de caballo), *Solanum torvum* (pendejera).

En dirección este, alejado de la influencia de las avenidas del río Agabama y sin la presencia marcada de deposiciones silíceas y próximo al delta del río Higuanojo (Los Hicacos), **Figura 44**, se



Figura 44. *Rhizophora mangle*, alejado de la zona de influencia directa de las avenidas del río Agabama, sobre un sustrato pobre en sílice.

presenta una ancha franja de *Rhizophora mangle* e inmediatamente después aparece un complejo de vegetación de costa arenosa, con elementos de bosque siempreverde micrófilo, *Avicennia germinans* y *Canocarpus erectus*, en una porción estrecha seguida de lagunas extensas. En este sector abundan especies como: *Pentalinon luteum* (bejuco marrullero), *Acacia macracantha* (guatapaná), *Lysiloma latisiliquum*, *Portulaca oleracea* (verdolaga), *Selenicereus*

grandiflorus (pitahaya), *Iva cheiranthifolia*, *Portulaca pilosa* (diez del día), *Opuntia dillenii* (tuna brava), *Capparis flexuosa* (mostacilla), *Malpighia cubensis* (palo bronco), *Dichrostachys cinerea*, *Sesuvium portulacastrum*, *Batis maritima*, *Acacia farnesiana*, *Cryptostegia grandiflora*.

En el **delta del río Zaza** encontramos el área protegida Refugio de Fauna “Tunas de Zaza”, ecosistema con una elevada fragmentación e impactada por la regulación antrópica de las aguas del río Zaza, la presencia de la cría intensiva del camarón, ganadería, pesca, cultivos intensivos de arroz y caña de azúcar, usos forestales, industrias y asentamientos rurales y rural-urbanos que producen intensos procesos de estrés e impactos negativos.

La presencia de *Rhizophora mangle* está asociada casi exclusivamente a la franja hidrorreguladora del río Zaza y a lagunas conectadas directamente a los flujos directos del río. Los parches ocupados por *Avicennia germinans* aparecen fragmentados, **Figura 45**, en varios sectores más al norte del delta y ocupando áreas en los sistemas lagunares en dirección paralela a la línea de costa y conectados directamente con la influencia de las aguas fluviales en los sectores oeste y este con elevada presencia de impactos, estrés e individuos muertos; que han favorecido la evidente pérdida de línea de costa. La especie *Conocarpus erectus* aparece en suelos emergidos salinizados, muy estresada, asociada a la *Batis maritima*. Se encontraron



Figura 45. *Avicennia germinans*, laguna del Viaducto, en el sector norte del delta del río Zaza.

relictos de *Avicennia germinans* y matorral secundario asociado a un área con presencia de *Copernicia gigas* donde existen impactos muy negativos asociados a la ganadería.

En el **delta del río Jatibonico del Sur** encontramos la presencia de *Rhizophora mangle* en algunos sectores en dirección a la desembocadura del río y esteros apareciendo potentes individuos de mangle rojo sobre una franja o berma en suelos hidromórficos, formados sobre depósitos turbo-margosos y arcillo-limosos. En dirección norte aparecen sistemas de lagunas con *Avicennia germinans*. Al oeste y paralelo a la línea de costa, alejándonos de la desembocadura, la franja o berma, se estrecha comenzando un mezclamiento de *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans* y *Laguncularia racemosa*, **Figura 46**, y otras especies que aparecen normalmente en el complejo de vegetación de costa arenosa, como: *Distichlis spicata* (grama de costa), *Canavalia rosea*, *Thespesia populnea*, *Spilanthes urens* (sensitiva silvestre) e invasoras como *Achyranthes aspera* (rabo de gato), *Cordia*

obliqua (ateje blanco), *Cryptostegia grandiflora*, *Mimosa pigra*, *Acacia farnesiana*, algunos individuos de *Dichrostachys cinerea* e *Ipomoea alba*. En un sector, todavía más al oeste, de la desembocadura del río Jatibonico del Sur las lagunas aparecen colmatadas y con abundantes individuos muertos de *Avicennia germinans*, aparentemente por los altos flujos de agua cargada de sedimentos y residuales químicos que se originan por el desembalse de los diques y terrazas utilizadas en la producción intensiva del cultivo de arroz.



Figura 46. Erosión marina y muerte del bosque de mangle.

En otros sectores la población de *Avicennia germinans* aparece fragmentada asociada a saladares en suelos aluviales con la presencia de *Batis maritima* y *Distichlis spicata*. En zonas temporalmente inundadas encontramos una extensa área de *Canocarpus erectus* con varias especies de palmas de los géneros *Copernicia* y *Sabal*, *Batis maritima*, *Spilanthus urens*, *Iva cheiranthifolia*, *Sesuvium portulacastrum*, *Metopium toxiferum* (guao de costa), *Harrisia eriophora* (pitahaya), *Rhabdadenia biflora* (cativo mangle), *Caesalpinia vesicaria* (brasilete), *Typha domingensis* (macío), *Acrostichum danaefolium* (helecho de costa), *Cryptostegia grandiflora*, *Pentalinon luteum* y *Opuntia dillenii*.

La sabana antrópica, bordeando la *Canocarpus erectus* (yana), se presenta en las zonas emergidas, que pueden ser inundadas temporalmente por eventos climáticos extremos, se caracteriza por la presencia de palmas del género *Copernicia* y *Sabal*, con arbustos y árboles dispersos de *Bucida buceras* (júcaro), *Quadrella cynophallophora*, *Tabebuia lepidota* (júcaro blanco), *Portulaca oleracea*

(verdolaga), *Selenicereus grandiflorus*, *Capparis flexuosa*, *Brya ebenus* (granadillo), *Macroptilium lathyroides*, *Heliotropium curassavicum* (alacrancillo de playa), así como *Tillandsia recurvata* (curujey) y *Tillandsia usneoides* (guajaca).

El estudio del comportamiento fenológico de las especies arbóreas, ha aportado datos para la comprensión y estimados precisos del establecimiento y futuro desarrollo de los diferentes ecosistemas, y las posibilidades de regeneración que éstos poseen ((Vilamajó, 1984) en Menéndez et *al.*, (2006). Las fases fenológicas están muy relacionadas con las precipitaciones, dado que la estacionalidad en los trópicos está fundamentalmente ligada a esta variable climática ((Opler et *al.*, 1976) en Menéndez et *al.*, (2006)).

Según, Menéndez et *al.*, (2006), los patrones fenológicos de las principales especies arbóreas de los manglares cubanos tienen las siguientes características:

- Las cuatro especies arbóreas principales que conforman los bosques de mangles en Cuba: *Rhizophora Mangle*, *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* y *Conocarpus erectus* presentan abundante follaje durante todo el año, corroborando su condición de siempre verdes. Según Menéndez et *al.* (2006), la caída de hojarasca ocurre durante todo el año y las hojas nuevas aparecen fundamentalmente en el periodo de mayor pluviosidad (Mayo-Octubre), cuando como tendencia general se produce la mayor caída de hojarasca.



- La fase de floración en *Rhizophora mangle*, aunque se mantiene todo el año, la mayor abundancia de flores se produce en los meses de menor pluviosidad.
- Las especies *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* y *Conocarpus erectus*, presentan periodos definidos de tiempo en sus fases de floración y fructificación.
- Las fenofases en las cuatro especies *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* y *Conocarpus erectus* presentan desplazamientos de las fases entre años con pequeñas diferencias entre los años.
- *Rhizophora Mangle*, *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* y *Conocarpus erectus* muestran periodos de máxima fructificación coincidente con la época de mayor pluviosidad, evidenciando una estacionalidad de esta fase fenológica fundamental para la regeneración natural y acorde con las estrategias regenerativa de cada especie.

5.2.1. Observaciones de campo

Los bosques de mangle son ambientes complejos y dinámicos caracterizados por sus altos niveles de diversidad biológica y productividad. Constituyen áreas de refugio y crianza para una amplia variedad de peces y fauna silvestre. Desempeñando un papel fundamental en la protección de la línea de costa, la prevención de inundaciones, el mantenimiento de la calidad del agua y la recarga de agua del manto freático. Además, de una alta productividad que pueden superar las 14 toneladas de peso seco de carbono por hectárea por año (principalmente en la producción de hojarasca consumida por el resto de la cadena alimenticia)

A pesar de los múltiples beneficios ecológicos, económicos y culturales que los bosques de mangle ofrecen, se trata de uno de los ambientes tropicales costeros más amenazados. La modificación de las tasas de sedimentación, escurrimiento de agua dulce y de inundaciones intermareales como resultado de las actividades humanas tanto a nivel local y regional, así como la eliminación directa de manglares por la expansión de asentamientos humanos, industria, agricultura y explotación forestal han reducido considerablemente la extensión de estos bosques (Manson et *al.*, 2003).

En el área de la costa sur de la provincia de Sancti Spíritus se aprecian perturbaciones naturales y antrópicas, **Tabla 4**, que impactan negativamente a estos ecosistemas de bosque de mangle:

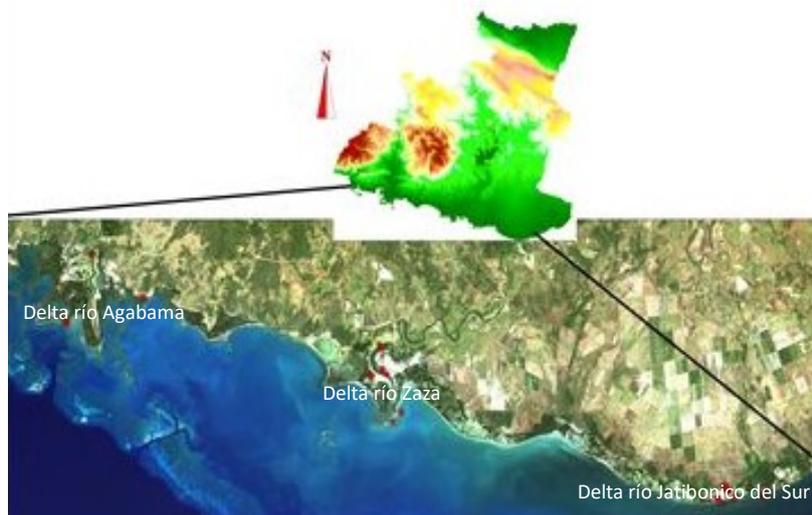
Tabla 4. *Perturbaciones naturales y antrópicas en la costa sur de la provincia Sancti Spíritus*

<i>Perturbaciones Naturales</i>	<i>Perturbaciones Antrópicas</i>
<ul style="list-style-type: none">. <i>Ciclón Tropical (principal perturbación)</i>. <i>Precipitaciones Intensas</i>. <i>Sistemas Meteorológicos Extremos</i>. <i>Ascenso del Nivel Medio del Mar</i>. <i>Geotectónica</i>. <i>Tsunamis</i>	<ul style="list-style-type: none">. <i>Regulación del agua dulce por Construcción de Embalses.</i>. <i>Construcción de sistemas de canales y canal magistral de trasvase de agua hacia obras de regadío.</i>. <i>Construcción de estanques para cría intensiva del camarón.</i>. <i>Crecimiento demográfico y desarrollo urbano en pequeños y medianos asentamientos costeros.</i>. <i>Construcciones no compatibles en ecosistemas frágiles (hoteles, industrias, viviendas, caminos, carreteras y etc.).</i>. <i>Uso de suelos para explotación forestal, cultivo intensivo del arroz (donde se generan residuales líquidos químico-tóxicos) y pastos para usos ganaderos (aparecen factores degradativos de los suelos).</i>

En el estudio se realizaron un total de 61 parcelas, **Tabla 5**, según Protocolo para el monitoreo del ecosistema de manglar, Menéndez et *al.*, (2003) y Menéndez et *al.*, (2006). En el mes de agosto y primera semana de septiembre del 2015, en las zonas de trabajo siguientes:

Tabla 5. Zonas de trabajo, en el bosque de mangle en la costa sur de la provincia de Sancti Spiritus, Cuba

Zona de trabajo	Fecha	Cantidad de parcelas
Delta del río Jatibonico del Sur	4-6/agosto y 5 de septiembre/2015	35 parcelas
Delta del río Agabama	18-20/agosto/2015	8 parcelas
Delta del río Zaza	25-27/agosto/2015	18 parcelas



- Metodología de trabajo, **Figura 47**:
 - . Establecimiento de parcelas de 10 m x 10 m (100 m²) distribuidas en el bosque de mangle.
 - . Geoposición de cada parcela usando Sistema de Posicionamiento Global.
 - . En cada parcela se tomaron los datos como aparece recogido en las planillas de campo, **Anexo 1**.
- Materiales y herramientas computacionales:
 - . Sistema de Posicionamiento Global: GPS Garmin modelo eTrex 20
 - . Sistemas de Información Geográfica
 - . Cinta Métrica
 - . Planos cartográficos
 - . Imágenes satelitales
 - . Cámara fotográfica
 - . Laptop



Figura 47. Metodología de trabajo utilizada en la costa sur de la provincia de Sancti Spiritus.

5.2.2. Series de tiempo de imágenes multiespectrales Landsat – 8 OLI

Para este estudio se utilizaron series de tiempo de imágenes multiespectrales Landsat – 8 OLI, obtenidas en la página WEB del Servicio Geológico de los Estados Unidos de América (<http://earthexplorer.usgs.gov/>), Path:14/Row:45. Con criterio de cobertura nubosa menor del 10% para los meses noviembre y diciembre del 2014 y los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo, julio, octubre y diciembre del 2015. La información utilizada pertenece a las bandas del visible: banda 2 (30 m, 0,452 – 0,512), banda 3 (30 m, 0,533 – 0,590) y banda 4 (30 m, 0,636 – 0,673) y a las bandas del infrarrojo: banda 5 (NIR, 30 m, 0,851 – 0,879), banda 6 (SWIR-1, 30 m, 1,566 – 1,651) y banda 7 (SWIR-2, 30 m, 2,107 – 2,294). En la **Tabla 6**, aparece una descripción para cada una de las imágenes, las cuales recibieron calibración radiométrica y geométrica para la reflectancia utilizando algoritmos realizados sobre lenguaje de programación M (MATLAB), **Anexo 2**.

Tabla 6. Imágenes Landsat para la región central de Cuba. **Fuente:** www.earthexplorer.usgs.gov

Fecha	Imagen				
	Sensor	Columna	Fila	Proyección	Coordenadas Lat./Lon.
11/noviembre/2014	LandSat 8 - OLI	14	45	UTM-17N/WGS-84	21.6753, -79.9260
13/diciembre/2014	LandSat 8 - OLI	14	45	UTM-17N/WGS-84	21.6753, -79.9260
14/enero/2015	LandSat 8 - OLI	14	45	UTM-17N/WGS-84	21.6753, -79.9260
19/febrero/2015	LandSat 8 - OLI	14	45	UTM-17N/WGS-84	21.6753, -79.9260
19/marzo/2015	LandSat 8 - OLI	14	45	UTM-17N/WGS-84	21.6753, -79.9260
20/abril/2015	LandSat 8 - OLI	14	45	UTM-17N/WGS-84	21.6753, -79.9260
03/mayo/2015	LandSat 8 - OLI	14	45	UTM-17N/WGS-84	21.6753, -79.9260
25/julio/2015	LandSat 8 - OLI	14	45	UTM-17N/WGS-84	21.6753, -79.9260
29/octubre/2015	LandSat 8 - OLI	14	45	UTM-17N/WGS-84	21.6753, -79.9260
16/diciembre/2015	LandSat 8 - OLI	14	45	UTM-17N/WGS-84	21.6753, -79.9260

5.3. Relación entre el comportamiento fenológico del bosque de mangle y la reflectancia con imágenes multiespectrales Landsat – 8 OLI monotemporales

Si analizamos la relación entre el comportamiento fenológicos de las especies que componen el bosque de mangle (*Rhizophora Mangle*, *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* y *Conocarpus erectus*) en la costa sur de la región central de Isla de Cuba con la reflectancia de imágenes multiespectrales LandSat – 8 OLI monotemporales para las bandas del visible e infrarrojo: encontramos que las respuestas expresadas en las imágenes confirman los resultados obtenidos por estudios anteriores referidos a su fenología, Menéndez et *al.*, (2006), aportando además valiosa información que caracteriza el comportamiento mensual en las imágenes Landsat 8 – OLI que no han sido descritas con anterioridad para estas especies que conforman el bosque de mangle en Cuba.

El bosque de mangle clasifica como vegetación siempreverde, manteniendo todo el año abundante presencia de hojas por encima del 70%. Las bandas del espectro electromagnético del visible para la vegetación sana expresan un comportamiento de alta absorción y baja reflectancia y transmitancia debido a los pigmentos, aunque la presencia de clorofila puede determinar para la banda 3, con la abundante presencia de hojas un aumento de la reflectancia, si lo comparamos con la banda 2 y con la banda 4, debido a que las moléculas de clorofila preferentemente absorben la luz roja y azul para usarla en la fotosíntesis, absorbiendo tanta cantidad como 70% a 90% de luz incidente, **Figura 48**.

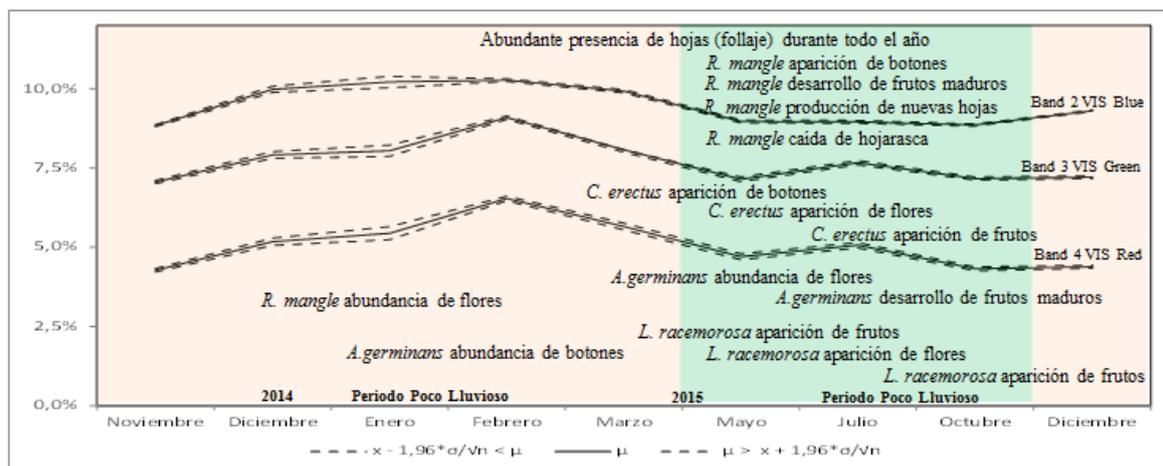


Figura 48. Relación entre la reflectancia para las bandas del visible y la fenología del bosque de mangle por meses.

Para la banda 5 (NIR) infrarrojo cercano, en la vegetación sana, la absorción es baja, la reflectancia es media-alta y la transmitancia es media, **Figura 49**. En esta región del espectro electromagnético, la reflectividad crece notablemente comparada con el visible debido a la escasa absorción de la vegetación por su estructura fisiológica; debido a que la reflexión no es controlada

por la presencia de clorofila, sino, por la estructura del tejido esponjoso presente en las hojas. La cutícula y la epidermis son mayormente transparentes a la radiación infrarroja, una muy pequeña radiación es reflejada por la parte exterior de la hoja, que en su interior esparce por el tejido esponjoso y las cavidades de la hoja la radiación; con lo cual provoca que muy poca de esta energía infrarroja sea absorbida internamente y es por encima del 60% reflejada, entonces ocurre una elevada reflectancia infrarroja de la vegetación sana, en el bosque siempreverde de mangle.

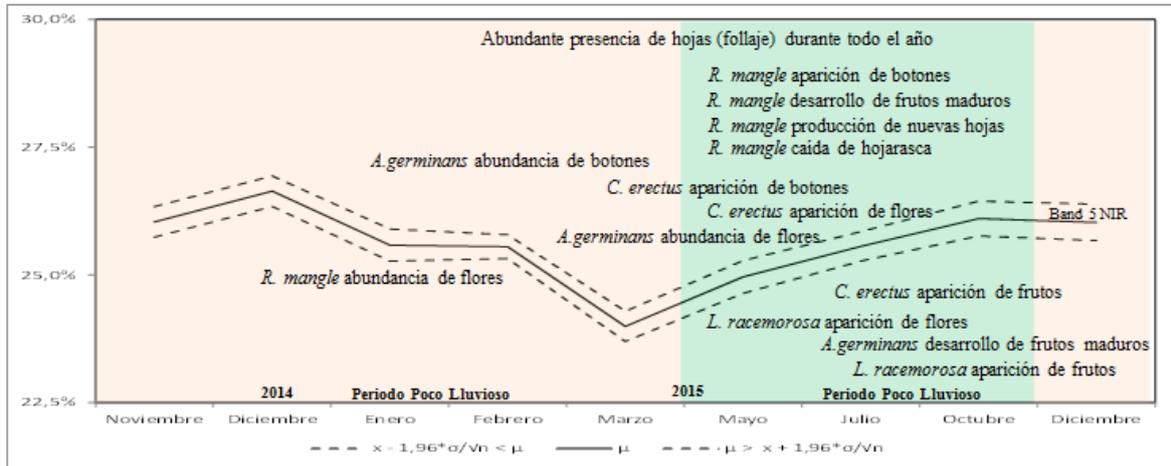


Figura 49. Relación entre la reflectancia para la banda del infrarrojo cercano y la fenología del bosque de mangle por meses.

Para las bandas 6 y 7 del infrarrojo medio (SWIR - 1 y SWIR - 2), la absorción es media-alta, la reflectancia es media y la transmitancia baja en la vegetación sana. En esta región del espectro, el agua contenida en la hoja es la responsable de la baja reflectividad, dado que el agua presenta un máximo de absorción para el infrarrojo medio, **Figura 50**, como se muestra para el caso del bosque de mangle.

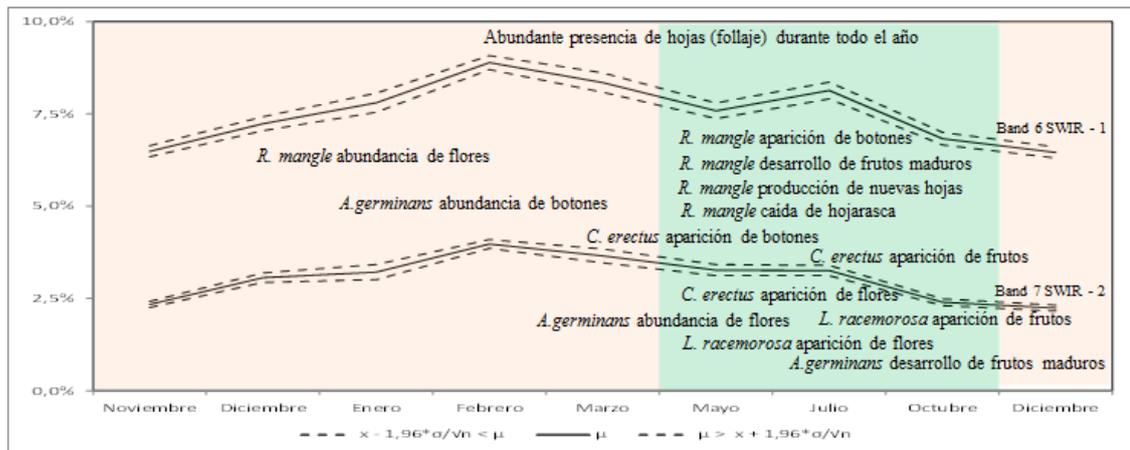


Figura 50. Relación entre la reflectancia para las bandas del SWIR-1 y SWIR-2 y la fenología del bosque de mangle por meses.

Para la especie, *Rhizophora mangle*, la banda del visible, **Figura 51**, tiene un comportamiento bajo debido a la presencia de hojas todo el año, en el periodo poco lluvioso de noviembre a abril la cobertura vegetativa disminuye con un máximo negativo en los meses de febrero y marzo; el periodo lluvioso se inicia en mayo con el aumento de la presencia de hojas nuevas que acrecientan la cobertura que hace que los valores en las bandas del visible disminuyan con una ligera inflexión positiva en el mes de julio indicador de menor cobertura vegetativa al ocurrir una disminución de las precipitaciones que debe impactar con una menor presencia de follaje.

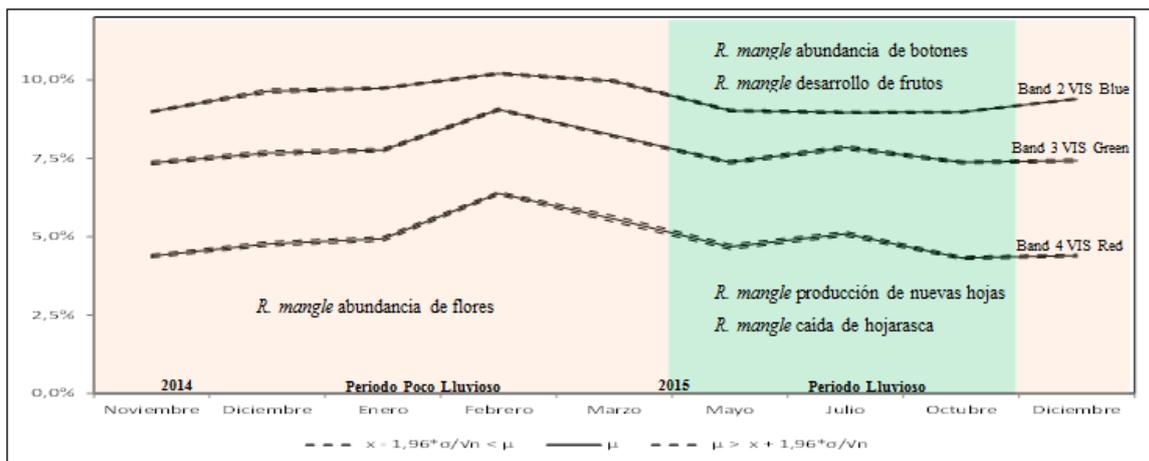


Figura 51. Relación entre la reflectancia para las bandas del visible y la fenología de la especie *Rhizophora mangle* (mangle rojo) por meses.

El infrarrojo cercano, **Figura 52**, muestra valores altos todo el año, lo cual expresa la abundancia de follaje para la *Rhizophora mangle*, coincidiendo con los resultados observados en las bandas del visible que reflejan menor presencia de follaje en los meses de febrero y marzo y un aumento progresivo a partir de mayo, indicador de mayor cobertura vegetativa en todo el periodo lluvioso con una ligera inflexión negativa en el mes de julio, indicador de menor presencia de hojas y de humedad.

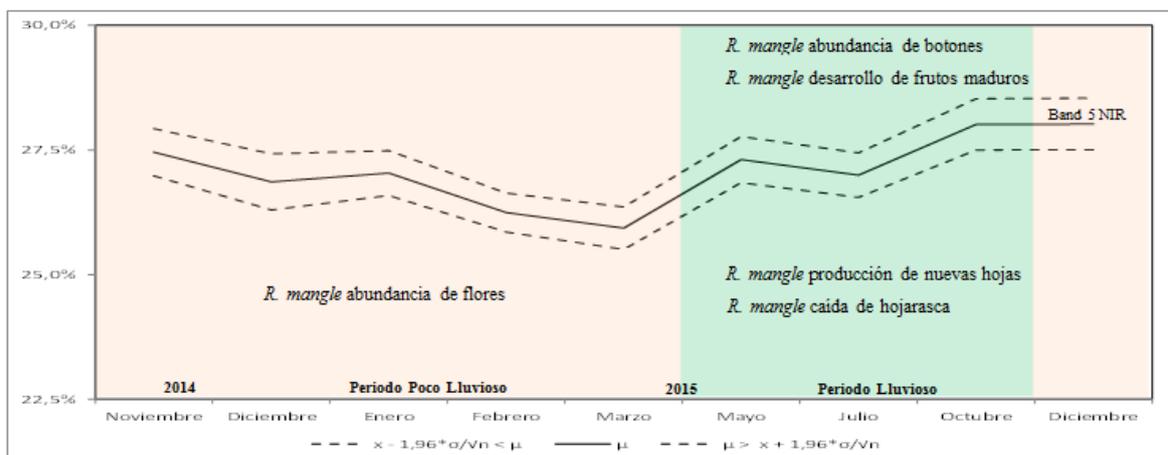


Figura 52. Relación entre la reflectancia para la banda del infrarrojo cercano y la fenología de la especie *Rhizophora mangle* (mangle rojo) por meses.

El infrarrojo medio, **Figura 53**, presenta valores bajos todo el año, en el *Rhizophora mangle*, lo cual es un reflejo de la elevada cobertura de follaje que hace que la presencia de agua en las hojas indique una marcada disminución de la reflectancia para esta región del espectro; existen inflexiones positivas en los meses de febrero y marzo para el periodo poco lluvioso y julio en el lluvioso lo cual es un reflejo de la menor cobertura vegetativa y de humedad.

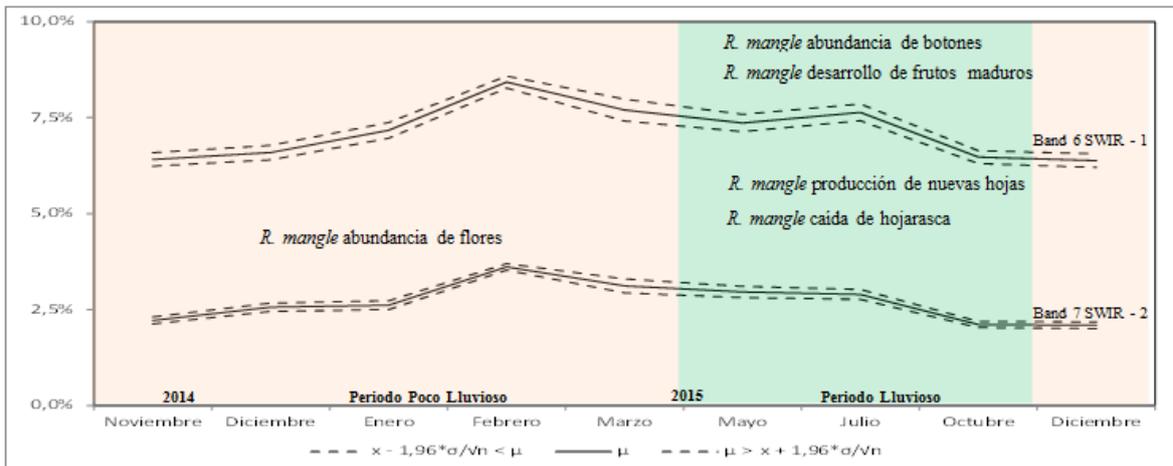


Figura 53. Relación entre la reflectancia para las bandas del SWIR-1 y SWIR-2 y la fenología de la especie *Rhizophora mangle* (mangle rojo) por meses.

Para la especie, *Avicennia germinans*, **Figura 54**, debido a la abundante presencia de hojas todo el año la reflectividad es baja para las bandas del visible, con una ligera diferencia en los meses del periodo poco lluvioso, cuando existe menor presencia de hojas, hasta el inicio en el mes de mayo del periodo lluvioso cuando encontramos un incremento en los brotes de nuevas hojas y del follaje, para esta especie ocurre menor presencia de hojas en los meses de enero y febrero para el periodo poco lluvioso y en el mes de julio en el periodo lluvioso.

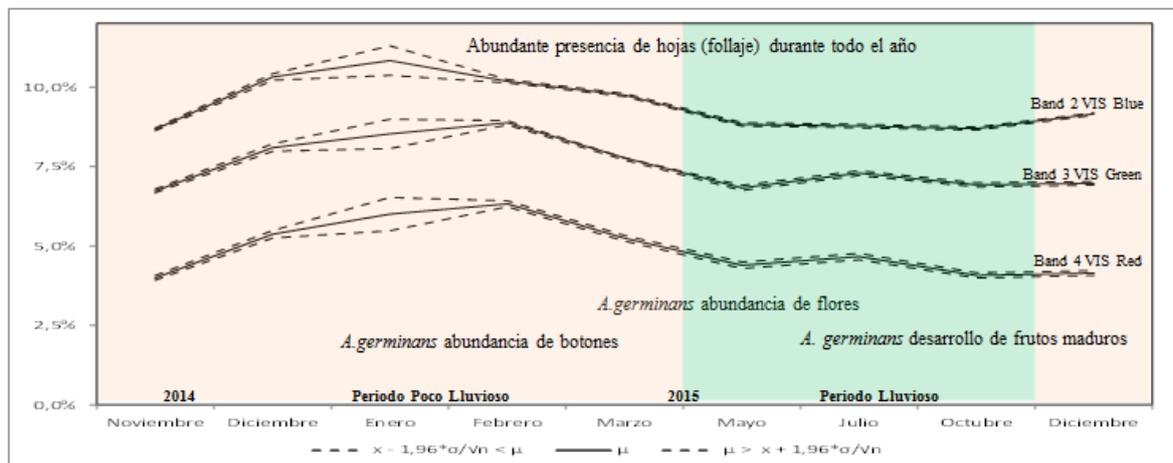


Figura 54. Relación entre la reflectancia para las bandas del visible y la fenología de la especie *Avicennia germinans* (mangle negro) por meses.

Con respecto al infrarrojo cercano, **Figura 55**, la especie *Avicennia germinans*, presenta valores altos de reflectancia característico de la vegetación sana en esta región del espectro; con valores que reflejan los mínimos de cobertura vegetativa en los meses finales del periodo poco lluvioso, marzo y abril; con un aumento del follaje nuevamente en los meses del periodo lluvioso con un máximo marcado en los meses de noviembre y diciembre.

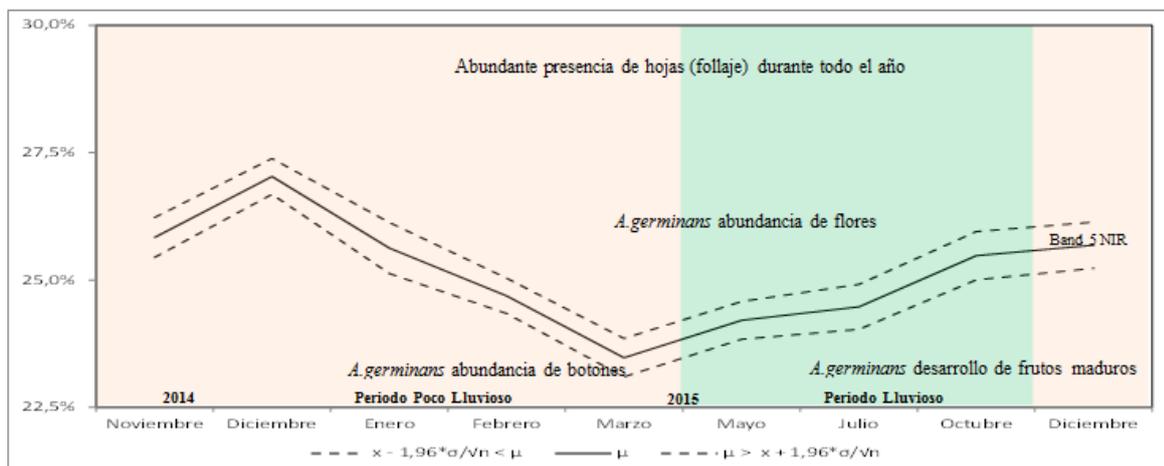


Figura 55. Relación entre la reflectancia para la banda del infrarrojo cercano y la fenología de la especie *Avicennia germinans* (mangle negro) por meses.

El infrarrojo medio, **Figura 56**, presenta valores bajos de reflectancia, característico para el follaje con presencia de agua. Los valores son relativamente más altos en los meses de enero y febrero del periodo poco lluvioso lo cual indica presencia de menos humedad, y se hacen mucho menor hacia el periodo lluvioso indicando aumento de la presencia de hojas con los valores máximos indicados por la baja reflectancia en los meses de noviembre y diciembre a inicios del periodo poco lluvioso.

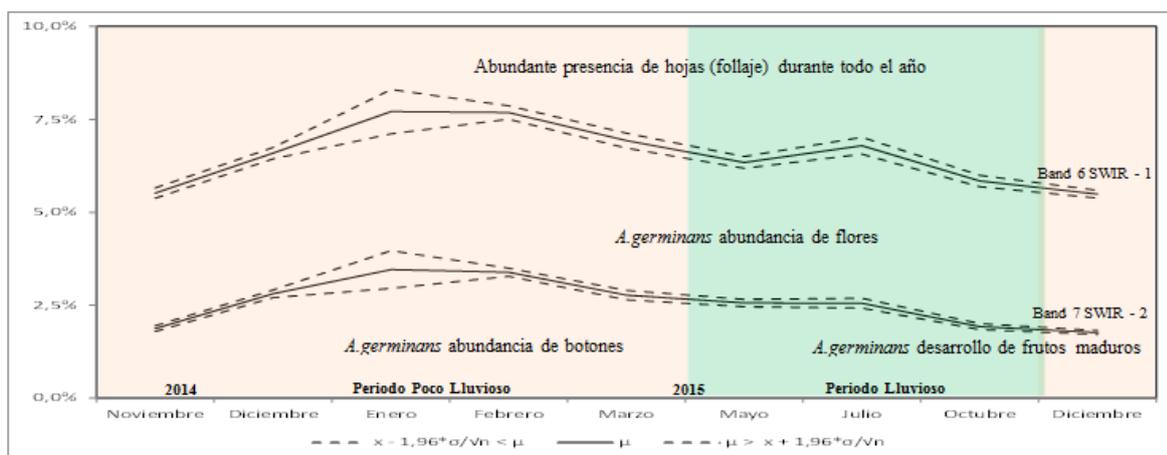


Figura 56. Relación entre la reflectancia para las bandas del SWIR-1 y SWIR-2 y la fenología de la especie *Avicennia germinans* (mangle negro) por meses.

Para las especies de mangle blanco, *Laguncularia racemosa* y el *Conocarpus erectus*, **Figura 57**, muestra que su comportamiento tiene un acercamiento marcado a la vegetación de zonas emergidas paralelas al bosque de mangle, temporalmente inundables, que conforman la vegetación del bosque siempreverde de ciénaga, el bosque semidecíduo mesófilo de humedad fluctuante, bosques secundarios, matorrales secundarios, comunidades herbáceas y sabanas antrópicas.

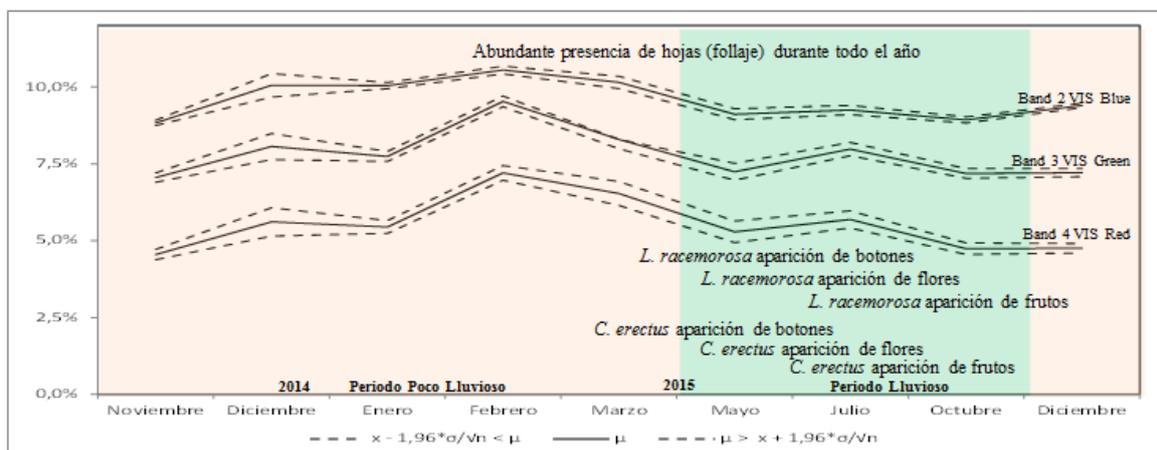


Figura 57. Relación entre la reflectancia para las bandas del visible y la fenología de la especie *Laguncularia racemosa* y *Conocarpus erectus* (mangle blanco) por meses.

Con una baja reflectancia en las bandas del visible, debido a la presencia de abundante cobertura vegetativa todo el año. En los meses del periodo poco lluvioso ocurre un aumento de la reflectividad asociada a una menor presencia de hojas, incrementándose la abundancia del follaje en los meses del periodo lluvioso con mayor producción de nuevas hojas y una disminución de la reflectancia.

Para la banda del infrarrojo cercano, **Figura 58**, la reflectancia se incrementa notablemente con respecto a las bandas del visible, para las especies del mangle blanco (*Laguncularia racemosa* y *Conocarpus erectus*) estos valores reflejan la abundante presencia de hojas durante todo el año, con un comportamiento marcadamente diferente a las especies *Rhizophora mangle* (mangle rojo) y *Avicennia germinans* (mangle negro).

Para el mangle blanco (*Laguncularia racemosa* y *Conocarpus erectus*) ocurren máximos de reflectancia asociados a incrementos en la producción vegetativa en los meses de diciembre y febrero del periodo poco lluvioso y en el mes de julio del periodo lluvioso; los mínimos de follaje ocurren al final del periodo poco lluvioso en los meses de marzo y abril con un incremento transicional a valores altos en los meses del periodo lluvioso.

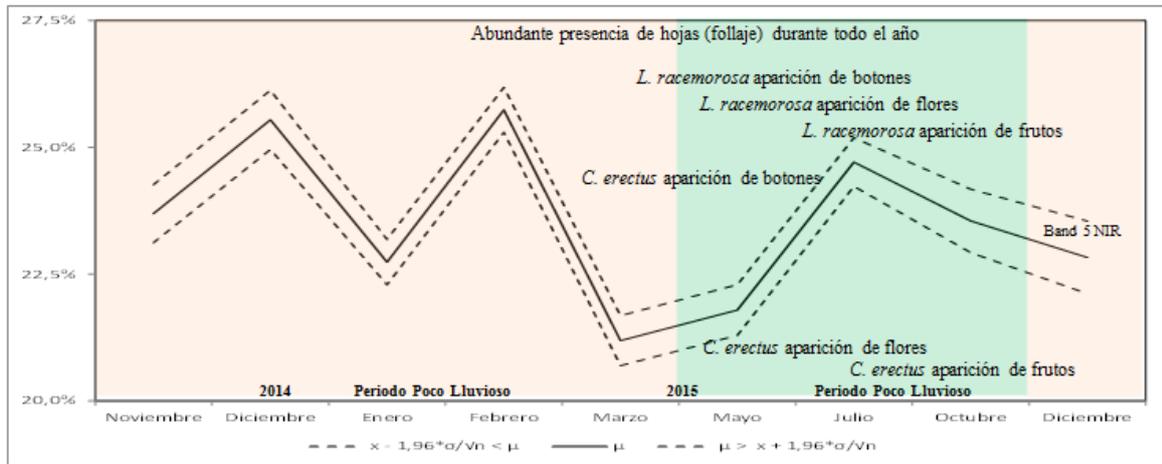


Figura 58. Relación entre la reflectancia para la banda del infrarrojo cercano y la fenología de la especie *Laguncularia racemosa* y *Conocarpus erectus* (mangle blanco) por meses.

Para el mangle blanco (*Laguncularia racemosa* y *Conocarpus erectus*), **Figura 59**, el infrarrojo medio tiene valores bajos, indicativo de la presencia de agua en las hojas y abundante follaje durante todo el año. En el periodo poco lluvioso ocurren los menores porcentajes en la cobertura vegetativa debido a la menor humedad. Para los meses del periodo lluvioso ocurren valores menores de reflectancia y valores superiores de presencia de cobertura vegetativa.

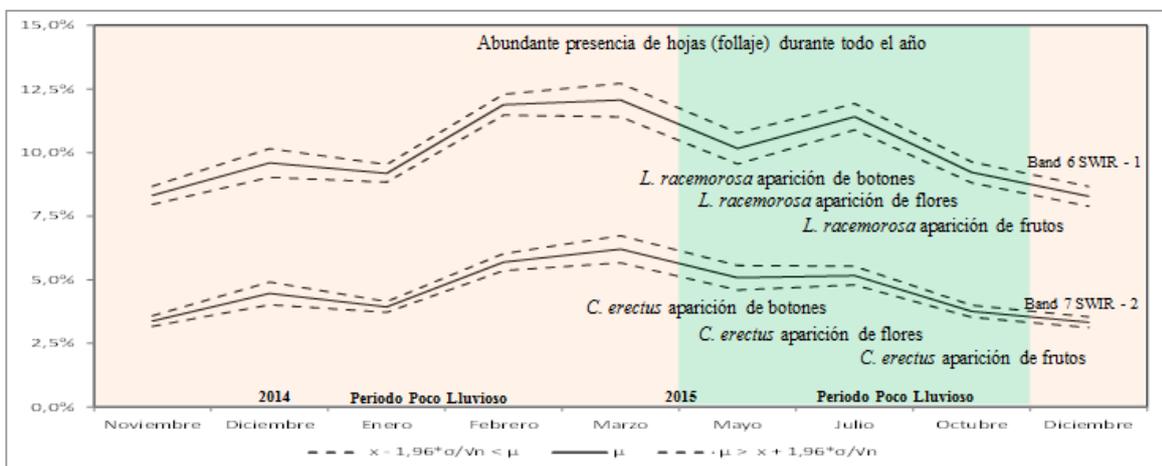


Figura 59. Relación entre la reflectancia para las bandas del SWIR-1 y SWIR-2 y la fenología de la especie *Laguncularia racemosa* y *Conocarpus erectus* (mangle blanco).

5.4. Interpretación cartográfica del bosque de mangle usando la metodología de Análisis de Mezcla Espectral de Múltiple Endmember con imágenes multiespectrales Landsat – 8 OLI

La técnica, análisis de mezcla espectral de múltiples endmember (Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis, MESMA), aunque no ha sido aplicada en Cuba con anterioridad, es ampliamente utilizada. Esta modelación permite transformar imágenes satelitales originales en nuevas imágenes con pleno significado físico (Quintano et *al.*, 2005), que facilitan la investigación a considerar en

nuestro caso, en la zona costera sur de la provincia de Sancti Spíritus y el bosque de mangle de manera particular, en el que desarrollar trabajo de campo resulta extremadamente complicado, conllevando grandes pérdidas de tiempo y recursos. La obtención de datos a partir de imágenes de satélite supone una mejora en la precisión con la que se obtienen las estimaciones para construir un mapa del área de estudio (Quintano et *al.*, 2005).

La metodología MESMA, según Roberts et *al.*, (1998), es una técnica que permite medir espectros como combinaciones lineales de espectros puros, llamados *endmembers*, permitiendo al mismo tiempo que los tipos y número de *endmembers* varíen en base a uno por píxel. De esta manera la vegetación se caracteriza por un conjunto único de *endmembers*, así como por las fracciones.

Los *endmembers* de referencia se seleccionan de una biblioteca de espectros medidos en el campo o el laboratorio (hojas, dosel, materiales no fotosintéticos (por ejemplo, troncos secos), agua y suelos) y son usados para desarrollar una serie de modelos candidatos. Cada modelo candidato se aplica a la imagen, luego, en base a uno por píxel es evaluado en términos de fracciones, error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) y residuos. Si un modelo cumple con todos los criterios, se muestra como candidato para ese píxel.

Para facilitar la selección de modelos a partir de un amplio grupo de candidatos, se selecciona un conjunto óptimo para proporcionar una cobertura máxima del área de estudio. Estos modelos se utilizan para generar imágenes de fracción y mapas de vegetación que muestran la vegetación senescente caducifolia, de hoja perenne y seca. La técnica es capaz de discriminar un gran número de tipos espectralmente distintos de vegetación mientras que captura la distribución espacial similar de un mosaico típico de una vegetación particular.

El funcionamiento del algoritmo MESMA presenta una serie de particularidades que conviene resaltar, según Plaza, (2002):

- El número de *endmembers* utilizado para desmezclar una imagen puede ser considerablemente mayor que el número de *endmembers* que realmente se encuentran en cualquier *pixel* individual de la escena.
- Por otra parte, es posible utilizar en cada *pixel* de la escena un conjunto diferente de *endmembers*.
- La complejidad computacional del algoritmo es considerable, pues se basa en un procedimiento de prueba y error que utiliza distintos conjuntos de *endmembers*, tratando de obtener el mínimo error cuadrático medio (RMSE) posible.

- El elemento clave en el buen funcionamiento del algoritmo es la disponibilidad de una librería espectral adecuada, de forma que pueda abordarse de forma viable el proceso de desmezclado a nivel de *pixel*.

5.4.1. Análisis con la metodología MESMA para imágenes monotemporal y multitemporal

Usando imágenes multiespectrales Landsat – 8 OLI y la herramienta VIPER (open Software) podemos aplicar la metodología MESMA en imágenes monotemporales para el mes de febrero/2015 que representa el periodo poco lluvioso y julio/2015 que representa el periodo lluvioso y en imágenes multitemporales construidas con los meses de (febrero, marzo, mayo y julio) del año 2015 para la costa sur de la provincia de Sancti Spíritus, Cuba; obteniéndose los mapas para cada imagen de fracción de 4 clases (vegetación, suelos, agua, NPV(Vegetación No-Fotosintética)), 5 clases (manglar, vegetación, suelos, agua, NPV) y ocho clases (mangle rojo, mangle negro, mangle blanco, vegetación, suelos, laguna, agua y NPV). Las cuales representan la cobertura existente en la zona costera sur de la provincia de Sancti Spíritus.

Estos mapas para cada una de las imágenes monotemporales y multitemporales fueron obtenidos a partir de establecer ROI puros identificados en 61 parcelas de campo con los cuales se construyó un set de endmembers y aplicando la herramienta VIPER nos permitió fijar los valores máximos y mínimos admisibles de la fracción y los valores máximos admisibles para el error cuadrático medio (RMSE) para así obtener la imagen de fracción con la aplicación de la metodología MESMA (Roberts et *al.*, 1998) en imágenes LandSat – 8 OLI.

Imágenes monotemporales

La imagen obtenida para el mes de febrero/2015, **Figura 60**, para cuatro clases muestra el comportamiento de las clases (suelos (**rojo**), vegetación (**verde**) y agua (**azul**)) que al compararlas con la imagen de julio/2015, **Figura 61**, para estas mismas clases muestra diferencias significativas asociadas a nivel de cobertura vegetativa y a la presencia de sedimentos en el agua la cual presenta variaciones importantes debido a la época del año.

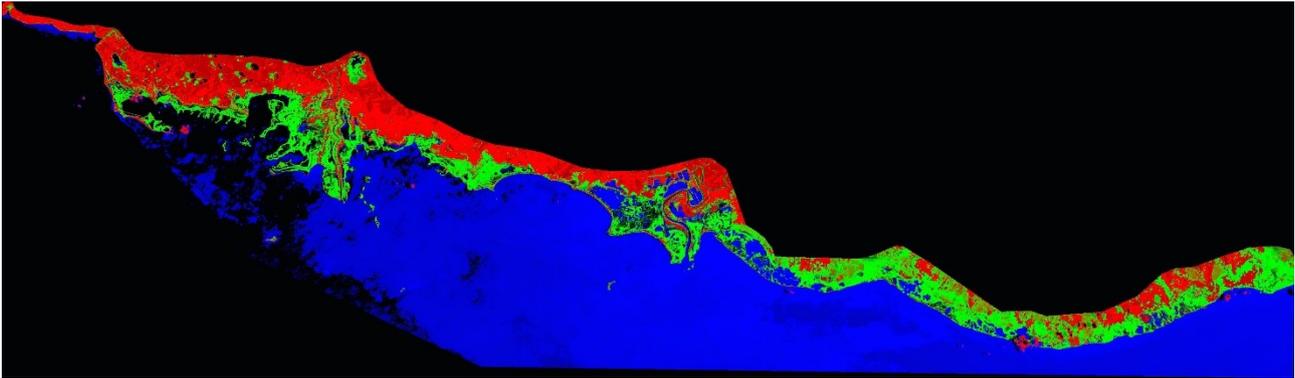


Figura 60. Mapa de imagen de fracción del mes de febrero de 4 clases.

Apreciándose en el mes de febrero una mayor área donde la metodología MESMA identifica cantidad de área con suelos sin cobertura vegetativa asociado a la presencia del periodo poco lluvioso que intensifica la sequía y al uso agrícola y ganadero que reciben estas áreas limítrofes con el bosque siempreverde de mangle. Además, se pueden apreciar diferencias importantes con respecto a la clase agua la cual en el periodo lluvioso recibe mayores aportes de sedimentos reflejado en la imagen de fracción obtenida para el mes de julio en la zona de intercambio tierra-mar donde se intensifican los procesos de arribo de sedimentación terrestre.

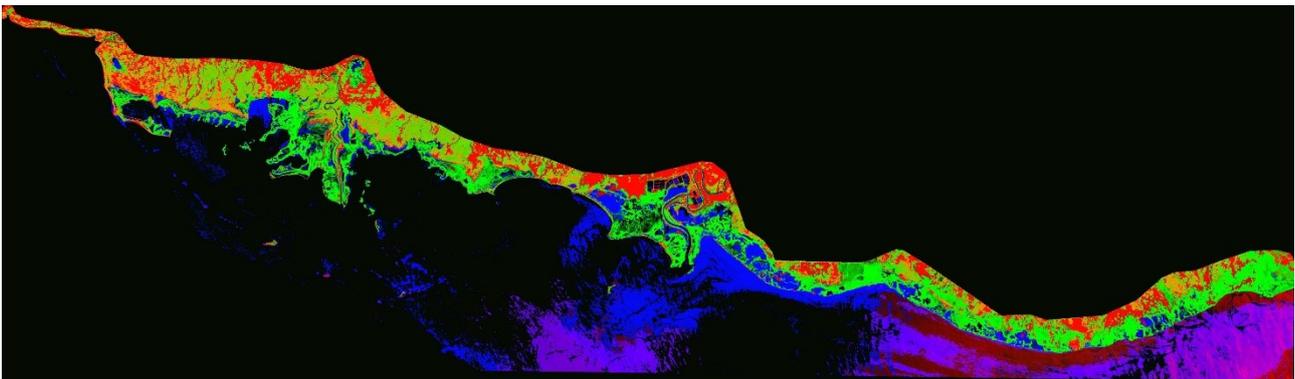


Figura 61. Mapa de imagen de fracción del mes de julio de 4 clases.

Si comparamos la fracción de imágenes monotemporales obtenidas para ocho clases, en los meses febrero/2015 y julio/2015, **Figura 62** y **Figura 63**, apreciamos que para la clase mangle rojo (**rojo**) no existen diferencias significativas. A lo interno de esta clase, si comparamos el área estimada de mangle rojo que identifica la metodología MESMA y la realidad en el terreno muestra que la clase mangle rojo es sobrestimada ocupando en su representación espacial áreas que son realmente ocupadas por otras especies de mangle (mangle negro y mangle blanco) no lográndose obtener la separabilidad entre las especies que conforman este importante ecosistema asociado a la zona intermareal de las regiones subtropical y tropical; esto en lo fundamental se debe a una de las características principales que se aprecian en los trabajos realizados en los manglares usando

imágenes satelitales, “el mezclamiento” (Blasco et *al.*, 1998), por lo que es muy difícil discernir por la metodología MESMA cuando estamos en presencia de píxel puros para cada una de las especies que conforman la transición clásica en dirección mar-tierra en el bosque de mangle (mangle rojo-mangle negro-mangle Blanco).

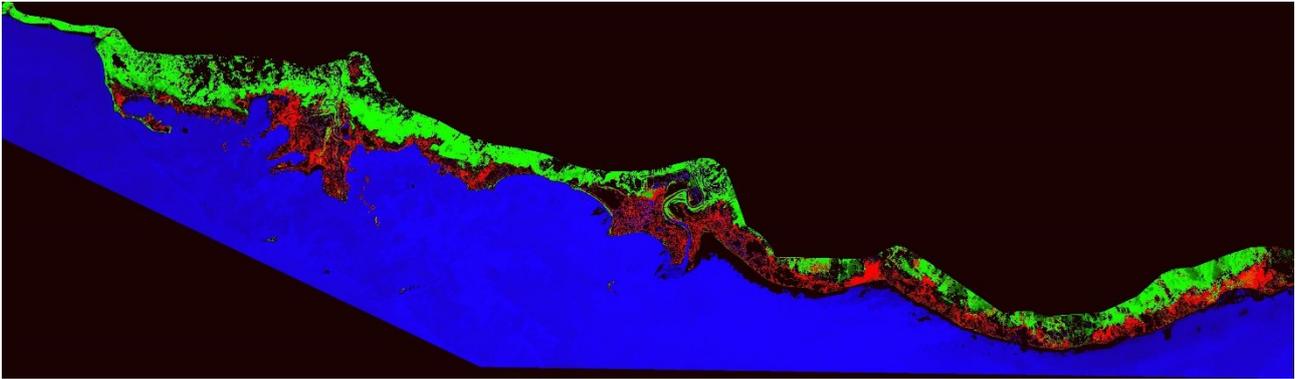


Figura 62. Mapa de imagen de fracción del mes de febrero de 8 clases.

La metodología MESMA logra identificar de manera precisa las diferencias espectrales entre el bosque siempreverde de mangle y las demás clases como son: agua (**azul**), otros tipos de vegetación (**verde**) y los suelos.

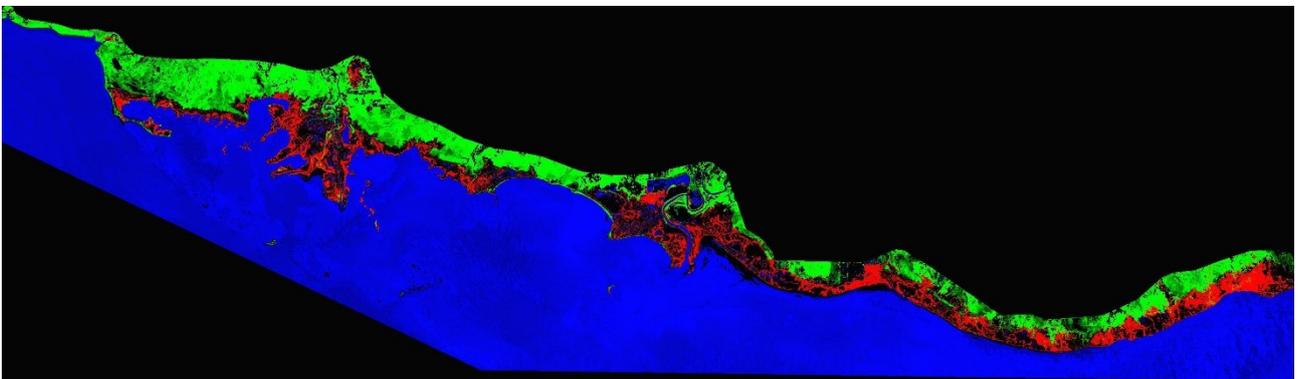


Figura 63. Mapa de imagen de fracción del mes de julio de 8 clases.

Si comparamos las imágenes de febrero/2015 y julio/2015 para ocho clases aplicada a la vegetación y los suelos identificamos que las mismas características ya apreciadas en la comparación entre cuatro clases se repiten identificándose fácilmente las diferencias marcadas entre los meses que caracterizan el periodo poco lluvioso y lluvioso; con la presencia en el mes de febrero de mayores áreas de suelos sin cubierta vegetativa y en el mes de julio una mayor presencia de agua en los sistemas de lagunas costeras y arribo de sedimentos producto a las avenidas generadas por las precipitaciones en las zonas de intercambio tierra-mar.

Validación

La fracción de imagen obtenida a partir de las imágenes monotemporales de los meses de febrero y julio del 2015; para cuatro y ocho clases fue validada usando un set de ROI de validación que representado en una gráfica muestran la relación entre el umbral de pureza del pixel para cada clase y la validación alcanzada usando el procedimiento de una matriz de confusión obtenida con el software ENVI.

Los gráficos de validación, **Figura 64 (a y b)**, para los meses de febrero y julio del 2015 para 4 clases reflejan una correspondencia directa con la fracción de la imagen para cada clase. Observándose en el mes de febrero como la fracción de imagen obtenida con la metodología MESMA logra validar hasta con un 93% la clase suelos, debido en lo fundamental a que este mes refleja de manera intensa la baja cobertura de vegetación producto a encontrarse marcadamente representado el periodo poco lluvioso, cuando fenológicamente la vegetación caducifolia y semicaducifolia pierde sus hojas; los pastos se encuentran extremadamente estresados debido a importantes déficit de agua en los suelos y en las áreas de cultivos de la caña de azúcar y el arroz que limitan con el bosque de mangle son realizadas las labores de cosecha quedando extensas áreas sin cobertura vegetativa.

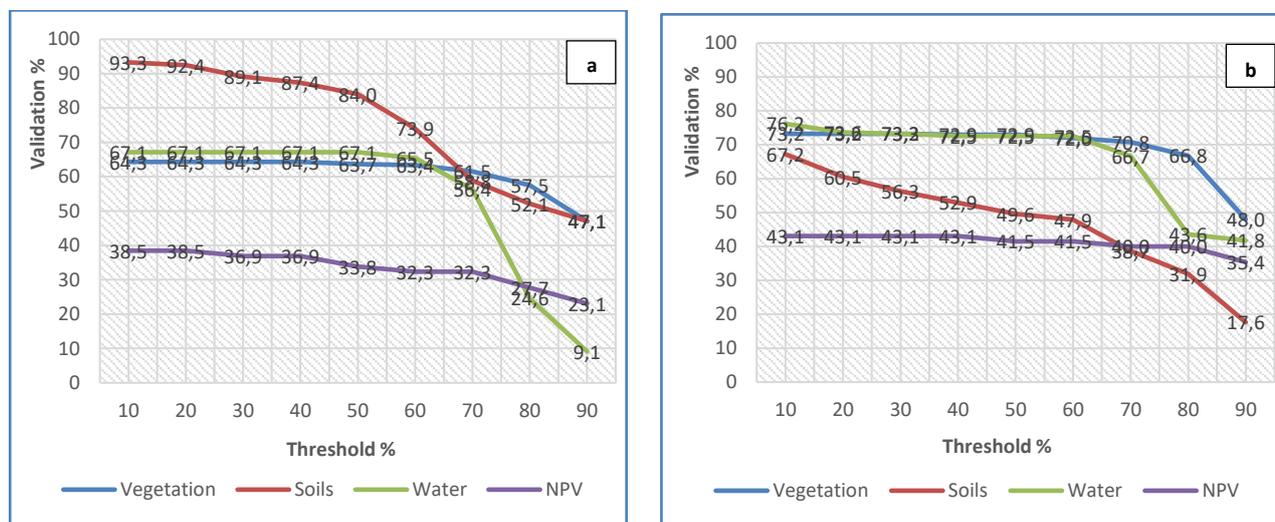


Figura 64. Validación de la imagen de fracción del mes de febrero (a) y julio (b) para 4 clases.

Para las clases vegetación y agua la metodología MESMA logra tener igualmente altos porcentos de validación entre el 60% y 70% para los umbrales entre el 10% y 60%, donde existe mayor mezclamiento de clases en los pixeles, en la medida que nos acercamos a los umbrales superiores al 70% de pixel puro los porcentos de validación de la metodología MESMA descienden de manera importante como lo muestran la, **Figura 64**, los gráficos **a y b**, para cada una de las clases. Para ambos meses la clase que muestra menores porcentos de validación es la NPV (troncos secos) el cual para

todos los casos la metodología MESMA no logra identificar esta clase de manera efectiva debido en lo fundamental a que es una clase (donde existe un altísimo mezclamiento con otras clases como (agua y suelos), no existiendo presencia de cobertura vegetativa.

Los gráficos de validación, **Figura 65 (a y b)**, para los meses de febrero y julio del 2015 para 8 clases reflejan de manera importante el comportamiento de las especies que conforman el bosque de mangle (mangle rojo, mangle negro y mangle blanco) y que para nosotros tiene vital importancia.

En los gráficos que representan el mes de febrero (**a**) y julio (**b**) de la **Figura 65**, la metodología MESMA logra identificar con porcentos significativos al mangle rojo entre el 58%-50% para el mes de febrero y entre el 86%-58% para el mes de julio estas diferencias marcadas entre ambos meses están muy relacionadas con la fenología del mangle rojo.

En los meses del periodo poco lluvioso, el mangle rojo alcanza menor porcentaje de cobertura vegetativa y por tanto se favorece el mezclamiento y cuando existen mayores porcentos de cobertura vegetativa hacia los meses del periodo lluvioso, la metodología MESMA logra identificar mucho mejor las diferencias espectrales (Blasco et *al.*, 1998), entre las clases que conforman el bosque de mangle (mangle rojo, mangle negro y mangle blanco) y además entre las demás clases que conforman la fracción de imagen en el mes de julio o periodo lluvioso, debido a los brotes nuevos de hojas que hacen que aumente el dosel, Wang et *al.*, (2008).

El mangle negro aparece con valores por debajo del 40% de validación para el mes de febrero y de 20% de validación para el mes de julio; lo cual es una muestra de su baja diferenciación con respecto al mangle rojo, la metodología MESMA no logra identificar de manera importante esta especie; signado por el mezclamiento con el mangle rojo y porque grandes extensiones de mangle negro aparecen colapsadas o muertas debido al impacto que está teniendo en la zona costera las malas prácticas de gestión de los recursos hídricos, suelos y agrícolas que ocurren en los sectores bajo, medio y alto asociado a las cuencas hidrográficas de importantes ríos como: Agabama, Higuanojo, Zaza y Jatibonico del Sur.

Con respecto al mangle blanco es igualmente bajo los porcentos de validación e identificación de la metodología MESMA lo cual está determinado por la baja representatividad y estrés que sufren las especies que lo conforman (patabán y yana) debido a la presión antrópica que se ejerce en los sectores periféricos del bosque de mangle donde mayormente aparece este tipo de especie, relacionado con sectores emergidos o inundados temporalmente que son ampliamente usados por la ganadería.

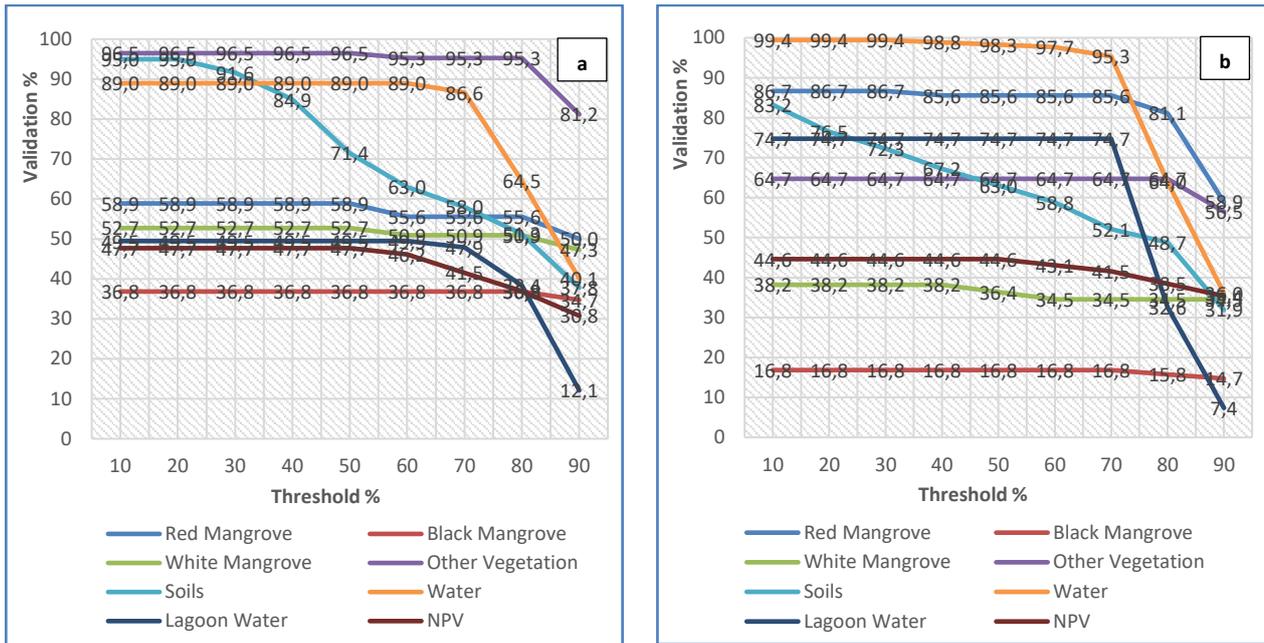


Figura 65. Validación de la imagen de fracción del mes de febrero (a) y julio (b) para 8 clases.

Las clases agua, suelos, vegetación y lagunas tienen valores altos de identificación de la metodología MESMA en la fracción de Imágenes para los meses de febrero y julio. Es de destacar el comportamiento muy similar de la clase suelos para ambos meses con altos valores de validación que van disminuyendo a medida que aumenta la pureza del pixel y disminuye el mezclamiento.

Imágenes multitemporales

La imagen multitemporal para este caso de estudio en la zona costera sur de la provincia de Sancti Spiritus; contiene la información espectral de las imágenes monotemporales de los meses (febrero, marzo, mayo y junio) ésta composición de banda multitemporal permite crear una nueva imagen con el objetivo de simplificar y concentrar la información espectral por lo que la respuesta del uso de la metodología MESMA debe incrementar la identificación de los elementos o clases de la fracción de imagen obtenida usando los mismos ROI de campo utilizados para construir los mapas de fracción de imagen en las imágenes monotemporales así como los mismos ROI utilizados para realizar la validación.

Al comparar la fracción de imagen obtenidas para 4 clases (vegetación, suelos, agua y NPV) de las imágenes monotemporales de los meses de febrero, Figura 60, y julio, Figura 61, con respecto a la fracción de imagen multitemporal, Figura 66, para las clases (suelos (rojo), vegetación (verde) y agua (azul)).

Se observan diferencias que permiten demostrar la importancia de este tipo de imágenes multitemporales que garantizan una mejor respuesta cuando creamos mapas para determinar

evolución de cobertura que resultarán óptimos para establecer los impactos que se generan en los ecosistemas frágiles (deltas, lagunas, bosques de mangle, marismas, etc.) de las zonas costeras tropicales y subtropicales impactadas por la regulación hídrica, la agricultura convencional, la ganadería, la pesca intensiva, la pérdida de diversidad biológica, la urbanización y el cambio climático.

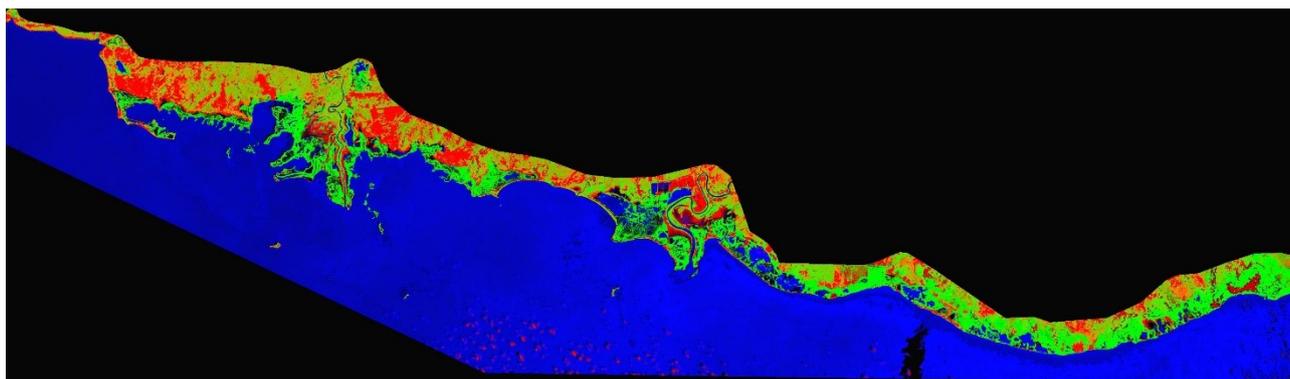


Figura 66. Mapa de imagen de fracción multitemporal de 4 clases.

La fracción de imagen multitemporal de 5 clases (Manglar, vegetación, suelos, agua y NPV), **Figura 67**, es la fracción de imagen que mejor construye la metodología MESMA, permitiendo identificar eficientemente cada una de las clases (manglar **(rojo)**, vegetación **(verde)** y agua **(azul)**) y su validación.

Este tipo de mapa de fracción de imagen usando la metodología MESMA se obtiene por primera vez en Cuba y permitirá en estudios a mediano y corto plazo identificar la evolución de los ecosistemas presentes en la zona costera de la provincia de Sancti Spíritus; e iniciar áreas de réplicas en otros sectores costeros del archipiélago cubano y del Gran Caribe.

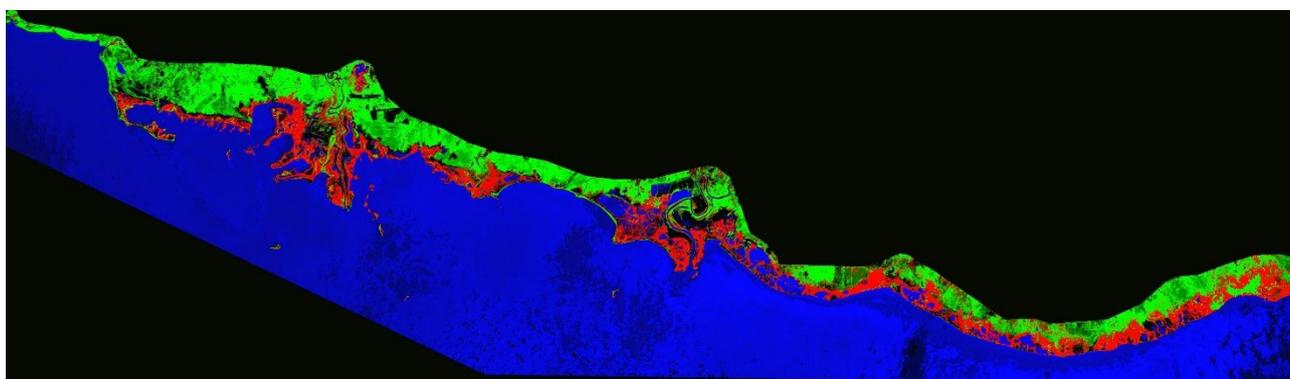


Figura 67. Mapa de imagen de fracción multitemporal de 5 clases.

La fracción de imagen multitemporal, **Figura 68**, (mangle rojo **(rojo)**, vegetación **(verde)**, agua **(azul)**), obtenida para ocho clases (mangle rojo, mangle negro, mangle blanco, vegetación, suelos,

agua, lagunas, NPV) presenta una mejor separabilidad entre las especies (mangle rojo, mangle negro y mangle blanco) que conformar el bosque de mangle si la comparamos con las obtenidas para la fracción de imagen de los meses febrero y julio.

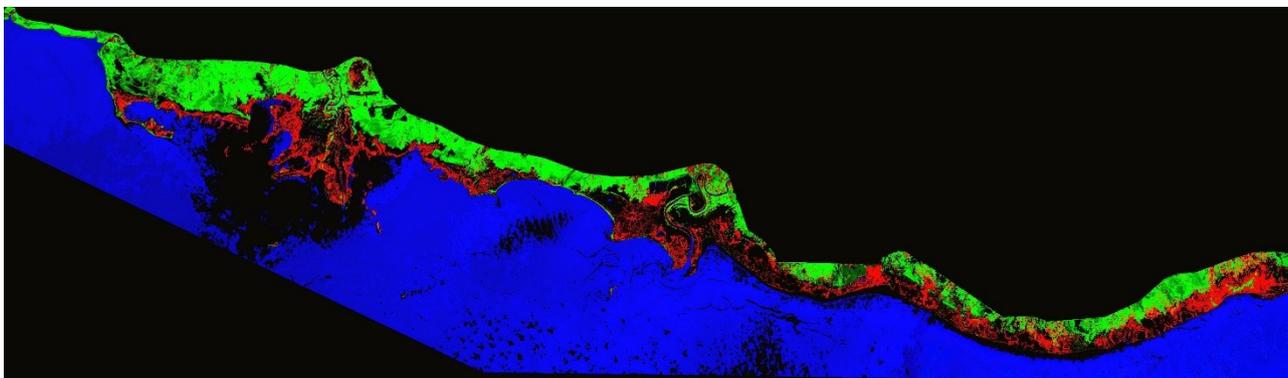


Figura 68. Mapa de imagen de fracción multitemporal de 8 clases.

Aunque, no se logró obtener la máxima o' mejor separabilidad entre las especies que conforman el bosque de mangle; motivado de manera importante porque las zonas deltaicas se caracterizan por la alta complejidad, la sistémica y la fractalidad que hacen necesario aumentar la cantidad de ROI de campos utilizados que permitan una mejor identificación y representatividad de los pixeles puros o' endmembers. Como también la necesidad de aumentar la cantidad de ROI de validación que permitan obtener mayor variabilidad de información espectral para cada una de las clases.

Validación

La fracción de imagen obtenida a partir de una imagen multitemporal de los meses (febrero, marzo, mayo, julio) del 2015; para cuatro, cinco y ocho clases fue validada usando gráficos que muestra la relación entre el umbral de pureza del pixel para cada clase y la validación alcanzada usando el procedimiento de una matriz de confusión obtenida con el software ENVI.

La validación para la imagen de fracción multitemporal de 4 clases, **Figura 69 (a)**, y la imagen de fracción de 5 clases, **Figura 69 (b)**, muestran porcentos por encima de 60% para las 4 clases (vegetación, suelos, agua y NPV) y 5 clases (manglar, vegetación, suelos, agua y NPV) lo que demuestra que la metodología MESMA construye de manera efectiva el mapa de fracción de imagen para las imágenes multitemporales en los umbrales de pixel puro del (10% - 60%), a partir del umbral 60% de pixel puro todas las clases disminuyen los porcentos de validación excepto para la vegetación para la imagen de fracción de 5 clases, **Figura 69 (b)**, que mantiene una fuerte persistencia de validación por encima del 85% para pixel puro del 90%.

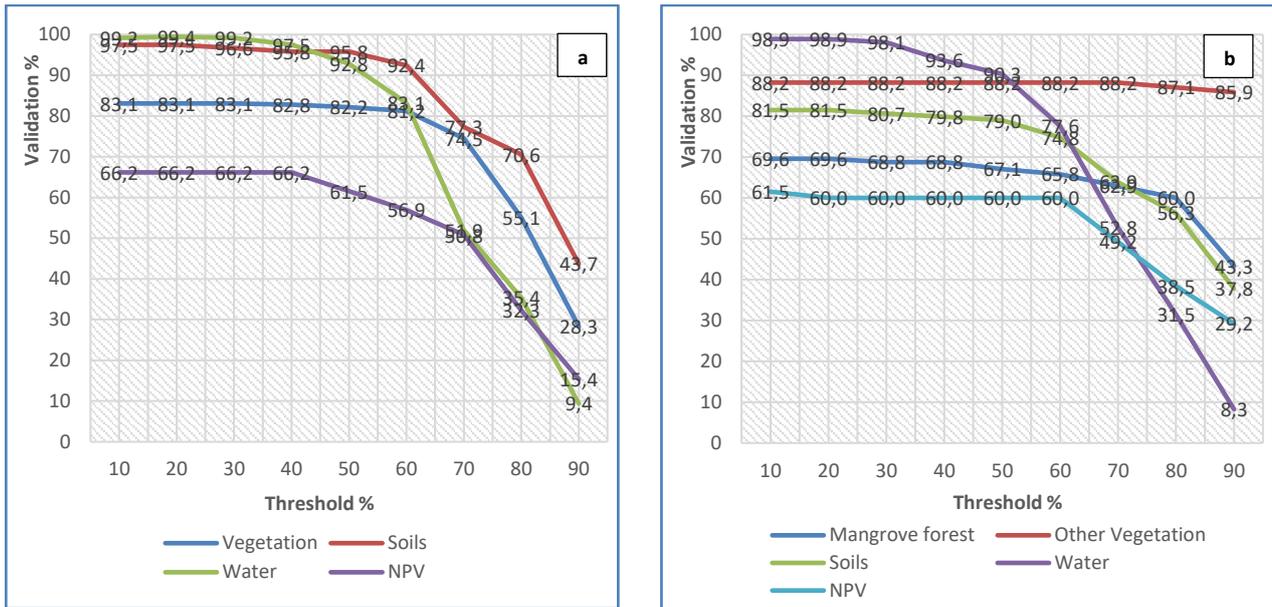


Figura 69. Validación de la imagen de fracción multitemporal de 4 clases (a) y 5 clases (b).

La imagen de fracción multitemporal de 8 clases, **Figura 70**, muestra un gráfico de validación en correspondencia con la mejor construcción que realiza MESMA cuando utilizamos imágenes multitemporales. Lo cual permite obtener para las clases (agua, NPV y mangle blanco) porcentos de validación entre (55% - 69%) para los umbrales entre el (10% - 80%) de pixel puro.

Mientras que las clases (vegetación, mangle rojo, suelos y laguna) los porcentos de validación están entre el (80% - 88%) para los umbrales entre el (10% - 60%) de pixel puro. Para el caso de la clase vegetación persiste con una validación del 68% para un umbral del 90% de pixel puro.

El mangle negro mantiene para la fracción de imagen multitemporal de ocho clases un valor inferior de validación al 30% para un umbral del (10% - 90%). Como para las fracciones de imagen monotemporales, las clases que conforman el bosque de mangle su respuesta espectral al utilizar la metodología MESMA condicionada por el mezclamiento y la necesidad de obtener un nuevo set de ROI de campo y ROI de validación que permita mejorar la construcción de la imagen de fracción de ocho clases.

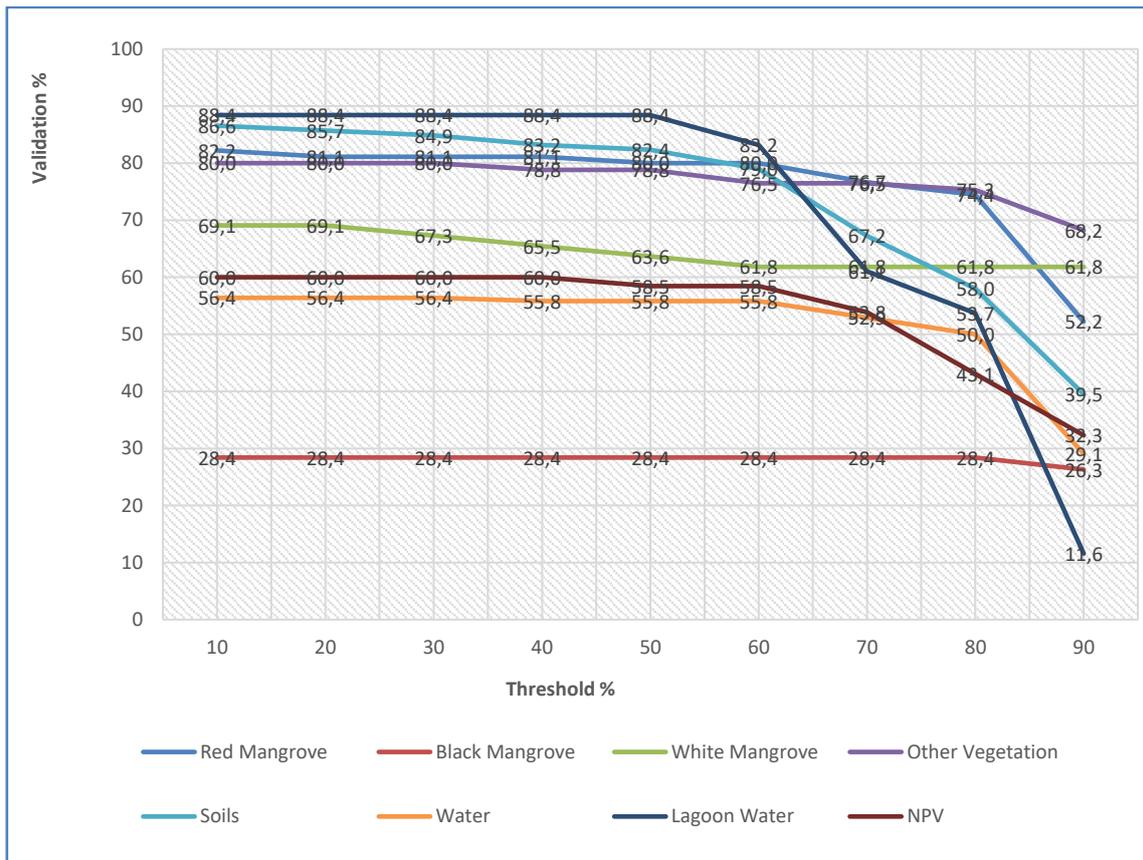


Figura 70. Validación de la imagen de fracción multitemporal de 8 clases.

El uso de la metodología MESMA a partir de imágenes satelitales Landsat y la elaboración de información fenológica en la costa sur de la provincia de Sancti Spíritus permite lograr por vez primera para el archipiélago cubano mapas para diferentes clases que incluyen el bosque de mangle y otros ecosistemas de la zona costera que presentan determinados impactos; estos mapas fueron validados y muestran resultados aceptables lo cual permitirá establecer y aplicar esta metodología en estudios futuros logrando obtener la evolución de los ecosistemas costeros en Cuba.

Bibliografía

Agenda 21; 1992; Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. Río de Janeiro, República Federativa del Brasil, junio de 1992.

Blasco, F.; 1991; Los Manglares. *Mundo Científico*, 144(11): 616-625.

Blasco, F.; Gauquelin, T.; Rasolofoharino, M.; Denis, J.; Aizpuru, M.; Caldairou, V.; 1998; Recent advances in mangrove studies using remote sensing data. *Mar. Freshwater Res.* 1998, 49, 287-296.

Cintron, G.; C. Goenaga y A. E. Lugo; 1980; Observaciones sobre el manglar en costas árida. En *Memorias del Seminario sobre el estudio científico e impacto humano en el ecosistema de manglar*, UNESCO, Montevideo, pp.18-32.

Convención de Ramsar; 1971; Manual de la Convención de Ramsar. Guía a la Convención sobre los Humedales. Ramsar, Irán, 1971. Secretaría de la Convención de Ramsar – 2004, 3ª. Edición.

Dennison, P. E., and Roberts, D. A.; 2003; The effects of vegetation phenology on endmember selection and species mapping in Southern California Chaparral. *Remote Sensing of Environment*, 87, 123–135.

Domínguez, A. Z. y Acosta E.; 2012; Características ambientales de la provincia de Sancti Spíritus. En A. Z. Domínguez, M. Torres e Y. G. Puertas de Armas (Eds.), *Experiencias en la protección de la biodiversidad y el desarrollo sostenible en la provincia de Sancti Spíritus* (pp. 11-43). La Habana, Cuba: Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. ISBN:978-959-287-033-8.

FAO; 2007; The world's mangroves 1980-2005. 89 p.

Feller, I. C. y Sitnik M. (eds.); 1996; *Mangrove Ecology Workshop Manual*. Smithsonian Institution. Washington. DC. 1996.

Hesketh, M., & Sanchez-Azofeifa, G. A.; 2012; The effect of seasonal spectral variation on species classification in the Panamanian Tropical Forest. *Remote Sensing of Environment*, 118, 73–82.

Kuenzer, C., Bluemel, A., Gebhardt, S., Quoc T. Vo, and Dech S.; 2011; Remote sensing of mangrove ecosystems: A review. *Remote Sensing*. 2011, 3, 878-928; doi: 10.3390/rs3050878.

Lugo, A. E.; G. Cintron; y C. Goenaga; 1980; El Ecosistema de Manglar bajo Tensión. En *Memorias del Seminario sobre estudio científico e impacto humano en ecosistemas de manglar*, UNESCO, pp. 261-285.

Manson, F.J.; Loneragan, N.R.; Phinn, S.R.; 2003; Spatial and temporal variation in distribution of mangroves in Moreton Bay, subtropical Australia: A comparison of pattern metrics and change detection analyses based on aerial photographs. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2003, 57, 653-666.

Menéndez, L., D. Vilamijó y P. Herrera; 1987; Flora y vegetación de la cayería norte de matanzas, Cuba. *Acta Botánica Cubana*. 39:1-20.

Menéndez, L. y A. Priego; 1994; Los manglares de Cuba: Ecología. En El ecosistema de manglar en América Latina y la Cuenca del Caribe: su manejo y conservación (D. Suman, ed.), Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science & The Tinker Foundation, pp. 64-75.

Menéndez, L., A. V. González, J. M. Guzmán, L. F. Rodríguez, R. P. Capote, R. Gómez, R. T. Capote-Fuentes, I. Fernández, R. Oviedo, P. Blanco, C. Mancipa e Y. Jiménez; 2000; Informe de proyecto de investigación: Bases ecológicas para la restauración de manglares en áreas seleccionadas del Archipiélago cubano y su relación con los cambios globales. Informe final del proyecto. Programa Nacional de Cambios Globales y Evolución del Medio Ambiente Cubano. IES. CITMA; 153pp.

Menéndez, L.; J. M. Guzmán; R. T. Capote; L. F. Rodríguez y A. V. González; 2003; Situación ambiental de los Manglares del Archipiélago cubano. Casos de estudios: Archipiélago Sabana Camagüey, franja sur de la Habana y costa norte de Ciudad Habana. En Memorias IV Convención Internacional sobre medio ambiente y desarrollo, 2 al 6 de junio de 2003, La Habana, pp. 435-451.

Menéndez, L. y J. M. Guzmán; 2006; Los manglares del archipiélago cubano: Aspectos generales. En: L. Menéndez y J. M. Guzmán (eds.) Ecosistema de Manglar en el Archipiélago Cubano. UNESCO, Ciudad de la Habana; 329 pp.

Menéndez, L., R. P. Capote, J. M. Guzmán, L. F. Rodríguez, A. V. González; 2006; Salud del ecosistema de manglar en el Archipiélago sabana-Camagüey: Patrones y tendencias a escala de paisaje. En: Menéndez y J. M. Guzmán (eds.) Ecosistema de Manglar en el Archipiélago Cubano. UNESCO, Ciudad de la Habana; 329 pp.

Meza Diaz, B.; Blackburn, G.A.; 2003; Remote sensing of mangrove biophysical properties: Evidence from a laboratory simulation of the possible effects of background variation on spectral vegetation indices. *Int. J. Remote Sens.* 2003, 24, 53-73.

Opler, P.A.; Frankie, G.W.; Baker, H.G.; 1976; Rainfall as a factor in the release, timing, and synchronization of anthesis by tropical trees and shrubs. *Journal of Biogeography*, 3:231-236.

Orozco, A. y J.P. García-Lahera; 2014; Flora y vegetación del área de arenas cuarcíticas de Casilda, Sancti Spiritus, Cuba. *Brenesia* 81-82: 8-28.

Plaza, A.; 2002; Proposición, validación y prueba de una metodología para el análisis de datos hiperespectrales que integra información espacial y espectral. Tesis doctoral.

Quintano Pastor, C., Fernández Manso, A., Rodríguez Pérez, J. R., Álvarez Taboada, M. F., y Ramírez Cisneros J.; 2005; Estimación de existencias a partir de imágenes Landsat derivadas de la aplicación de modelos de mezclas espectrales. I Reunión de Inventario y Teledetección Forestal. Sociedad Española de Ciencias Forestales. ISSN: 1575-2410.

Ramsey, E.W., III; Jensen, J.R.; 1996; Remote sensing of mangrove wetlands: Relating canopy spectra to site-specific data. *Photogramm. Eng. Remote Sensing* 1996, 62, 939-948.

Roberts, D. A., Gardner, M., Church, R., Ustin, S., Scheer, G., and Green R. O.; 1998; Mapping chaparral in the Santa Monica Mountains using multiple endmember spectral mixture models. *Remote Sensing of Environment* 65:267-279 (1998) Elsevier Science Inc., 1998.

Sánchez-Páez, H., G. A. Ulloa-Delgado y R. Álvarez-León (eds.); 2002; Hacia la recuperación de los manglares en Colombia. Proyecto PD/91REV 2 (F) Fase II Etapa II Ministerio de Medio Ambiente. ACAFORE. OIMT; 294 pp.

Somers, B. and Asner, G. P.; 2013; Multi-temporal hyperspectral mixture analysis and feature selection for invasive species mapping in rainforest. *Remote Sensing of Environment*, 136 (2013) 14-27.

Tomlinson, P. B.; 1986; *The botany of mangroves*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.

UNDRO; 1991; *Vulnerabilidad y Evaluación del Riesgo*.

UNESCO; 1980; Estudio científico e impacto humano sobre el ecosistema de manglares. En *Memorias del Seminario organizado por UNESCO, Calí, diciembre de 1978*. Oficina Regional de Ciencia y Tecnología para América Latina y el Caribe, Montevideo, 405 pp.

U.S. Geological Survey. <http://earthexplorer.usgs.gov/>

Wang, L.; Silván-Cárdenas, L.; Sousa, W.P.; 2008; Neural network classification of mangrove species from multi-seasonal Ikonos imagery. *Photogramm. Eng. Remote Sensing* 2008, 74, 921-927.

WMO; 1978; *Present Techniques of Tropical Storm Surge Prediction*.

Vilamijó, D. y L. Menéndez; 1987; Flora y vegetación del grupo insular Los Colorados, Cuba. *Acta Botánica Cubana*; 38:1-14.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Como conclusión de la investigación, es posible evidenciar de modo sintético los principales resultados.

1. Se define un modelo de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos y Costeros que permite establecer programas a corto, mediano y largo plazo a partir de un enfoque sistémico, holístico e integrado, implementado bajo la coordinación de un Consejo de gestión. Este modelo tendría tres bloques integrados los cuales se gestionarían según los intereses del Consejo Específico, del Consejo Provincial o del Consejo Nacional de Cuencas Hidrográficas: 1) un bloque de coordinación y gestión; 2) un bloque técnico; 3) un bloque de ordenamiento y control.

2. La implementación de un modelo de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos y Costeros basado en el “paisaje”; éste visto como unidad espacial de referencia para el análisis de las relaciones monosistémicas (relaciones entre componentes del paisaje, en sentido vertical) y parasistémicas (relaciones horizontales entre paisajes de diferentes tipo y nivel jerárquico). Y, además, construir y aplicar un nuevo instrumento legal: Ley sobre “Las Aguas Terrestres y Costeras” para Cuba, que sustente sus niveles de protección en base al “Caudal Ecológico”; la gestión a nivel de cuencas hidrográficas y el “paisaje” como portador sistémico del desarrollo sostenible y sus sinergias entre las unidades espaciales político-administrativas (territorio) y los ecosistemas.

3. Para el cumplimiento de sus funciones, el Consejo de Cuencas Territorial (CCT), en Cuba mantendrá 11 subprogramas generales de gestión de recursos y actividades, que se desarrollan en las cuencas hidrográficas e implementará los planes hidrológicos colocando al agua en el centro del Desarrollo Sostenible (caudal ecológico) lo cual resulta fundamental para el desarrollo socio-económico, la existencia de ecosistemas saludables y la supervivencia humana. El agua, también debe estar en el corazón de la adaptación al cambio climático, sirviendo de vínculo crucial entre el sistema climático, la sociedad humana y el medio ambiente.

4. El embalse Zaza supuso una barrera insalvable al flujo de agua dulce responsable de contener la intrusión salina y el aporte natural de sedimentos terrígenos y energía necesarios para la regeneración continua del delta del río Zaza frente la acción erosiva del mar. La situación podría revertirse si como medida de gestión de la cuenca se incluyese un programa de sueltas controladas que actuase como avenidas regeneradoras del cauce natural del río y por ende de la zona deltaica.

5. La modelización realizada con AQUATOOL+, muestra el funcionamiento del sistema hidrológico superficial aguas abajo relacionado con el embalse Zaza. Y evidencia que, con el nivel de explotación actual del embalse, el agotamiento del mismo durante un periodo deficitario de precipitaciones se produce en dos temporadas hidrológicas. Además, asociado a este déficit, durante el periodo simulado no se han producido avenidas naturales ni programadas que garanticen la estabilidad del ecosistema fluvial aguas abajo del embalse Zaza en los ecosistemas ribereños y en el delta del río Zaza.

6. La fracción de imágenes multitemporales obtenidas a partir de imágenes multiespectrales Landsat y usando la metodología MESMA, garantizan mejor respuesta cuando creamos mapas para determinar evolución de cobertura con respecto a las imágenes monotemporales. Lo cual resulta óptimo para establecer los impactos que se generan en los ecosistemas frágiles (deltas, lagunas, bosques de mangle, marismas, etc.) de las zonas costeras tropicales y subtropicales impactadas por la regulación hídrica, la agricultura convencional, la ganadería, la pesca intensiva, la pérdida de diversidad biológica, la urbanización y el cambio climático.

7. El uso de la metodología MESMA a partir de imágenes satelitales LANSAT y la elaboración de información fenológica en la costa sur de la provincia de Sancti Spíritus permite lograr por vez primera para el archipiélago cubano mapas para diferentes clases que incluyen el bosque de mangle y otros ecosistemas de la zona costera que presentan determinados impactos; estos mapas fueron validados y muestran resultados aceptables lo cual permitirá establecer y aplicar esta metodología en estudios futuros logrando obtener la evolución de los ecosistemas de bosque de mangle, de la línea de costa y su posible aplicación en otros ecosistemas tanto costero como de interior y montaña.

RECOMENDACIONES

1. Implementar los resultados de esta investigación junto al Consejo de Cuenca Territorial en las provincias de Sancti Spíritus y Villa Clara y el Consejo Específico cuenca del Zaza en Cuba, para obtener una validación del modelo teórico planteado.

2. Lograr la ejecución de proyectos nacionales e internacionales que permitan evaluar usando la metodología MESMA la evolución de los ecosistemas costeros en Cuba, especialmente por su importancia el bosque de mangle.

ANEXOS

Anexo 1

Plots	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Species of flora in the centroid	pt	y	y	r	pt	pt	pr	pr	pr	y	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr
Species of the dominant flora in the plot	pt	y	pr	r	r	r	pr	pr	pr	pt	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr
Height (m)	cl	cl	5	10	10	10	10	cl	cl	cl	12	8	8	12	5	5	6	6	5	4
Flood: (P, T, S)	E	E	E	P	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	P	P	P	P
Full coverage (%)	10	25	90	100	100	100	70	50	30	30	90	95	90	90	95	100	95	80	90	90
Coverage of Red Mangrove (%)	0	0	0	85	85	85	30	10	20	5	10	15	30	20	5	5	40	0	0	1
Coverage of Black Mangrove (%)	3	10	60	0	0	5	60	45	20	10	80	70	80	80	90	95	60	80	90	90
Coverage Pataban (%)	5	3	0	90	90	90	5	5	0	20	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0
Coverage of Yana (%)	2	12	30	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fruiting	0	pr	pr	r	r	r	pr	r	r	pt	pr, r	pr, r	pr, r	pr, r	pr, r	pr, r	pr, r	pr	pr	pr
Flowering	y, pt	y, pt	y	r, pt	r, pt	r, pt	pt	pr	r	pt	r, pr	pr, pt	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr
Coverage of adults (%)	10	25	90	100	100	100	70	50	30	30	90	95	90	90	95	100	95	80	90	90
Coverage of youth (%)	1	0,5	0	40	30	10	15	3	30	5	70	40	60	10	5	40	10	60	60	40
Number of dead individuals	0	0	0	1	2	3	3	0	1	1	3	3	4	2	2	4	3	6	4	5

plots	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
species of flora in the centroid	pr	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	pr	pr	pr	pr	pr
species of the dominant flora in the plot	pr	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	pr	pr	pr	pr	pr
height (m)	5	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	11	7	2
flood: (p, t, s)	p	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
full coverage (%)	80	75	75	75	75	95	75	95	95	95	95	75	95	95	75	100	90	95	0	50
coverage of red mangrove (%)	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
coverage of black mangrove (%)	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	95	0	50
coverage pataban (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
coverage of yana (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0
fruiting	pr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	pr	pr	pr	0	pr
flowering	pr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	pr	pr	pr	pr	pr
coverage of adults (%)	80	75	75	75	75	95	75	95	95	95	95	75	95	95	75	100	90	95	0	50
coverage of youth (%)	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	45	2	90	0	10
number of dead individuals	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	3	50	10

Plot	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61
Species of flora in the centroid	pr	r	pr	r	pr	pr	pr	pr	r	r	pr	pr	r	r	pt	r	pt	y	y	y	y
Species of the dominant flora in the plot	pr	r	pr	r	pr	pr	pr	pr	r	r	pr	pr	r	r	pt	r	pt	y	y	y	y
Height (m)	5	4	4	10	7	9	5	7	8	9	3	3	6	6	3	10	6	2	2	3	3
Flood: (P, T, S)	T	P	P	T	T	T	T	T	P	P	T	T	P	P	T	P	E	E	E	E	E
Full coverage (%)	50	100	90	95	85	90	80	90	95	95	30	50	95	95	75	90	30	70	50	50	70
Coverage of Red Mangrove (%)	0	100	0	80	0	0	0	0	100	100	0	0	100	100	0	90	0	0	0	0	0
Coverage of Black Mangrove (%)	50	0	90	5	80	90	80	90	0	0	50	60	0	0	75	0	40	0	0	0	0
Coverage Pataban (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Coverage of Yana (%)	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	90	50	50	70
Fruiting	pr	r	pr	r	pr	pr	pr	0	r	r	pr	pr	r	r	0	r	0	y	y	y	0
Flowering	pr	r	pr	0	0	0	0	0	0	0	pr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Coverage of adults (%)	50	100	90	95	95	95	80	80	95	95	80	70	100	100	80	95	50	60	90	70	90
Coverage of youth (%)	25	40	30	25	50	50	50	30	10	30	1	2	50	15	30	15	0	0	0	0	0
Number of dead individuals	5	2	0	6	2	4	3	2	1	1	0	1	2	0	2	0	3	0	0	0	3

Anexo 2

EXAMPLE_Calibration_Landsat_8. MatLab

```
%% Preprocessing Landsat 8 data
clear all;
%% input
landsatfolder='f:\A.U.P.M Universidad Politécnica de La Marche\ENVI\Imágenes
Satelitales\2015\New Satelital Images\December\16122015\';
exportfolder = 'f:\A.U.P.M Universidad Politécnica de La Marche\ENVI\Imágenes
Satelitales\2015\New Satelital Images\December\16122015\Convertida\';
refsysnr = 32617;% you can find the right number on for the zone of your Landsat tile (WGS84,
UTM): http://www.remotesensing.org/geotiff/spec/geotiff6.html#6.3.3.1

%% algorithm
% extract metadata
d_meta = dir([landsatfolder '*_MTL.txt']);
[ RADIANCE_MULT RADIANCE_ADD REFLECTANCE_MULT REFLECTANCE_ADD
K1_CONSTANT K2_CONSTANT SUN_ELEVATION ] = GetCalibrationData_MTL_L8(
landsatfolder, d_meta.name );
% load landsat band
d_b2 = dir([landsatfolder '*_B2.tif']);
[DN_B2, R] = geotiffread([landsatfolder d_b2.name]);
DN_B2 = double(DN_B2);

% convert from DN to reflectance
doy = str2double(d_b2.name(14:16));
[ Refl_B2_TOA ] = Calibration_L8_DN2Refl( DN_B2, REFLECTANCE_MULT(1),
REFLECTANCE_ADD(1), 'SUN_ELEVATION', SUN_ELEVATION);

% export converted imagery
geotiffwrite([exportfolder 'Refl_B2_TOA.tif'], Refl_B2_TOA, R, 'CoordRefSysCode',refsysnr);

% delete variables
clear DN_B2
```