

UNIVERSIDAD AGRARIA DE LA HABANA

“Fructuoso Rodríguez Pérez”

FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS



Título

**“Método para identificar relaciones espaciales entre objetos
hidrológicos y coberturas terrestres en imágenes de satélites”**

Tesis presentada en opción al título Máster en Biomatemática

Autora:

Ing. Leisy Sosa Castro

Tutor

Prof. Titular, Dámaso R. Ponvert-Delisles Batista, Dr. C.

Mayabeque 2016



"Todos y cada uno de nosotros paga puntualmente su cuota de sacrificio consciente de recibir el premio en la satisfacción del deber cumplido, conscientes de avanzar con todos hacia el Hombre Nuevo que se vislumbra en el horizonte."

"Ernesto Che Guevara "

AGRADECIMIENTOS

A mis queridos padres, papi y mima, a quien les debo todo en la vida, por su dedicación, preocupación y amor, por depositar en mí toda su confianza, por estar siempre presente en los momentos buenos y malos y enseñarme a enfrentar los problemas, gracias ya que por su apoyo incondicional hoy soy Máster en Ciencias y sé que están orgullosos de mí. Este triunfo también es de ustedes.

A mi querido hermano Lione, gracias por estar presente cada vez que te he necesitado, gracias por tu apoyo, por ser quien eres e inspirarme confianza desde pequeña, gracias por darme unos sobrinos tan lindos, Leroy y Lorena. Te quiero con la vida.

A mi prima Mileidys que para mí siempre ha sido una guía y un ejemplo a seguir, mi prima número 1 como nos decimos, gracias por todo, por ayudarme siempre, gracias por estar en todos los momentos de mi vida, y por tener unos primitos tan lindos Jorge Ariel y Jorge Abdel, mi prima te quiero mucho.

A mi novio Jose, mi tillín, el gran amor de mi vida, por ayudarme siempre que te he necesitado, por tu amor incondicional y por depositar en mí toda tu confianza, por estar siempre a mi lado y brindarme tu cariño y comprensión.

A mi tía TITA que la quiero mucho y siempre está pendiente de mí, gracias por todo, te quiero mucho.

A mis compañeros de trabajo y de maestría durante esta etapa de sacrificio en especial a Yeniffer por estar siempre presente y brindarme su apoyo incondicional, a todos muchas gracias por compartir conmigo estos años.

A mi tutor por hacer posible la realización de este trabajo, por dedicarme tiempo, por ser preocupado, paciente y ayudarme en todo lo que me hizo falta.

A los compañeros del tribunal y los profesores de la maestría por ser exigentes, en especial a Lucia por alentarnos y convencernos de que sí se puede, gracias por ayudarme en lo que he necesitado.

A todos los que de una manera u otra han tenido que ver con la realización de este trabajo.

A todos, muchas gracias.

DEDICATORIA

A mis padres Leonel y Odalis por guiarme en el difícil camino de la vida y darme todo el amor y el apoyo que he necesitado.

A toda mi familia, por sus buenos consejos y ayuda, en especial a mi hermano Lione, mi prima Mileidy y mi tía Sory que no son los únicos, pero sí los más cercanos.

Y por último y no menos especial, a mi novio Jose por estar siempre a mi lado y brindarme todo su cariño, comprensión y dedicarme todo este tiempo.

Resumen

El estudio integral del medio geográfico mediante el uso de información geoespacial en la actualidad constituye un reto tecnológico debido al gran volumen de información de diversas temáticas que contienen las imágenes de satélites. Ellas son portadoras de un gran número de objetos: vegetación, suelos, construcciones, litología, relieve y los objetos hidrológicos, objeto de estudio de esta investigación. Para el desarrollo de la investigación, primeramente se obtuvieron los elementos que caracterizan el estado del arte de la temática, mediante el estudio de las fuentes bibliográficas existentes a escala nacional e internacional, para luego caracterizar los métodos y técnicas que se utilizaron en la investigación. Con tales antecedentes, el objetivo principal consiste en formular un método para identificar con mayor eficiencia las relaciones espaciales implícitas entre objetos hidrológicos y las coberturas terrestres del entorno en imágenes de satélites, así como su visualización y traducción a un lenguaje común de fácil identificación e interpretación en el contexto de las imágenes de satélites. Aspectos importantes en el orden científico, son la caracterización de la taxonomía hidrológica que se utilizó como dato de partida para el descubrimiento de las relaciones espaciales y no espaciales con el resto de los objetos ambientales que los circundan. Como resultado fundamental se obtiene el método “REIS” (Relaciones Espaciales en Imágenes de Satélites) basado en cinco etapas fundamentales las cuales son validadas mediante el software “RePaH” (Reconocimiento de Patrones Hidrológicos) que se diseñó para la realización de los experimentos apropiados que darán soporte a la identificación y extracción de las relaciones espaciales entre objetos hidrológicos y las coberturas terrestres implícitas en las imágenes de satélites.

Palabras claves: imágenes de satélites, objetos hidrológicos, coberturas terrestres, relaciones espaciales, relaciones implícitas.

Índice de Figuras

Figura 1. Representación de una imagen de satélite. Fuente: (Chuvieco, 2010).	4
Figura 2. Técnicas estadísticas en el PDI. Fuente: Elaboración propia a partir de (López, 1990).....	5
Figura 3. Filtraje de imágenes de satélites. Fuente Elaboración propia a partir de (Villar, 2002).....	8
Figura 4. Ejemplo de relaciones espaciales. Fuente: (Guillermo, 2010).	12
Figura 5. Taxonomía hidrológica. Fuente: Elaboración propia a partir de las definiciones de (MonTreux, 1990), (Cowardin et al., 1979) y (Cervantes, 1994).....	23
Figura 6. Patrones de drenaje erosionales. Fuente: Botero (1978).	30
Figura 7. Patrones de drenaje erosionales. Fuente: Botero (1978).	31
Figura 8. Patrones de drenaje erosionales. Fuente: Botero (1978).....	32
Figura 9. Patrones de drenaje deposicionales. Fuente: Botero (1978).	33
Figura 10. Patrones de drenaje especiales. Fuente: Botero (1978).....	34
Figura 11. Patrones de drenaje individuales. Fuente: Botero (1978).....	36
Figura 12. Fragmento de la imagen Landsat 7-TM, banda 4, mostrando la parte derecha de la provincia Mayabeque incorporada al proceso mediante el software ENVI. Fuente: Cortesía de Geocuba-IC.....	38
Figura 13. Fragmento de la imagen Landsat 7-TM, banda 4, mostrando la parte izquierda de la provincia Mayabeque incorporada al proceso mediante el software ENVI. Fuente: Cortesía de Geocuba-IC.....	38
Figura 14. Método REIS para identificar relaciones espaciales entre objetos hidrológicos y coberturas terrestres en imágenes de satélites. Fuente: Elaboración propia del autor.	41
Figura 15. Carpeta map del software REPAH. Fuente: Elaboración propia.	44
Figura 16. Detalle ampliado de los nodos de los taxones ríos y patrón de drenaje deposicionales (reticular) con los atributos correspondientes a cada uno. Fuente: Elaboración propia.....	45
Figura 17. Fragmento del taxón humedal almacenado en una Base de Datos. Fuente: Elaboración propia.....	46

Índice de Tablas

Tabla 1. Clasificación de predicados espaciales según la categoría “Topológicos”. Fuente: (Ronghua, 2005).	13
Tabla 2. Descripción del caso de uso: Cargar Imagen.....	42
Tabla 3. Descripción del caso de uso Procesar imagen satelital.....	49
Tabla 4. Descripción del caso de uso Visualizar los patrones encontrados.	50
Tabla 5. Descripción del caso de uso Mostrar Taxonomía.	51
Tabla 6. Descripción del caso de uso Mostrar % que representa cada patrón.	54
Tabla 7. Descripción del caso de uso Mostrar patrones de drenaje del sistema.	56

Índice

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1: REFERENTES TEÓRICOS PARA IDENTIFICAR RELACIONES ESPACIALES ENTRE OBJETOS HIDROLÓGICOS Y COBERTURAS TERRESTRES EN IMÁGENES DE SATÉLITES	4
1.0 Introducción	4
1.1 Las imágenes de satélites como fuente de datos hidrológicos y coberturas terrestres	4
1.2 Las técnicas de procesamiento digital de imágenes de satélites para el descubrimiento de los objetos hidrológicos y las coberturas terrestres que las rodean...	5
1.2.1 Mejoramiento del contraste.....	6
1.2.1.1 Método lineal.....	6
1.2.1.2 Método no lineal	7
1.2.2 Filtraje de imágenes de satélites.....	8
1.2.3 La Minería de Datos Espaciales	9
1.2.3.1 Métodos utilizados en la minería de datos espaciales	9
1.2.3.2 Reconocimiento de patrones.....	10
1.2.4 Relaciones espaciales entre objetos geográficos. Criterios a tener en cuenta para establecer las relaciones espaciales.....	12
1.2.5 Localización de patrones espaciales.....	13
1.2.6 Los Sistemas de Información Geográfica como software para el análisis y representación espacial de las relaciones espaciales.....	15
1.2.7 Los sistemas informáticos como soporte de la minería de datos espaciales	16
1.3 Conclusiones Parciales.....	17
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS METODOLÓGICOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	19
2.0 Introducción	19
2.1 Métodos de Investigación.....	19
2.2 Tecnologías informáticas utilizadas en la investigación	20
2.2.1 Lenguaje de programación Java.....	20
2.2.2 Sistema de Gestor de Base de Datos.....	20
2.2.3 OpenCV	21

2.2.4 Entorno de desarrollo NetBeans	22
2.3 Taxonomía propuesta para los objetos hidrológicos presentes en las imágenes de satélites	22
2.3.1 Ecosistemas acuáticos interiores.....	23
2.3.2 Ecosistemas acuáticos costeros	27
2.3.3 Ecosistemas acuáticos marinos	28
2.4 Patrón de Drenaje.....	28
2.5 Caracterización de las imágenes de satélites	36
2.6 Conclusiones Parciales.....	39
CAPÍTULO 3: MÉTODO PARA IDENTIFICAR LAS RELACIONES ESPACIALES ENTRE OBJETOS HIDROLÓGICOS Y COBERTURAS TERRESTRES EN IMÁGENES DE SATÉLITES.	40
3.0 Introducción	40
3.1 Definición de las entidades principales	40
3.2 Método propuesto para identificar relaciones espaciales entre objetos hidrológicos y coberturas terrestres en imágenes de satélites y su descripción	41
3.2.1 Etapa 1. Adquisición de los datos	42
3.2.2 Etapa 2. Transformación	44
3.2.3 Etapa 3. Procesamiento de imagen	44
3.2.3.1 Pseudocódigo del algoritmo de procesamiento de imagen.....	47
3.2.3.2 Descripción del algoritmo de procesamiento de imagen	48
3.2.4 Etapa 4. Descripción y visualización	50
3.2.5 Etapa 5. Relaciones espaciales	53
3.3 Conclusiones parciales	57
CONCLUSIONES GENERALES	58
RECOMENDACIONES.....	59
BIBLIOGRAFÍA REFERENCIADA.....	60
ANEXOS	63

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el manejo de grandes volúmenes de datos espaciales en imágenes de satélites trae consigo la demanda de nuevas técnicas para la extracción de relaciones u otros patrones no explícitos contenidos en dichas imágenes. Estas relaciones son muy útiles para encontrar e identificar objetos similares en contextos espaciales más amplios, es decir, en otras imágenes de satélites de territorios diferentes, de cara a una caracterización más eficiente de los objetos estudiados, que faciliten una evaluación más objetiva desde el punto de vista medioambiental y la toma de decisiones sobre el uso y cobertura de la tierra. Las técnicas tradicionales de análisis de datos no han tenido un desarrollo equivalente a su almacenamiento, pues el volumen de almacenamiento supera la capacidad de análisis (Rosette, 2013).

En 1854 el pionero de la epidemiología, el Dr. John Snow, proporcionaría un ejemplo clásico de este concepto cuando cartografió, en un ya famoso mapa, la incidencia de los casos de cólera en el distrito de Soho en Londres (Lorca y Valdivia, 2007). Este “*protoSIG*”, constituye uno de los ejemplos más tempranos del método geográfico (Bernal, 2012) el cual permitió a Snow localizar con precisión un pozo de agua contaminado como la fuente causante del brote.

En 1964, Howard T. Fisher formó en la Universidad de Harvard el *Laboratorio de Computación Gráfica y Análisis Espacial* en la *Harvard Graduate School of Design* (LCGSA 1965-1991), donde se desarrollaron una serie de importantes conceptos teóricos en el manejo de datos espaciales, y en la década de 1970 había difundido un código de software y sistemas germinales, tales como SYMAP, GRID y ODYSSEY, los cuales sirvieron como fuentes de inspiración conceptual para posteriores desarrollos comerciales en universidades, centros de investigación y empresas de todo el mundo (Lovison-Golob y Fisher, 1965).

En nuestro país, existen diversos programas medioambientales; entre ellos el Programa Nacional de Cambios Globales que aglutina más de una treintena de temáticas. La integración de sus resultados implica movilizar un numeroso grupo de expertos, no lográndose con técnicas tradicionales de análisis establecer las asociaciones entre dichas temáticas. Según Rosette (2013) instituciones como el Ministerio de la Agricultura (MINAGRI), Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) y el Grupo Empresarial GEOCUBA, entre otras, generan un gran volumen de datos geográficos que resultan importantes para la toma de decisiones en el ámbito económico y social.

Por otra parte, en Cuba no abundan los estudios para la extracción de relaciones implícitas entre los objetos hidrológicos y las coberturas terrestres de su entorno en imágenes de satélites. Tampoco se conocen algoritmos para la visualización de las relaciones espaciales entre los objetos hidrológicos y las clases de coberturas terrestres del entorno de las cuencas

hidrográficas en imágenes de satélites, así como para la traducción de las relaciones espaciales a un lenguaje común más comprensible por el usuario del sistema.

De aquí que, se hace necesario realizar una correcta abstracción del mundo real para llevar a cabo las técnicas de procesamiento digital de imágenes de satélites las cuales se basan en el análisis estadístico, una de ellas es el proceso de filtrado de los datos con el fin de garantizar una correcta organización de las temáticas en una base de datos geoespacial, ya que los algoritmos tampoco ofrecen las condiciones de selección de los objetos geográficos que intervienen en el análisis para cada nivel de la taxonomía hidrológica diseñada. En este sentido, la minería de datos espaciales como rama de la ciencia que se encarga de “*extraer conocimiento referente a la naturaleza espacial de los datos*” (Han y Kamber, 2006) constituye una derivación especial dentro de la minería de datos, lo que ayudaría notablemente al descubrimiento de estas asociaciones que permanecen subyacentes e invisibles a primera vista en las imágenes de satélites. La diferencia entre estos dos conceptos radica en que no sólo se emplean atributos no espaciales, sino que en el proceso de “minado” de los datos intervienen atributos espaciales combinados con los mismos, incorporándose también otros criterios como los predicados espaciales. Estos predicados son las relaciones espaciales (Ej. Topológicas, Distancia, etc.) entre la temática de referencia y el conjunto de temáticas relevantes (Bogorny, 2006), por lo que se adopta un criterio complejo para descartar combinaciones de los objetos hidrológicos en la evaluación de predicados espaciales en las imágenes de satélites, haciendo el proceso más eficaz. Un aspecto esencial que se ha considerado, es que no existe suficiente experiencia en el empleo de las herramientas disponibles en software como gvSIG para identificar las relaciones espaciales, así como, incluir nuevas funcionalidades como visualización y traducción.

Es por ello que el presente trabajo está dirigido a la extracción de relaciones espaciales entre objetos hidrológicos y los objetos ambientales que los circundan en el entorno de las cuencas hidrográficas, que son desconocidas por el usuario; pero que están implícitas en las imágenes de satélites. En los momentos actuales, de acuerdo con las informaciones suministradas por el Centro de Aplicaciones de Tecnologías de Avanzadas (CENATAV) y constatadas con el Grupo de Investigaciones de Agrofísicas (GIAF) de la Universidad Agraria de la Habana (UNAH), en el país no se dispone de un método para identificar relaciones espaciales entre objetos hidrológicos y disímiles coberturas terrestres del entorno de la cuenca hidrográfica en imágenes de satélites.

Por todas estas razones surge el siguiente **problema científico**: ¿Cómo se pueden extraer con mayor eficiencia las relaciones espaciales implícitas en imágenes de satélites, así como su visualización y traducción a un lenguaje común?

El **objeto de estudio** de esta tesis se enfocará en las imágenes de satélites como fuentes de representación de los objetos hidrológicos, las clases del entorno de la cuenca hidrográfica y las relaciones espaciales.

El **campo de acción** de la investigación lo constituyen las relaciones espaciales entre objetos hidrológicos y las coberturas terrestres del entorno en la provincia Mayabeque y su identificación a partir de procesamiento de imágenes de satélites y del análisis en los sistemas de información geográfica (SIG).

A partir de las categorías metodológicas anteriores, es posible plantear como **Hipótesis** la siguiente: si se identifican con una mayor eficiencia las relaciones espaciales implícitas en imágenes de satélites y si se seleccionan diferentes niveles de análisis en la taxonomía hidrológica, mediante las distintas técnicas matemáticas, estadísticas e informáticas se contribuirá a una mejor representación de los objetos hidrológicos y su entorno favoreciendo la toma de decisiones más objetivas.

El **objetivo general** de la tesis consiste en formular un método para identificar con mayor eficiencia las relaciones espaciales implícitas entre objetos hidrológicos y las coberturas terrestres del entorno en imágenes de satélites, así como su visualización y traducción a un lenguaje común de fácil identificación e interpretación en el contexto de las imágenes de satélites.

De aquí, se derivan los siguientes **objetivos específicos**:

- ✓ Analizar el estado actual de los métodos y técnicas para establecer las relaciones espaciales entre objetos hidrológicos y coberturas terrestres en imágenes de satélites.
- ✓ Identificar las actividades del proceso de establecimiento de relaciones espaciales de objetos hidrológicos en las imágenes de satélites, mediante casos de uso.
- ✓ Proponer un método para la identificación de los objetos hidrológicos y su relación con las coberturas terrestres en imágenes de satélites.
- ✓ Diseñar una aplicación para la visualización e interpretación de los objetos hidrológicos y sus relaciones con las coberturas terrestres en imágenes de satélites.

Aporte práctico: un método para establecer las relaciones espaciales entre los objetos hidrológicos y las coberturas terrestres del entorno de las imágenes de satélites mediante procesos innovadores que faciliten la toma de decisiones.

CAPÍTULO 1: REFERENTES TEÓRICOS PARA IDENTIFICAR RELACIONES ESPACIALES ENTRE OBJETOS HIDROLÓGICOS Y COBERTURAS TERRESTRES EN IMÁGENES DE SATÉLITES

1.0 Introducción

En este capítulo se exponen diversas definiciones dadas por organizaciones y autores prestigiosos que han desarrollado aplicaciones y metodologías sobre los temas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), la Teledetección y la Minería de datos, por su incidencia en el análisis e identificación de las relaciones espaciales entre los objetos hidrológicos que están incluidos en imágenes de satélites y los objetos del medio ambiente circundantes. Además, se realiza un estudio sobre los sistemas informáticos computacionales que soportan algoritmos y procedimientos de las técnicas de minería de datos, así como, de las relaciones espaciales entre los objetos hidrológicos con vistas a implementar los procesos de extracción de las relaciones espaciales. En los acápites siguientes, se describen brevemente estas tecnologías y técnicas que será objeto de implementación en la presente tesis.

1.1 Las imágenes de satélites como fuente de datos hidrológicos y coberturas terrestres

Los datos obtenidos a través de sistemas de teledetección, tales como las imágenes de satélites, son una medida de la radiación solar reflejada por la superficie terrestre, de la energía emitida por la tierra o por un sistema RADAR o LiDAR (sistemas activos), que es reflejada por la superficie terrestre. Una imagen consiste de un arreglo de píxeles o celdas, las cuales están ordenadas en filas y columnas (Figura 1) (Chuvieco, 2010).

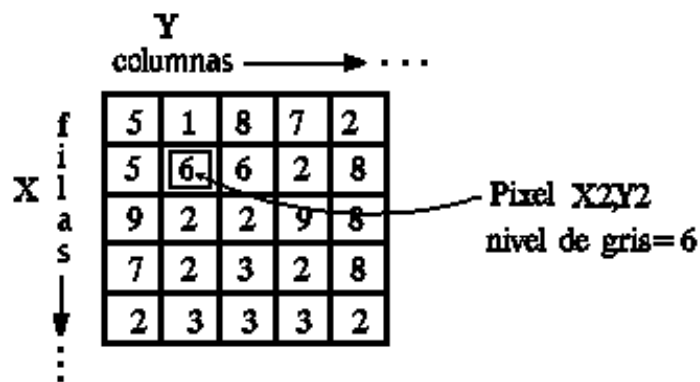


Figura 1. Representación de una imagen de satélite. Fuente: (Chuvieco, 2010).

Cada píxel tiene un número digital (DN, por sus siglas en inglés), cada uno de los cuales tiene asignado un color o un nivel de gris. El tamaño de la unidad del terreno correspondiente a un píxel se denomina resolución espacial. El DN es producido en un rango de valores característico del tipo de sistema de sensores utilizados, los valores radiométricos. Una imagen

puede consistir de muchas capas o bandas. Cada banda es creada por el sensor que colecta energía en longitudes de onda específicas del espectro electromagnético (Chuvieco, 2010).

Las superficies acuáticas absorben o transmiten la mayor parte de la radiación óptica que reciben, siendo mayor su absorptividad cuanto mayor sea la longitud de onda. La mayor reflectividad del agua clara se produce en el color azul, reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo cercano y medio, donde ya es prácticamente nula. Por esta razón, la frontera tierra-agua es muy nítida en esta banda.

La variabilidad del agua es más fácilmente detectable en las longitudes de onda más cortas (azul y verde), y se relaciona con su profundidad, contenido de materiales en suspensión (clorofila, sedimentos y nutrientes), y rugosidad de la superficie. La turbidez del agua, relacionada con su contenido de sedimentos, implica aumento de la reflectividad en todas las bandas del espectro visible, para distintos diámetros de partícula. Loc. Cit.

Las imágenes de satélites serán la fuente fundamental de datos en la investigación. Para obtener una visualización nítida de las imágenes de satélites es necesario realizar una serie de técnicas de procesamiento digital.

1.2 Las técnicas de procesamiento digital de imágenes de satélites para el descubrimiento de los objetos hidrológicos y las coberturas terrestres que las rodean

En trabajos e investigaciones científicas relacionadas con el procesamiento digital de las imágenes (PDI) se utiliza el análisis estadístico que es una técnica para analizar la calidad de la imagen, extraer las características cuantitativas de los valores radiométricos de la imagen, valorar la correlación entre pares de canales, reducir el volumen de los datos, así como filtrar y segmentar la imagen, etc. tal como se muestra en la figura 2.

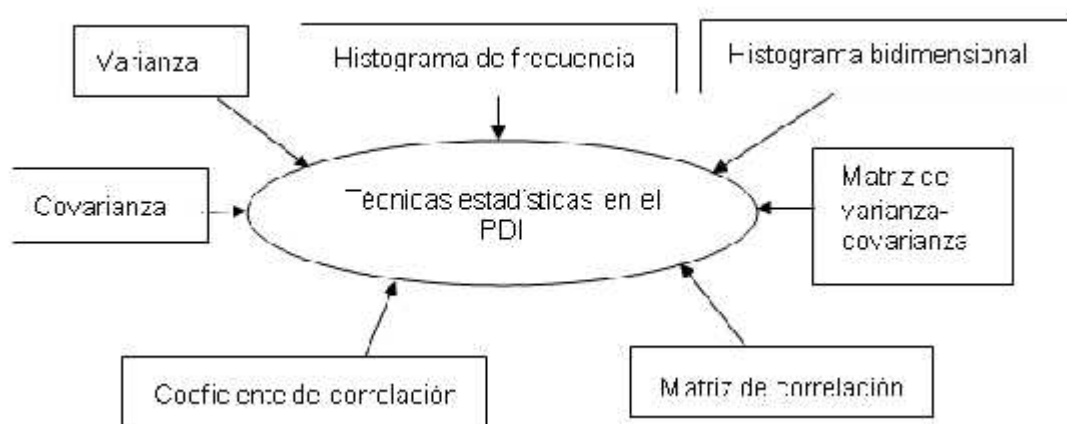


Figura 2. Técnicas estadísticas en el PDI. Fuente: Elaboración propia a partir de (López, 1990).

Autores como Lillesand y Kiefer (1987); Harrison y Jupp (1989); López (1990), Melh y Peinado (1992), Basterra (1999), Villar (2002), corroboran la potencialidad de estas técnicas en el procesamiento digital de las imágenes de satélites, y coinciden en que la representación visual de los datos de imagen necesita maximizar el contraste entre los niveles de visualización disponibles para proveer una diferenciación óptima de las características de la misma. En los acápites siguientes, se hace una descripción sintetizada de los principales procesos que se aplicarán a las imágenes de satélites en función de mejorar su calidad visual, en el marco de los objetivos de esta tesis.

1.2.1 Mejoramiento del contraste

Existen varios formatos para la representación de una imagen digital y su almacenamiento en ficheros, como por ejemplo: binario, .pcx, .tif, .gif, .img, jpg y otras. Estos ficheros son cargados en la memoria de la computadora y mostrados en una pantalla gráfica a color que permite visualizar la imagen con cierto grado de nitidez (López 1990).

El ojo humano puede solamente diferenciar un número limitado de colores discretos y aún más restringidos un conjunto de niveles de grises. La representación visual de los datos de imagen por tanto, necesita maximizar el contraste entre los colores de visualización disponibles para proveer una diferenciación óptima de las características de la imagen. La variación del contraste es la habilidad para poder diferenciar una característica del fondo. Puede ser efectuado en varias formas dependiendo del tipo de característica a ser identificada en la imagen. Loc. Cit.

El rango de datos de Teledetección ocasionalmente cubre todo el potencial de valores de imagen (normalmente 0 a 255). Para maximizar el contraste se necesita relacionar el rango y distribución de los valores en la imagen al rango de niveles de grises o colores en el monitor. Loc. Cit.

Existen dos métodos para llevar a cabo el mejoramiento del contraste o re-escalado de una imagen o como también se le conoce, los cuales se describen a continuación.

1.2.1.1 Método lineal

Los autores antes mencionados consideran que para mejorar el contraste total de la imagen, generalmente lo que se hace es seleccionar los valores mínimo y máximo de los DN desplegados en la misma, auxiliándose del histograma de frecuencias, posteriormente estos valores seleccionados son llevados a escala de 0 y 255 respectivamente, realizándose la operación para el resto de los valores comprendidos entre los valores mínimo y máximo.

Además, señalan que se obtienen buenos contrastes en las imágenes de Teledetección seleccionando los valores mínimo y máximo que representan el 1% y el 99% del histograma acumulativo de la imagen. Los valores que se encuentren por debajo del pixel que representa el

1% y por encima del que represente el 99% se pierden. También empleado el rango de los pixeles que se encuentran entre el 1% y 95%.

Para un intervalo de 0 a 255 el re-escalado quedaría expresado como:

$$\begin{aligned} y &= 0 & X < X_{\min} \\ y &= 255 \cdot (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) & x_{\min} \leq x < x_{\max} \\ y &= 255 & x \geq x_{\max} \end{aligned}$$

donde:

y - valor re-escalado
x - valor a re-escalar

1.2.1.2 Método no lineal

Según López (1990) a diferencia del método lineal en donde los valores son distribuidos proporcionalmente para llenar el intervalo de 0 a 255 DN aquí "selectivamente" se aumenta la separación o distribución entre los valores mínimos o máximos de la imagen.

De manera general se puede implementar como una función exponencial de la forma siguiente:

$$\begin{aligned} y &= A & X \leq x_{\min} \\ y &= A + B \cdot (x - x_{\min})^t & x_{\min} < x \leq x_{\max} \\ y &= A + B \cdot (x_{\max} - x_{\min})^t & x \geq x_{\max} \end{aligned}$$

donde:

y - valor re-escalado
x - valor a re-escalar
A - valor mínimo de salida (puede ser 0 u otro)
B - factor de escala entre intervalo de entrada y de salida.
t - valor para el estimado

Esta es una formulación general y se pueden dar las siguientes situaciones:

t = 10 Re-escalamiento Lineal
t < 10 Re-escalamiento no Lineal con función logarítmica.
Se aumenta el contraste entre los valores mínimos de la imagen (zonas oscuras)
t > 10 Re-escalamiento no Lineal con función exponencial
Se aumenta el contraste entre los valores máximos de la imagen (zonas claras)

De igual modo el contraste puede ser modificado aplicando a los pixeles de entrada otra función matemática directamente programada: logarítmica, exponencial, etc.

Para la investigación se asume el método no lineal puesto que el histograma de las imágenes de satélites es multimodal, por ejemplo como es el caso de imágenes infrarrojas donde existe presencia de agua y vegetación. En este caso, se puede entonces re-escalar una característica en cuestión seleccionando sus valores mínimo y máximo. Luego, con vistas a mejorar o resaltar la información que nos brindan las imágenes de satélites es necesario realizar un proceso de filtraje en dichas imágenes.

1.2.2 Filtraje de imágenes de satélites

De acuerdo con Villar (2002) el proceso de filtraje de las imágenes (ver figura 3) se suele emplear principalmente para suavizar o eliminar ruidos en la imagen y para la detección de bordes, utilizándose varios tipos de filtros.

Conociendo que una imagen queda representada por $f(x, y) = ND$ con una variación espacial, se puede hacer corresponder dicha función a una "señal sinusoidal" con una frecuencia determinada (y, por tanto, con un período T).

Si $f(x, y)$ es periódica, será una función infinita de senos y cosenos con diferentes amplitudes y fases. Las funciones $f(x, y) = f^\infty$ (sen, cos), se conocen como "Series de Fourier".

Si $f(x, y)$ no es periódica, pero de variable real e integrable (pudiendo ser, a su vez, continua o discreta), se puede aplicar toda la teoría de las "Transformadas de Fourier" y los procesos de "convolución y laplacianos".



Figura 3. Filtraje de imágenes de satélites. Fuente Elaboración propia a partir de (Villar, 2002).

Autores como López (1990) y Basterra (1999) ratifican la utilización de estos filtros para mejorar la visualización en las imágenes de satélites. Además Melh y Peinado (1992) hacen referencia a otros filtros como: filtros de ensanches de bordes, filtros direccionales y filtros no lineales.

Luego de aplicar distintas técnicas mencionadas anteriormente con el fin de visualizar la información que contienen las imágenes de satélites es necesario extraer el conocimiento referente a la naturaleza espacial de las mismas mediante las técnicas de minería de datos.

1.2.3 La Minería de Datos Espaciales

La minería de datos espaciales es una técnica que posee la base teórica y metodológica para la identificación de patrones sobre los datos (Aljure y Agudelo, 2011), y tiene como objetivo, descubrir de forma automatizada patrones inesperados potencialmente útiles en Sistemas Manejadores de Base de Datos (DBMS), que serán validados por expertos del área en cuestión. En otras palabras, se puede definir como el proceso automático o semiautomático de seleccionar, explorar, modificar, visualizar y valorar grandes volúmenes de datos espaciales con el objetivo de descubrir conocimientos. La minería de datos espaciales es considerada una rama de la minería de datos con la característica de extraer conocimiento referente a la naturaleza espacial de los datos (Reyes, 2009).

El descubrimiento de conocimiento o patrones en bases de datos espaciales a través de la minería de datos espaciales es más complejo, pues no solo se encarga de los datos no espaciales, sino que además, tiene en cuenta la localización de los objetos y sus relaciones topológicas. En este proceso se utilizan métodos basados en la generalización, el reconocimiento de patrones, el agrupamiento, de exploración de asociaciones espaciales y mediante el uso de aproximación y agregación, como se describen a continuación.

1.2.3.1 Métodos utilizados en la minería de datos espaciales

Los métodos utilizados en la minería de datos espaciales según Han y Kamber (2006) son los siguientes:

- ✓ *Basados en la generalización:* requieren de la implementación de jerarquías de conceptos, bien temática o espacial. Dentro de las temáticas se incluyen los datos no espaciales; de ellos se colectan sus características más importantes para la búsqueda, y se caracterizan por regiones y se agrupan como datos no espaciales generalizados. Para el caso de los espaciales, esta generalización puede ser presentada como la partición en regiones y su posterior fusión dependiendo de los atributos espaciales de los datos.

- ✓ *Basados en el reconocimiento de patrones:* son utilizados en la clasificación de información de datos, que pueden ser imágenes de satélites, fotografías, textos o cualquier fuente de datos:
- ✓ *De agrupamiento:* permiten agrupar los objetos de una base de datos en grupos llamados conglomerados, conformados por elementos tan similares como sea posible.
- ✓ *De exploración de asociaciones espaciales:* permiten descubrir reglas de asociación espacial que relacionen a uno o más objetos espaciales.
- ✓ *Mediante el uso de aproximación y agregación:* permiten descubrir conocimiento a partir de las características representativas de los objetos.

En la investigación se utilizarán el método basado en el reconocimiento de patrones, debido a que permite clasificar la información de los patrones hidrológicos presentes en las imágenes de satélite, así como el método de exploración de asociación espacial, ya que el descubrimiento de reglas de asociación espacial permite establecer las relaciones espaciales entre objetos espaciales con uno o más objetos espaciales de su entorno.

1.2.3.2 Reconocimiento de patrones

El reconocimiento de patrones también llamado lectura de patrones, identificación de figuras y reconocimiento de formas, consiste en el reconocimiento de patrones de señales en los datos analizados. Los patrones se obtienen a partir de los procesos de segmentación, extracción de características y descripción dónde cada objeto queda representado por una colección de descriptores. El sistema de reconocimiento debe asignar a cada objeto su categoría o clase (conjunto de entidades que comparten alguna característica que las diferencia del resto) (Duda, et al., 2001). Para poder reconocer los patrones se siguen los siguientes procesos:

1. Adquisición de datos: seleccionar el tipo de dato que se someterá al reconocimiento de patrones (imágenes de satélites, fotografías aéreas, modelos de elevaciones del terreno)
2. Extracción de características: es el proceso principal mediante el cual se intenta identificar y extraer los rasgos y elementos característicos del fenómeno que se está investigando, mediante los algoritmos específicos de procesamiento digital.
3. Toma de decisiones: los elementos adquiridos en los procesos anteriores permiten a los directivos especialistas y técnicos llegar a conclusiones que le permitan tomar decisiones más acertadas sobre distintos fenómenos.

En el reconocimiento de patrones normalmente existen dos enfoques diferenciados para la clasificación de las imágenes, el supervisado y el no supervisado. El supervisado presupone un

conocimiento previo de la región de estudio, y va dirigido a la definición de clases informacionales, mientras que el no supervisado, procede a la búsqueda automática de grupos de valores homogéneos dentro de la imagen (Lillesand y Kiefer, 1987).

Según Paulus y Hornegger (1998) la clasificación supervisada también que es conocida como clasificación con aprendizaje consiste en disponer de áreas de entrenamiento a priori de la clase a la que pertenecen y que servirán para generar una signature espectral característica de cada una de ellas que facilite la identificación de clases semejantes en el contexto de la imagen, constituyendo la leyenda de clases informacionales en contraposición a las clases espectrales que genera la clasificación no supervisada.

Algunos métodos de la clasificación supervisada son:

1. Funciones discriminantes: si son dos clases, se busca obtener una función g tal que para un nuevo objeto O , si $g(O) \geq 0$ se asigna a la clase 1 y en otro caso a la 2. Si son múltiples clases se busca un conjunto de funciones $g(i)$ y el nuevo objeto se ubica en la clase donde la función tome el mayor valor.
2. Vecino más cercano: un nuevo objeto se ubica en la clase donde esté el objeto de la muestra original que más se le parece.
3. Redes neuronales artificiales: denominadas habitualmente RNA o en sus siglas en inglés ANN, suponiéndose que imitan a las redes neuronales reales en el desarrollo de tareas de aprendizaje.

La Clasificación no supervisada, también conocida como clasificación sin aprendizaje y para su implementación se utilizan algoritmos de clasificación automática multivariante, en los que los individuos más próximos se van agrupando formando clases o agrupamientos espectrales (clúster), existiendo dos tipos:

1. Restringida: el número de clases en la que se estructurará la muestra, es previamente definida.
2. Libre: el número de clases en la que se estructurará la muestra, depende exclusivamente de los datos.

En la investigación se asume la clasificación supervisada mediante el método de funciones discriminantes, puesto que se conoce un conjunto de patrones hidrológicos los cuales serán los datos de entrenamiento utilizados para clasificar otros objetos espaciales en las imágenes de satélites.

1.2.4 Relaciones espaciales entre objetos geográficos. Criterios a tener en cuenta para establecer las relaciones espaciales

Según Castillo y Temario (2009) los datos geográficos son entidades espacio-temporales que describen y cuantifican la distribución, el estado y los vínculos de los distintos fenómenos u objetos naturales o sociales. En las bases de datos geográficos, los objetos espaciales presentan atributos no espaciales y atributos espaciales, estos últimos contienen intrínsecamente las relaciones espaciales o predicados espaciales como también son mencionados (ej. cerca, lejos, contiene, intercepta, etc.).

Existen 4 principios topológicos de los datos geográficos que deben cumplir todo dato espacial o entidad del paisaje, los cuales son:

1. Tiene posición absoluta sobre un sistema de coordenadas (x, y, z).
2. Tiene posición relativa frente a otros elementos del paisaje (topología: incluido, adyacente, cruzado, etc.).
3. Tiene una figura geométrica que lo representa (punto, línea, polígono).
4. Tiene atributos que lo describen: características del elemento o fenómeno.

Según varios autores (Guillermo 2010), Bogorny (2006), Xiaoshenga (2005), existen tres tipos de relaciones:

1. Distancia: Relación métrica que establece la separación entre objetos. (Figura 4.a). Aunque en los objetos areales hay que definir si la distancia es hasta el centroide, hasta un lado o perpendicular.
2. Dirección: Determina relaciones de posicionamiento en términos de un marco de referencia (ej. norte, sur, este, oeste). (Figura 4. b).
3. Topológicas: Son relaciones que establecen un grado de conectividad entre los objetos (ej. adyacencia, contenida, separada, etc. (Figura 4.c).

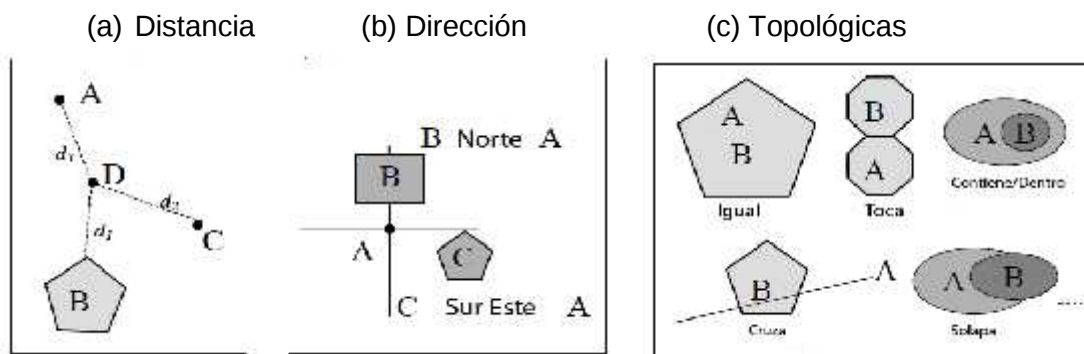


Figura 4. Ejemplo de relaciones espaciales. Fuente: (Guillermo, 2010).

En la tabla 1 se describe la clasificación de predicados espaciales según la categoría “*Topológicos*” que se asume en la investigación para establecer el grado de conectividad entre los distintos tipos de objetos hidrológicos presentes en imágenes de satélites y las clases u objetos del entorno que lo circunda.

Tabla 1. Clasificación de predicados espaciales según la categoría “Topológicos”. Fuente: (Ronghua, 2005).

Categoría de Predicados	Operadores Espaciales	Ejemplo	Explicación	Significado	Rango de Valores
Predicados Topológicos	<i>separados</i>	<i>separados (a,b)</i>		El objeto A está separado del objeto B	Verdadero, Falso
	<i>intercepta</i>	<i>intercepta (a,b)</i>		El objeto A intercepta B	Verdadero, Falso
	<i>contiene</i>	<i>contiene (b,a)</i>		El objeto B contiene completamente A	Verdadero, Falso
	<i>dentro</i>	<i>dentro (a,b)</i>		El objeto A está dentro de B	Verdadero, Falso
	<i>topar</i>	<i>topar (a,b)</i>		El objeto A toca el borde de B	Verdadero, Falso
	<i>igual</i>	<i>igual (a,b)</i>		El objeto A es igual a B	Verdadero, Falso
	<i>cubre</i>	<i>cubre (b,a)</i>		El objeto B cubre A	Verdadero, Falso

1.2.5 Localización de patrones espaciales

Desde el punto de vista conceptual, una relación espacial se define como $X \rightarrow Y$, donde X y Y son conjuntos de predicados espaciales o no espaciales. En este sentido, se debe acotar que los predicados espaciales permiten calcular relaciones entre objetos y devuelven un valor booleano, entre los que se encuentran valores como *disjoint*, *touches*, *overlaps*, *contains*, *adjacent_to*, *near_by*, *inside*, *close_to*, entre otros (Vyas et al., 2007).

Según Koperski y Han (1995), existen métodos de Minería de Datos Espaciales, que no pueden descubrir reglas asociativas, infiriendo la relación de la estructura espacial en los objetos, ya sean espacial/espacial o espacial/no espacial, los cuales contienen predicados espaciales, tales como *adyacente_a*, *rodeado_por*, *dentro*, *cerca_de*, *intercepta*, etc.

Como forma de complemento del proceso, las relaciones espaciales representan las relaciones objeto/predicado, las cuales contienen predicados espaciales.

En cuanto a las relaciones no espaciales Kaosar (2009), Ding y Wei (2006) plantean que el proceso de extracción de asociación de relaciones no espaciales se descompone en dos subprocesos, señalando que el proceso, en las relaciones espacial se descompone en tres subprocesos.

- a) Selección de los predicados espaciales: Son las relaciones espaciales (ej. Topológicas, Distancia, etc.) entre la temática de referencia y el conjunto de temáticas relevantes.
- b) Búsqueda de todos los patrones frecuentes / predicados / conjuntos: El conjunto de predicados es un patrón frecuente si el soporte es al menos igual que cierto umbral.
- c) Generación de relación fuerte: La relación es fuerte si el alcance del soporte mínimo y la confianza es al menos igual que cierto umbral.

En la técnica de asociación se introducen dos conceptos: mínimo soporte y mínima confianza. En las grandes bases de datos pueden encontrarse múltiples asociaciones entre los objetos, pero éstas deben aplicarse a pequeños grupos; razón por la cual se deben filtrar dichas asociaciones utilizando mínimo soporte y mínima confianza (Agrawal et al., 1993).

Según Karasov (2005), un gran número relaciones espaciales se derivan de las bases de datos espaciales; sin embargo, pocas pueden resultar útiles. Es por eso que, de este grupo de asociaciones obtenidas, solo aquellas que satisfacen ciertas restricciones impuestas serán potencialmente útiles.

Según el autor, estas restricciones pueden ser de tres tipos:

1. Restricciones sintácticas: Aquí se involucran restricciones en el elemento que aparece en la asociación. Por ejemplo, puede resultar interesante solo la relación que tiene un elemento específico que aparece en el consecuente.
2. Restricción con el soporte: Está referido al número menor de transacciones que soporta la asociación. Este soporte es definido como la fracción de la transacción que satisface la unión del elemento en el consecuente y antecedente de la regla.
3. Restricciones de cumplimiento: La confianza nos da una medida de la fuerza de la asociación. Nos informa sobre la dependencia entre la aparición del consecuente si aparece en el antecedente. En general interesa que la confianza supere un mínimo (Cerdeira, 2004).

Siguiendo estas restricciones, una relación espacial es a modo de ejemplo la siguiente:

- sucesor o consecuente no espacial con predecesor o antecedente espacial

$es(x, casa_alquiler) \wedge cerca_de(x, playa) \rightarrow es_cara(x) (90\%)$

Esta regla plantea que el 90% de las casas de alquiler que están cerca de la playa son caras.

- sucesor o consecuente espacial con un predecesor no espacial

es (x, río) → intercepta(x, puente) (75%)

Esta regla presupone que el 75% de los ríos están interceptados por puentes.

Una vez que se obtengan las relaciones espaciales en las imágenes de satélites es necesario visualizarlas y representarlas mediante los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

1.2.6 Los Sistemas de Información Geográfica como software para el análisis y representación espacial de las relaciones espaciales

Los sistemas de información geográfica han recibido mucha atención en los últimos años (Worboys, 1992). Los perfeccionamientos actuales en el hardware han hecho posible que la implementación de este tipo de sistemas sea abordable por muchas organizaciones. Conjuntamente, se ha llevado a cabo un importante esfuerzo colaborativo por parte de dos organismos internacionales (ISO (ISO/IEC, 2002) y el Open Geospatial Consortium (OGC, 2003) para definir estándares y especificaciones para la interoperabilidad de los sistemas. Esto ha hecho posible que muchas organizaciones estén trabajando en la construcción de infraestructuras de datos espaciales ("Global Spatial Data Infrastructure Association", 2012) que les permitan compartir su información geográfica.

El término SIG, comprende la integración de distintas áreas. Puede definirse a priori como un poderoso conjunto de herramientas para recoger, almacenar, recuperar, transformar y mostrar datos espaciales del mundo real (Burrough, 1988). En las fuentes bibliográficas se puede encontrar varias definiciones del término SIG y cada una de ellas considera la funcionalidad de estos sistemas desde diferentes perspectivas, identificándose tres aspectos diferentes:

- ✓ Un SIG es una colección de herramientas informáticas para realizar análisis y simulaciones geográficas (Laurini y Thompson, 1992; Burrough y McDonnell, 1998; Rigaux et al., 2001)
- ✓ Un SIG está basado en un conjunto de estructuras de datos y algoritmos para recuperar y manipular información geográfica (Worboys, 2004).
- ✓ Un SIG es una utilidad que ayuda a tomar decisiones en tareas relacionadas con la geografía (Longley et al., 2001; Harmon y Anderson, 2003).

Lo esencial de un SIG es su capacidad de generar nueva información a partir de un conjunto previo de datos mediante su manipulación y reelaboración, con el objetivo de utilizar sus resultados en la gestión de la información espacial. En la investigación se utilizarán los SIG para intentar separar la información de acuerdo con la taxonomía hidrológica contenida en las imágenes de satélites incorporadas como datos geoespaciales al sistema y, almacenar las relaciones espaciales independientemente, de forma tal que permita trabajar con ellas de

manera rápida y sencilla, facilitando a los usuarios la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología de los objetos hidrológicos, en función de generar nuevas relaciones espaciales en algunas situaciones.

1.2.7 Los sistemas informáticos como soporte de la minería de datos espaciales

La aplicación de la minería de datos espaciales busca resolver diversos problemas mediante el descubrimiento de conocimiento, aplicando diversas técnicas donde los objetos espaciales cuentan además con características no espaciales y sirven de entrada a algoritmos de minería. En aplicaciones desarrolladas para este fin se ha incluido también el uso de otras técnicas de la inteligencia artificial como las redes bayesianas y árboles de decisión. A continuación se describen algunos sistemas informáticos con soporte para implementar la minería de datos espaciales o como base en dichos procesos para obtener resultados específicos:

- *GeoDMA*: es un complemento para la minería de datos del sistema informático *TerraView*. Soporta el uso de datos espaciales para la comparación de imágenes y regiones obtenidas en los procesos de segmentación y análisis de imágenes. Optimiza la segmentación de imágenes y la extracción de características, incluyendo atributos de selección, clasificación, validación y visualización (Kux y Souza, 2012). Utiliza árboles de decisión y algoritmos para mapas auto organizados (Korting et al., 2008). Se encuentra liberado bajo la licencia de software libre GNU General Public License (GPL), lo que facilita el desarrollo de nuevas funcionalidades. Su implementación es en lenguaje C++ e interfaz en QT.
- *SDMiner*: tiene soporte para las principales técnicas de minería de datos espaciales, como agrupamiento, clasificación espacial, caracterización espacial y espacio-temporal y reglas de asociación espacial. Posee gran facilidad para el uso de datos espaciales y no espaciales con la característica de determinar su naturaleza. Los parámetros de entrada para la minería son en forma de tablas de la base de datos, lo que aumenta su flexibilidad. Implementa sus algoritmos en una librería que permite que sean utilizados por otros sistemas y, a su vez, incorporar nuevas funcionalidades (Bae et al., 2009).
- *SaTScan*: es gratuito y se utiliza para realizar análisis estadísticos espaciales, implementando la técnica de Kulldorff para la detección de conglomerados espaciales, temporales, espacio-temporales y prospectivos (Kulldorff y Nagarwalla, 1995). Se pueden utilizar varios modelos estadísticos, entre ellos, la distribución de Poisson o Bernoulli. Fue concebido inicialmente para su uso en el área de la salud en estudios sobre la distribución espacial de las enfermedades y epidemias. Si bien su mayor

utilización radica en los estudios de sanidad, puede ser utilizado en problemas similares de otros campos para: 1) efectuar la vigilancia geográfica de una variable, detectar patrones espaciales o espacio-temporales estadísticamente significativos, 2) probar si una variable tiene distribución aleatoria en el espacio, tiempo o espacio-tiempo, y 3) evaluar valores umbrales alcanzados por agrupaciones espaciales de la variable. (Coleman et al., 2009).

Los sistemas informáticos que constituyen soporte para la minería de datos espaciales descritos anteriormente presentan las desventajas siguientes en cuanto al tratamiento de los objetos hidrológicos presentes en imágenes de satélites:

- ✓ No se conoce con certeza el por ciento que representan los patrones hidrológicos con respecto a los demás patrones que se encuentren en la imagen.
- ✓ No implementan la visualización cartográfica de los patrones hidrológicos obtenidos.
- ✓ No realizan una traducción del resultado a un lenguaje común.

Por estas razones, no pueden ser utilizados en la investigación propuesta, por lo cual, se necesita diseñar un sistema nuevo que reconozca con certeza el por ciento que representan los patrones hidrológicos con respecto a los demás patrones que estén incluidos en la imagen, de modo tal que facilite la visualización cartográfica de los patrones hidrológicos obtenidos y contribuya a realizar una traducción del resultado a un lenguaje común. Este nuevo sistema constituye uno de los aportes de la investigación y consiste en obtener de forma automatizada las relaciones espaciales entre los objetos hidrológicos y las coberturas terrestres presentes en las imágenes de satélites en correspondencia con el método para identificar las relaciones espaciales que se elabore.

1.3 Conclusiones Parciales

Teniendo como referencia las limitaciones detectadas en los sistemas y métodos propuestos en diversas investigaciones realizadas por varios autores se arriba a las siguientes conclusiones:

- 1) Durante el proceso de investigación para este trabajo, se pudo corroborar la coincidencia de criterios de muchos investigadores al plantear que el proceso de implementación y obtención de las relaciones espaciales es complejo, y requiere del empleo de diversas operaciones.
- 2) Se considera apropiado a los efectos de la investigación que se llevará a cabo, utilizar los métodos “*basado en el reconocimiento de patrones*” y “*exploración de asociaciones espaciales*”, ambos como parte de la técnica de minería de datos, con el fin de clasificar

la información de los patrones hidrológicos y descubrir las relaciones espaciales presentes en las imágenes de satélite.

- 3) Se asume la clasificación supervisada mediante el método de funciones discriminantes, conociendo los patrones hidrológicos los cuales serán los datos de entrenamiento utilizados para clasificar otros objetos espaciales en las imágenes de satélites.
- 4) Los sistemas informáticos *GeoDMA*, *SDMiner*, *SaTScan* no cumplen con los requerimientos específicos de la investigación, por lo cual, se diseñará un sistema nuevo que permita conocer con certeza el porcentaje que representan los patrones hidrológicos con respecto a los demás patrones que se encuentren en la imagen de satélite, implementando la visualización cartográfica de los patrones hidrológicos obtenidos y realizando una traducción del resultado a un lenguaje común.
- 5) En cuanto a las relaciones espaciales entre objetos geográficos en la investigación, se propone utilizar las topológicas para establecer el grado de conectividad entre los distintos tipos de objetos hidrológicos presentes en la imagen satelital y objetos del entorno que los circundan.

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS METODOLÓGICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.0 Introducción

Teniendo en cuenta los elementos esbozados en el capítulo anterior sobre la importancia y los fundamentos del reconocimiento de los patrones de los objetos hidrológicos en las imágenes de satélites, descubriendo las relaciones espaciales entre ellos y las coberturas que los rodean se hace necesario pasar a una nueva etapa de la investigación que tiene por objetivo caracterizar las tecnologías, métodos y herramientas necesarias para sustentar los procesos mencionados anteriormente. Para cumplimentar dicho objetivo en este capítulo se tratarán aspectos tales como: los métodos teóricos y matemáticos – estadísticos, las herramientas y tecnologías informáticas a utilizar, una propuesta de esquema taxonómico que se asumirá como dato de partida para el descubrimiento de los patrones hidrológicos presentes en las imágenes de satélites así como la representación de los patrones de drenaje y demás objetos hidrológicos en relación con las coberturas terrestres del entorno en cuanto al relieve, la distribución de la vegetación, y las condiciones estructurales de la zona.

2.1 Métodos de Investigación

Entre los métodos de investigación que apoyan este trabajo se encuentran:

- ✓ **Histórico-Lógico:** se utilizó con el objetivo de valorar a lo largo del tiempo la evolución de los algoritmos y problemas matemáticos de optimización para dar cumplimiento al objetivo propuesto.
- ✓ **Método hipotético-deductivo:** Este método se empleó en el diseño experimental y la demostración de los objetivos planteados.
- ✓ **Inductivo-deductivo:** se utilizó en el análisis de las relaciones implícitas en las imágenes de satélites para deducir un mejor establecimiento de las relaciones espaciales entre los objetos hidrológicos y el entorno, así como en la caracterización de la taxonomía hidrológica que serviría de base para los análisis de las relaciones mencionadas anteriormente.
- ✓ **Enfoque Sistémico:** se utilizó para organizar el método en etapas relacionadas entre sí, donde cada etapa sirve de entrada a la siguiente para darle cumplimiento al logro de los objetivos propuestos permitiendo la retroalimentación entre ellas.
- ✓ **Matemático – Estadístico:** Se empleó en el diseño e implementación de algoritmos informáticos, mediante diferentes técnicas matemáticas y estadísticas que están enfocadas hacia las exigencias teórico-metodológicas de la Maestría en Biomatemática y cuyos fundamentos se exponen a continuación.

- ✓ **Análisis-porcentual:** se utilizó en las representaciones del porcentaje que representa cada patrón hidrológico presente en la imagen con respecto a todos los patrones existentes en del sistema.
- ✓ **Técnicas de procesamiento digital de imágenes de satélites de recursos naturales:** se utilizó para procesar las imágenes mediante diferentes algoritmos matemáticos y estadísticos con el fin de extraer los rasgos típicos de los objetos hidrológicos y las coberturas terrestres que los rodean.
- ✓ **Técnicas de minería de datos espaciales:** se empleó en el establecimiento de las relaciones espaciales y el modelo topológico.
- ✓ **Técnicas de análisis espacial mediante SIG:** se empleó principalmente en la captura de los datos y en la representación cartográfica de las relaciones espaciales.

2.2 Tecnologías informáticas utilizadas en la investigación

Las herramientas y tecnologías informáticas que se utilizaron en el desarrollo de la investigación, son las siguientes.

2.2.1 Lenguaje de programación Java

Java es un lenguaje de programación orientado a objetos desarrollado por Sun Microsystems a principios de los años 90. El lenguaje en sí mismo toma mucha de su sintaxis de C y C++, pero tiene un modelo de objetos más simple y elimina herramientas de bajo nivel, que suelen inducir a muchos errores, como la manipulación directa de punteros o memoria (Gosling et al., 2005). Entre sus ventajas, cabe mencionar:

- ✓ Es un lenguaje multiplataforma potente. Se puede descargar de forma gratuita. Lo que más se destaca de Java a la hora de programar es la cantidad de paquetes (o librerías) que tienen disponibles que le proporcionan fortaleza al lenguaje.
- ✓ Se integra fácilmente con la red, siendo sus posibilidades muy altas. Loc. Cit.

En el desarrollo de la investigación fue definido Java como lenguaje de programación, de conjunto al Entorno de Desarrollo Integrado (EDI) Netbeans, ya que es compatible con la librería OpenCV y se usarán para el diseño de la aplicación para la identificación de las relaciones espaciales entre los objetos hidrológicos y las coberturas terrestres.

2.2.2 Sistema de Gestor de Base de Datos

Los sistemas de gestión de bases de datos son un tipo de software dedicado a servir de interfaz entre la Base de Datos (BD), el usuario y las aplicaciones que la utilizan. PostgreSQL es un sistema de gestión de bases de datos objeto-relacional, que incluye características de la

orientación a objetos en una vía en la que los usuarios pueden entender fácilmente el sistema: clases, herencia, tipos, funciones, restricciones (*Constraints*), disparadores (*triggers*), reglas (*rules*) Integridad transaccional (Lockhart, 1996).

Las principales mejoras en PostgreSQL incluyen:

1. Los bloqueos de tabla han sido sustituidos por el control de concurrencia multi-versión, el cual permite a los accesos de sólo lectura continuar leyendo datos consistentes durante la actualización de registros, y permite copias de seguridad en caliente desde `pg_dump` mientras la base de datos permanece disponible para consultas.
2. Se han implementado importantes características del motor de datos, incluyendo subconsultas, valores por defecto, restricciones a valores en los campos (*constraints*) y disparadores (*triggers*).
3. Se han añadido funcionalidades en línea con el estándar SQL92, incluyendo claves primarias, identificadores entrecomillados, forzado de tipos cadena literal, conversión de tipos y entrada de enteros binarios y hexadecimales.
4. Los tipos internos han sido mejorados, incluyendo nuevos tipos de fecha/hora de rango amplio y soporte para tipos geométricos adicionales.
5. La velocidad del código del motor de datos ha sido incrementada aproximadamente en un 20-40%, y su tiempo de arranque ha bajado el 80% desde que la versión 6.0 fue lanzada. Loc. Cit.

En la investigación esta herramienta se usó para almacenar las relaciones espaciales que se fueron generando para su posterior procesamiento.

2.2.3 OpenCV

OpenCV (Open Source Computer Vision) es una biblioteca libre que contiene más de 500 algoritmos optimizados para trabajar con imágenes y análisis de vídeos e imágenes. Desde su introducción en 1999, ha sido adoptada como la herramienta de desarrollo primaria por la comunidad de investigadores en visión de ordenador.

Esta librería es utilizada en el procesamiento digital de las imágenes satelitales por brindar un conjunto de filtros y funciones que permiten descubrir patrones con un nivel de certeza determinado (Laganiere, 2011), y precisamente por ello, en la investigación que se desarrolla, será utilizada para clasificar las imágenes de satélites así como generar las relaciones espaciales presentes en las mismas.

2.2.4 Entorno de desarrollo NetBeans

NetBeans es un entorno de desarrollo integrado, modular, de base estándar (normalizado), programado en Java. El proyecto NetBeans consiste en un IDE de código abierto y una plataforma de aplicación, las cuales pueden ser usadas como una estructura de soporte general para compilar cualquier tipo de aplicación. Se ejecuta en Windows, Linux, Mac OS X, Solaris y además es un producto de código abierto, gratuito y sin restricciones de uso. La plataforma NetBeans permite que las aplicaciones sean desarrolladas a partir de un conjunto de componentes de software llamados módulos. Un módulo es un archivo que contiene clases de java escritas para interactuar con las APIs de NetBeans y un archivo especial que lo identifica como módulo. Las aplicaciones construidas a partir de módulos pueden ser extendidas agregándole nuevos módulos. Debido a que los módulos pueden ser desarrollados independientemente, las aplicaciones basadas en la plataforma NetBeans pueden ser extendidas fácilmente por otros desarrolladores de software (Oracle, 2011).

En la investigación de esta tesis, fue empleado para el desarrollo de la aplicación por ser compatible con la librería OpenCV.

2.3 Taxonomía propuesta para los objetos hidrológicos presentes en las imágenes de satélites

Según Kubschi (2005) una taxonomía se define como una jerarquía o superposición de relaciones entre las diferentes clases de un elemento. Estos elementos pueden clasificarse en distintas categorías. Así, se establecen relaciones entre las mismas en términos de elementos hijos y elementos padres.

Para el desarrollo de la investigación propuesta, fue necesario disponer a modo de datos de partida, de un esquema taxonómico de los objetos hidrológicos que serán la base para el descubrimiento de las relaciones espaciales y no espaciales con el resto de los objetos ambientales que los circundan. Este esquema es muy importante, pues permitirá identificar los tipos de objetos hidrológicos presentes en el contexto de las imágenes de satélites desde una perspectiva homogénea para la investigación que se pretende realizar, así como para investigaciones posteriores como punto de partida clasificar los mismos en las cuencas hidrográficas.

El esquema taxonómico de partida se elaboró con los tipos de clasificaciones de objetos hidrológicos característicos de manera general a nivel internacional, para de ahí, generar nuevos esquemas taxonómicos propios de los ambientes nacionales o locales contenidos en la imagen de satélite que se inserte en el SIG.

De manera preliminar y siguiendo los criterios de MonTreux (1990), Cowardin et al., (1979) y Cervantes (1994), se ha adoptado la taxonomía que se muestra en el organigrama de la figura 5 (ver Anexo 1), con la cual se trabajará en la investigación que se llevará a cabo.

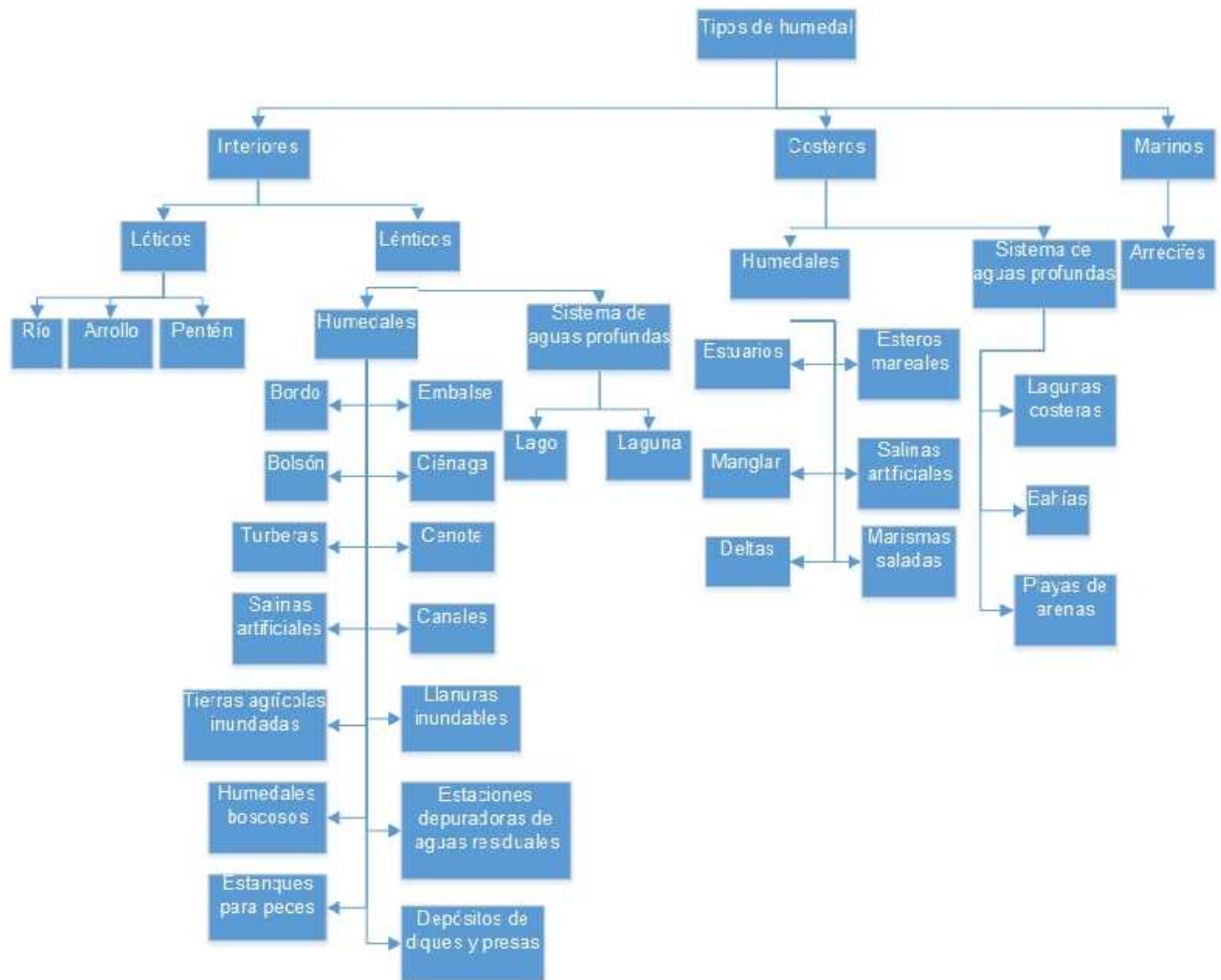


Figura 5. Taxonomía hidrológica. Fuente: Elaboración propia a partir de las definiciones de (MonTreux, 1990), (Cowardin et al., 1979) y (Cervantes, 1994).

En la descripción de la taxonomía, se asumen las definiciones siguientes:

2.3.1 Ecosistemas acuáticos interiores

Se considera un humedal interior a toda aquella planicie de inundación, existente a lo largo de los ríos y arroyos, en las márgenes de lagos y estanques o como depresión inundada aislada, rodeada por tierra. Estos sistemas no presentan algún tipo de contacto directo con el mar y

pueden, o no, tener una salinidad variable, aspecto determinado por los tipos de afluentes que los alimentan o por el sustrato.

El **ecosistema léntico** (también llamado ecosistema lacustre o ecosistema de agua inmóvil) y el **ecosistema lótico** (también llamado ecosistema ribereño) son dos tipos de ecosistemas acuáticos, el primero lidiando con ecosistemas de agua inmóvil y el segundo con ecosistemas de agua que fluye. Juntos, son los dos ecosistemas que componen el estudio de ecología de agua fresca, también conocido como ecología acuática (Cervantes, 1994).

Dentro del tipo de **ecosistema lótico** según el autor mencionado anteriormente se incluyen los siguientes cuerpos de agua:

- ✓ **Ríos:** Son, en última instancia, corrientes de agua continua que desembocan en otra corriente de agua o en el mar, pudiendo ser de varias formas.
- ✓ **Arroyos:** Son torrentes variables de agua, los cuales pueden ser estacionales o permanentes, mansos o rápidos, pero con volumen de agua menor que los ríos. Suelen circular sobre cauces rocosos (autoerosionado) y normalmente contienen aguas frías, saturadas de oxígeno.
- ✓ **Petén:** Se denomina comúnmente a los islotes de vegetación arbórea que se encuentran inmersos en una matriz de vegetación baja inundable. En los petenes se presentan variaciones en la elevación del terreno y por lo tanto en la profundidad de la inundación y en la duración de la misma, la cual determina qué asociación vegetal se manifiesta en cada sitio.

El **ecosistema léntico** se divide en humedales y sistema de aguas profundas. Según el convenio Ramsar (MonTreux, 1990), se considera que un humedal “es una zona de la superficie terrestre que está temporal o permanentemente inundada, regulada por factores climáticos y en constante interrelación con los seres vivos que la habitan”.

Dentro de los humedales se incluyen los siguientes cuerpos de agua:

- ✓ **Bordos:** Son obras artificiales de origen humano, construidas con estacas y postes, con el fin de almacenar el agua y utilizarla para irrigación, entre otros propósitos. Los bordos pueden ser temporales o permanentes y constituyen cuerpos de agua muy abundantes en algunas regiones. Además, pueden representar recursos potenciales para aprovechamiento piscícola en actividades acuícolas. Loc. Cit.
- ✓ **Embalses:** Son reservorios artificiales en los que se recogen las aguas de un río. Están sujetos a fluctuaciones en el nivel del agua.
- ✓ **Cenotes:** Son un tipo particular de depósito de agua dulce que, por ejemplo en México, se encuentran en la Península de Yucatán. Son anchos pozos naturales, de contornos

más o menos circulares y paredes regularmente verticales, que se han formado debido al hundimiento reciente del terreno cárstico, ocasionado por la frecuente circulación de las aguas subterráneas que forman profundas grutas, cuyas bóvedas se derrumban y dan lugar a estos cuerpos de agua. Loc. Cit.

- ✓ **Bolsón:** Es una cuenca cerrada intermontana, que se caracteriza por su desagüe centrípeto (funcionalmente son cuencas endorreicas). Estas depresiones frecuentemente han sido excavadas por el viento; algunas contienen en su porción central gran cantidad de aluviones que han sido arrastrados desde las montañas circundantes, otras presentan piso rocoso cubierto con sal (los llamados bolsones alcalinos). Loc. Cit.
- ✓ **Ciénaga:** Zonas pantanosas alimentadas por un ojo de agua permanente y suelos permanentemente saturados, con abundante vegetación ribereña y semisumergida. Muchas veces representan las cabeceras de arroyos y pequeños ríos, especialmente en zonas áridas o semiáridas (Minckley y Brown, 1982);(Hendrickson y Minckley, 1985). En algunos casos pueden tener cierta influencia marina.
- ✓ **Turberas:** Humedales en los que cantidades considerables de agua son retenidas por una acumulación de materia orgánica parcialmente descompuesta. Distinguimos Turberas alcalinas o eutróficas que obtienen los nutrientes a través del suelo y dominan los juncos; y Turberas ácidas u oligotróficas que dependen de las precipitaciones para el aporte de agua y nutrientes, dominando musgos del género Sphagnum. Loc. Cit.
- ✓ **Salina artificial:** es un lugar donde se deja evaporar agua salada, para dejar solo la sal, poder secarla y recogerla para su venta. Se distinguen dos tipos de salinas, las **costeras**, situadas en la costa para utilizar el agua de mar, y las **de interior**, en las que se utilizan manantiales de agua salada debido a que el agua atraviesa depósitos de sal subterráneos. En algunos casos, debido al escaso caudal de los manantiales también se utiliza el bombeo de agua al interior de la tierra desde unas balsas o estanques, aumentando así la producción de sal. Loc. Cit.
- ✓ En las **salinas de interior** no siempre existe un terreno llano disponible para construir las *eras*, por lo que estas pueden estar dispuestas en varios niveles (en terrazas), o incluso, pueden estar construidas sobre plataformas horizontales artificiales. Hay que conducir el agua del manantial hasta las *eras*, normalmente por su propia gravedad mediante acueductos sobre el terreno o contruidos con madera o piedra. Loc. Cit.

- ✓ En ingeniería se denomina **canal** a una construcción destinada al transporte de fluidos generalmente utilizada para agua y que, a diferencia de las tuberías, es abierta a la atmósfera. También se utilizan como vías artificiales de navegación (Chow, 1982).
- ✓ **Tierras agrícolas inundadas estacionalmente:** incluye praderas y pasturas inundadas utilizadas de manera intensiva. Loc. Cit.
- ✓ **Llanuras inundadas estacionalmente:** Suelo cubierto de agua o anegado durante periodos variables, pero bien drenado durante gran parte de la estación de crecimiento. Loc. Cit.
- ✓ Los **humedales boscosos** se encuentran representados a nivel mundial por los humedales boscosos del ciprés de los pantanos, ubicados principalmente en Estados Unidos, y los manglares costeros de Centroamérica, el Caribe y Asia, que reciben su nombre por estar constituidos por especies arbóreas llamadas comúnmente mangles (LI y LEE, 1997; Hauenstein et al., 1999).
- ✓ Una **estación depuradora de aguas residuales** (EDAR), también llamada **planta de depuración** o **planta de tratamiento de aguas residuales** (PTAR), tiene el objetivo genérico de conseguir, a partir de aguas negras o mezcladas y mediante diferentes procedimientos físicos, químicos y biotecnológicos, un agua efluente de mejores características de calidad y cantidad, tomando como base ciertos parámetros normalizados (Cuellar y Ricardo, 2009).
- ✓ Un **estanque** es un depósito cerrado de agua, sin corrientes, de un tamaño tal que puede ser utilizado para el cultivo controlado de peces (Rojas, 2008).
- ✓ Los **diques o presas** son estructuras diseñadas y construidas para controlar o retener sustancias tales como agua o lodo. Loc. Cit.

Dentro de sistema de aguas profundas de acuerdo con Cervantes (op. cit) se incluyen los siguientes cuerpos de agua:

- ✓ **Lagos:** son cuerpos de agua naturales de condiciones lénticas (estancadas) y cuyo origen es continental; sin comunicación directa con el mar, generalmente son grandes, con más de 8 m de profundidad. Constituyen masas de agua permanentes y que se depositan en una depresión del terreno (cuenca lacustre).
- ✓ **Laguna:** son cuerpos de agua con aparente similitud con los lagos; su existencia puede corresponder a cualquier origen, drenaje y dimensiones. Permanecen relativamente estancados y son un tanto inestables, con variaciones en el nivel de agua; pueden ser temporales o permanentes, dependiendo del régimen pluvial. Son depósitos con una profundidad media menor a los 8 metros y de forma cóncava. Esta profundidad tiende a

provocar una turbiedad que origina una menor transparencia del agua en comparación con un lago la cual frecuentemente resulta de color pardo por la presencia de materia orgánica, por el crecimiento de algas y por la presencia de sólidos suspendidos.

2.3.2 Ecosistemas acuáticos costeros

Se denominan **ecosistemas acuáticos costeros** a todos aquellos cuerpos de agua que se encuentran en la zona litoral, manteniendo una comunicación permanente o temporal con el mar y que pueden o no estar conectados a sistemas dulceacuícolas. Esto hace que el tipo de salinidad presente en las aguas de estos sistemas vaya desde salobre hasta típicamente marina (Burke et al., 1988). Los ecosistemas costeros se dividen en humedales y sistema de aguas profundas.

Dentro de los humedales según Cervantes (op. cit) se incluyen los siguientes cuerpos de agua:

- ✓ **Estero:** es un cuerpo de agua formado en un canal natural o en antiguos brazos de un delta de río actualmente cerrado. En sus aguas se alternan períodos de estancamiento y de circulación, determinados por el ciclo diario o estacional de las mareas y por la magnitud y penetración de las corrientes de mareas, lo que origina que sus aguas presenten salinidad variable.
- ✓ **Estuario:** es un cuerpo de agua costero semicerrado, con una conexión libre con el mar, dentro del cual el agua de mar se diluye significativamente con el agua dulce que proviene del drenaje terrestre. Se encuentran bordeados y parcialmente cortados desde el océano por masas de tierra, las cuales son perpendiculares a la línea de costa.
- ✓ **Bahía:** es una entrada del mar en la costa, de extensión considerable.
- ✓ **Manglar:** superficie estimada en 721,554 hectáreas. Se halla en orillas bajas y fangosas de las costas y es característico de esteros y de desembocaduras de ríos. Sus componentes principales son *Rhizophora mangle* (mangle rojo), *Avicennia germinans* (mangle negro), *Laguncularia racemosa* (mangle blanco) y *Conocarpus erectus* (mangle botoncillo).
- ✓ En las **salinas costeras** se suele aprovechar terrenos llanos a nivel del mar, normalmente marismas separan unas de otras y de los cabales por los que llega el agua del mar, dejando que las *eras* se inunden simplemente abriendo su compuerta durante una marea alta.
- ✓ **Marisma:** es un terreno bajo y anegado, localizado a orillas del mar o de los esteros. Se encuentra inundado por las aguas del mar, ya sea por las mareas y sus sobrantes o por

el encuentro de las aguas marinas con la desembocadura de los ríos. Presenta vegetación de juncos, hierbas y cañas además de pequeñas lagunas y canales intercalados.

- ✓ **Delta:** es un accidente geográfico formado en la desembocadura de un río por los sedimentos fluviales que ahí se depositan. Los depósitos de los deltas de los ríos más grandes se caracterizan por el hecho de que el río se divide en múltiples brazos que se van separando y volviendo a juntarse para formar un cúmulo de canales activos e inactivos.

Dentro de sistema de aguas profundas según Cervantes (1994) se incluyen los siguientes cuerpos de agua:

- ✓ **Laguna costera:** es una depresión de la zona costera, ubicada por debajo del promedio mayor de las mareas más altas, que tiene una comunicación permanente o efímera pero protegida de las fuerzas del mar por algún tipo de barrera, la cual puede ser arenosa o formada por islas de origen marino que, en general, son paralelas a la línea de costa. Son cuerpos de aguas someras y de salinidad variable.
- ✓ **Playa:** es un depósito de sedimentos no consolidados que varían entre arena y grava, excluyendo el fango ya que no es un plano aluvial o costa de manglar, que se extiende desde la base de la duna o el límite donde termina la vegetación hasta una profundidad por donde los sedimentos ya no se mueven. Esta profundidad varía entre playa y playa dependiendo de la batimetría, geomorfología y el oleaje. También se encuentran generalmente en bahías protegidas del oleaje y se suelen formar en zonas llanas.

2.3.3 Ecosistemas acuáticos marinos

Frecuentemente se consideran ecosistemas acuáticos marinos a todos aquellos localizados en el área de la plataforma continental y que no excedan los 6 metros de profundidad en marea baja.

Arrecifes: son estructuras monticulares formadas por la colonización y crecimiento de invertebrados sedentarios. Se caracterizan por su elevación con relación al sustrato que los rodea y su interferencia respecto al curso normal de las olas. Cervantes (op. cit).

Para poder identificar los tipos de ríos presentes en las imágenes de satélites es necesario conocer los patrones de drenaje que se pueden presentar en el medio geográfico.

2.4 Patrón de Drenaje

El patrón de drenaje de una cuenca puede definirse como el arreglo que presentan las vías de drenaje, permanentes y transitorias, que contribuyen a evacuar las aguas superficiales de la

cuenca. Es un elemento compuesto, para cuyo análisis es fundamental tener en cuenta el relieve, la distribución de la vegetación, y las condiciones estructurales de la zona.

Según Botero (1978) destaca que para los patrones de drenaje pueden presentarse dos tipos de control: uno litológico, debido a las condiciones estructurales de los materiales sobre los cuales se desarrolla el patrón; y otro topográfico, en el que la pendiente del terreno obliga a las corrientes a tomar una determinada dirección. Han sido agrupados en cuatro categorías por Way (1977), erosionales, deposicionales, especiales e individuales.

2.4.1 Patrones de Drenaje Erosionales

Son aquellos que, predominantemente, están causando procesos de erosión en la zona en la cual se presentan. A este grupo pertenecen los siguientes: dendrítico, pinnado, paralelo, subparalelo, radial, anular, trellis, rectangular y angular.

2.4.1.1 Dendrítico

Es el patrón que más frecuentemente se presenta, y se caracteriza por mostrar una ramificación arborescente en la que los tributarios se unen a la corriente principal formando ángulos agudos. Se desarrolla en suelos homogéneos, moderadamente permeables, con pendientes suaves y sin ningún tipo de control. Se presenta, con frecuencia, en zonas de rocas sedimentarias blandas, aluviones finos, tobas volcánicas, depósitos de till glacial (brecha consolidada o roca sedimentaria, cuyos materiales de partida se han formado por fenómenos glaciares), principalmente (Figura 6).

2.4.1.2 Pinnado

Corresponde a un drenaje dendrítico modificado que presenta una gran cantidad de tributarios cortos y poco espaciados, e indica un elevado contenido de limo en el suelo. Es típico de zonas planas o casi planas, con materiales muy homogéneos, friables y finos, eólicos o aluviales, como: loess (roca sedimentaria incoherente, de partículas muy finas), ceniza volcánica, till. Tampoco presenta controles (Figura 6).

2.4.1.3 Paralelo

Este patrón presenta los tributarios paralelos o casi paralelos entre sí. Tiene la característica que se puede presentar por influencia de control topográfico o estructural, siendo más común el topográfico, ya que es muy frecuente encontrarlo en zonas con fuertes pendientes (Figura 6).

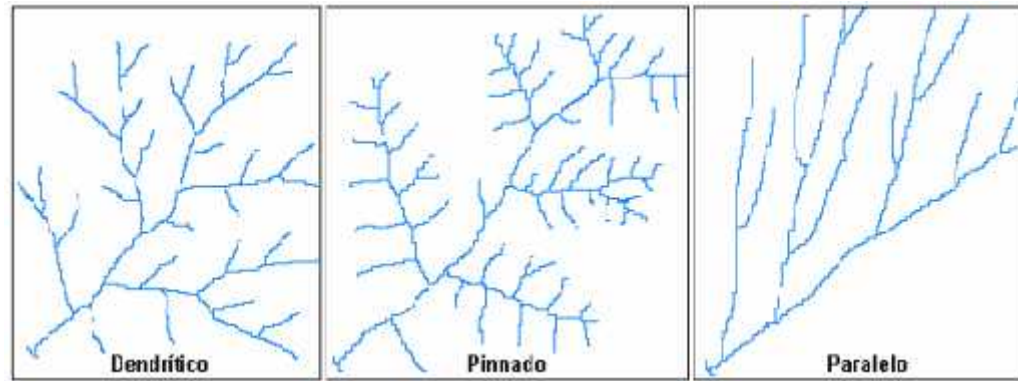


Figura 6. Patrones de drenaje erosionales. Fuente: Botero (1978).

2.4.1.4 Subparalelo

Es una variante del patrón paralelo y se desarrolla en zonas de alto relieve con pendientes escarpadas, y en algunos depósitos glaciares debido a su distribución, (ver Figura 7).

2.4.1.5 Colinear

Es una variante del patrón paralelo, aunque es escaso, puede presentarse en zonas de dunas longitudinales, complejos de orillares, y se caracteriza por tener corrientes paralelas simples, sin tributarios, que en algunos tramos son subsuperficiales, (ver Figura 7).

2.4.1.6 Rectangular

Es otra variante del drenaje dendrítico. Los tributarios suelen juntarse con las corrientes principales en ángulos casi rectos. Presenta un control estructural originado por diaclasas, foliaciones y/o fracturas en la roca. Cuanto más claro es el patrón rectangular, más fina será la cubierta del suelo. Suele desarrollarse sobre pizarras metamórficas, esquistos y gneis (roca metamórfica compuesta de cuarzo, feldespato y mica); en areniscas resistentes, si el clima es árido, o en areniscas de poco suelo, en climas húmedos (ver Figura 7).

2.4.1.7 Angular

Es una variante del patrón rectangular y aparece cuando las condiciones estructurales de la roca no se presentan formando ángulos rectos sino agudos, se pasa a tener un patrón angular, en el cual son frecuentes las curvas angulares agudas en las corrientes principales, (ver Figura 7).

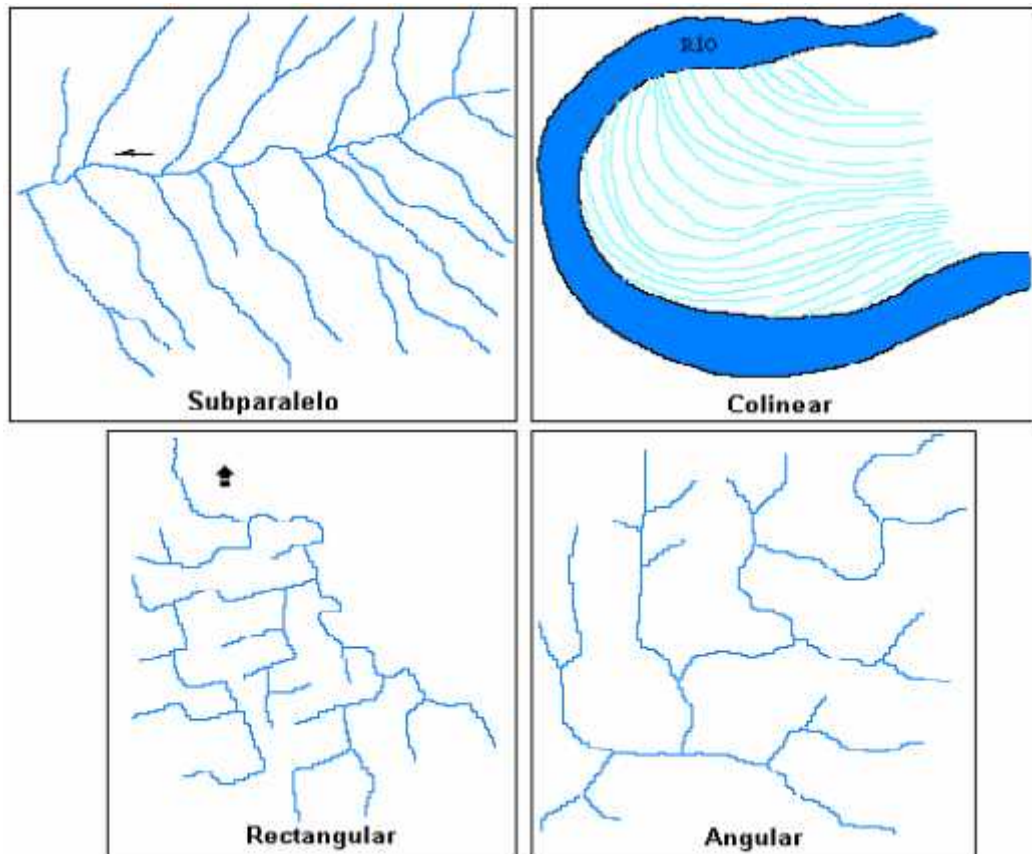


Figura 7. Patrones de drenaje erosionales. Fuente: Botero (1978).

2.4.1.5 Radial

La dirección de las corrientes es radial a un punto central, y según el sentido en que se desplazan esas corrientes, el patrón se denomina radial centrífugo o radial centrípeto (Figura 8).

El patrón de drenaje **radial centrífugo** (ver Figura 8) es una forma de drenaje que se caracteriza por una red circular con canales paralelos procedentes de un punto elevado. Suele existir cuando las corrientes van del punto central hacia fuera. Los volcanes y cerros aislados suelen presentar este tipo de drenaje.

El **radial centrípeto** (ver Figura 8) es una variante del sistema radial en la que el drenaje se dirige desde afuera hacia un punto central. Suele reflejar una depresión cerrada como dolinas (cavidad formada por disolución química de rocas calcáreas o por hundimiento de una masa superficial sobre una cavidad), cráteres, basines, etc., o en los sitios donde termina un anticlinal (pliegue de los estratos rocosos convexo) o un sinclinal (parte cóncava de un pliegue geológico) erosionado.

2.4.1.6 Anular

Este patrón de drenaje presenta un control estructural y se desarrolla principalmente en relieves semejantes a domos, compuestos de estratos sedimentarios de diferente resistencia a la erosión, dispuestos en forma concéntrica, los cuales orientan la dirección de las corrientes. Puede presentarse también en domos graníticos (Figura 8).

2.4.1.7 Trellis

Este patrón de drenaje presenta control estructural. Generalmente presenta todos los drenajes de la misma categoría, paralelos entre sí, y los tributarios primarios son cortos, que se juntan en ángulos rectos, en su gran mayoría. Refleja más la estructura de la roca madre que el tipo de roca, y usualmente indica rocas sedimentarias plegadas o intercaladas en las que las corrientes principales siguen las uniones de las capas (Figura 8).

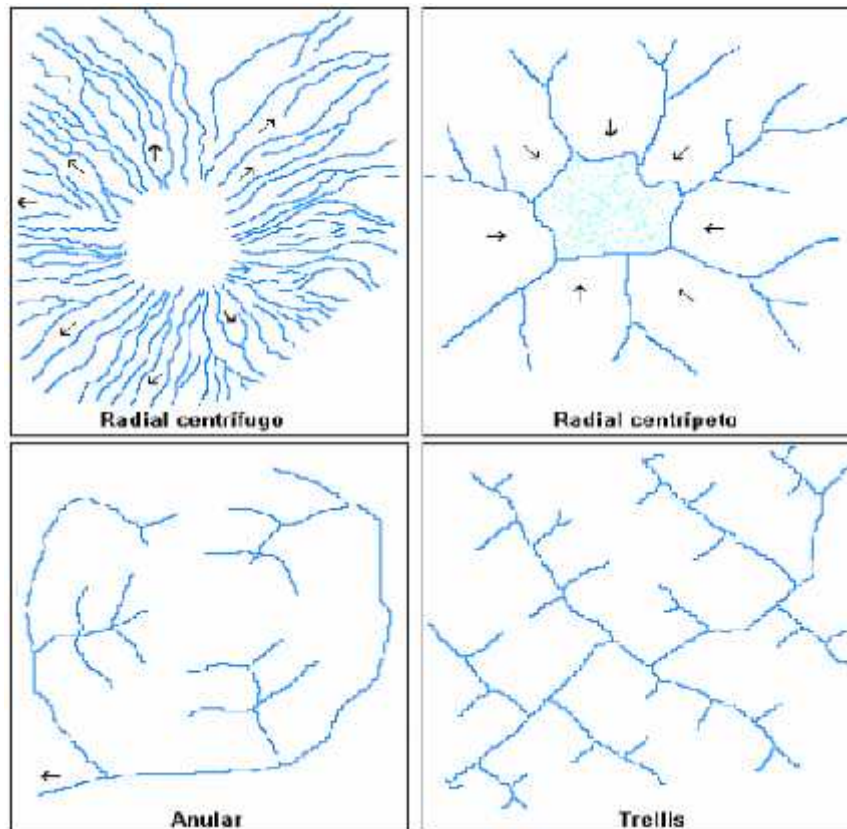


Figura 8. Patrones de drenaje erosionales. Fuente: Botero (1978).

2.4.2 Patrones de Drenaje Deposicionales

Los patrones de drenaje deposicionales son aquellos que se desarrollan en superficies donde los procesos dominantes son los sedimentarios. Los más comunes son: reticular y distributivo.

2.4.2.1 Reticular

Es un patrón que se forma generalmente en planicies costeras jóvenes, muy planas y que se asemeja a una red; se observa gran cantidad de canales interconectados y meandros con curvas rectangulares debidas a la influencia de las mareas. Además, las corrientes que llegan al mar amplían bastante su cauce, en las cercanías a él (Figura 9).

2.4.2.2 Distributivo

Es el patrón de drenaje que se forma típicamente en los abanicos aluviales jóvenes, en el que todas las vías de drenaje parecen salir del ápice del abanico, y dispersarse, en forma casi radial, sobre la superficie del mismo. También se observa en los deltas (Figura 9).

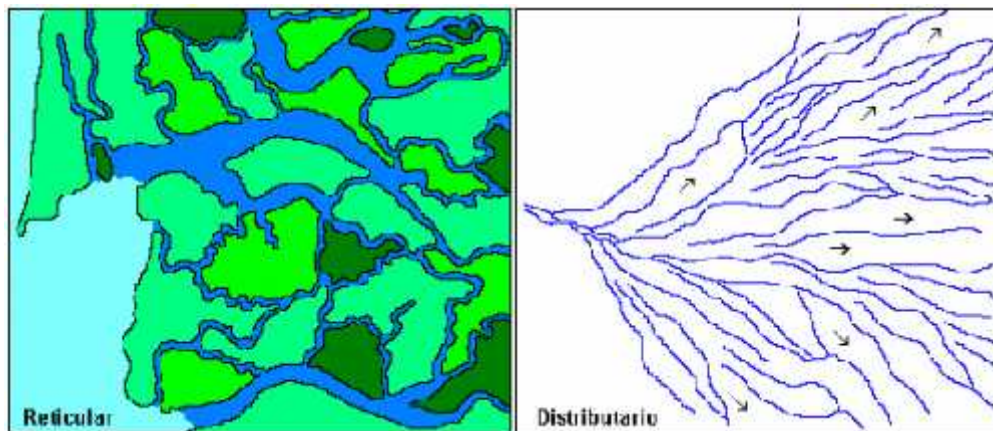


Figura 9. Patrones de drenaje deposicionales. Fuente: Botero (1978).

2.4.3 Patrones de Drenaje Especiales

Son aquellos que, por sus características tan particulares, no se pueden incluir en los otros grupos. Entre estos se tienen: el multibasinal y el artificial.

2.4.3.1 Multibasinal

Es un patrón en el cual abundan los sumideros, que pueden presentar agua o estar secos. Dependiendo del tipo de material sobre el cual se desarrolla este patrón de drenaje, se pueden presentar dos clases: el multibasinal no integrado y el multibasinal integrado (Figura 10).

El multibasinal no integrado se desarrolla en zonas con rocas solubles, los sumideros se presentan aislados y desconectados entre sí, debido a que el drenaje de esta zona se realiza en

forma subterránea; en este caso, los sumideros son los colectores del agua que cae en la superficie, los cuales la recogen y conducen hacia el interior de la formación rocosa, la cual se va disolviendo y formando cavernas y cauces subterráneos que movilizan los excesos de agua. Este patrón se da principalmente en calizas, yeso, sal gema; pero, además, puede desarrollarse en materiales insolubles porosos, en los que se presenta el fenómeno de sofusión que produce, en estos materiales, el mismo efecto mencionado para los materiales solubles.

El multibasinal integrado (ver Figura 10) se desarrolla en zonas que estuvieron sometidas a procesos glaciares, en las cuales quedan gran cantidad de cuerpos de agua como lagos y lagunas, que dan una apariencia similar a la producida en el caso anterior; la diferencia de este con aquel, es que, en estas zonas glaciares los cuerpos de agua están conectados entre sí por medio de pequeños arroyos, lo cual hace que este patrón sea integrado y superficial, a diferencia del otro que no lo es.

2.4.3.2 Artificial

Cobija todas las obras que realiza el hombre para evacuar los excesos de agua de zonas mal drenadas. No se debe confundir con las acequias de riego en zonas áridas o semiáridas (Figura 10).

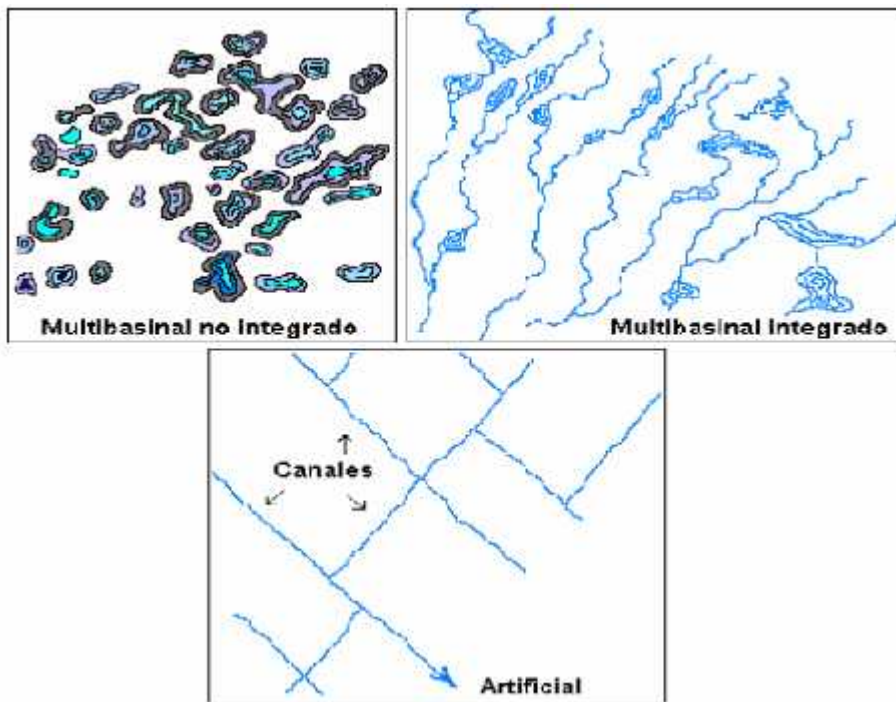


Figura 10. Patrones de drenaje especiales. Fuente: Botero (1978).

2.4.4 Patrones de Corrientes Individuales

Teniendo en cuenta que de la dinámica de las corrientes individuales se derivan algunos fenómenos geomorfológicos importantes, en las corrientes de agua principales es necesario hacer un análisis para tratar de determinar aquellos procesos y sus efectos en la zona estudiada. De acuerdo con la forma de su alineamiento en planta, los cauces naturales pueden clasificarse en: rectos, meándricos y cauces trenzados.

2.4.4.1 Cauces Rectos

Son tramos del cauce que discurren en línea casi recta y que pueden estar asociados con problemas de fallas que lo están controlando. Este tipo de canales no son frecuentes en la naturaleza. También se presenta este tipo de cauces en ríos canalizados y, en este caso, no hay relación entre el cauce y algún fenómeno geológico (Figura 11).

2.4.4.2 Cauces Meándricos

Este tipo de cauces es indicativo, según Strahler (1979), de ríos que están en su etapa de madurez, caracterizados por poseer valles amplios y planos, en los cuales el cauce se desplaza formando lazos u ondulaciones más o menos regulares, que aumentan grandemente su longitud, con respecto a la longitud que presenta el valle. Según Linsley, et al., (1977), la longitud media de los canales con meandros, parece ser, aproximadamente, igual a 1,5 veces la longitud del valle, esta medida recibe el nombre de sinuosidad del canal; la longitud de onda de los meandros varía entre 7 y 11 veces el ancho del cauce, y el radio de curvatura de los mismos varía generalmente entre dos y tres veces el ancho del canal; la amplitud de las curvas, o el ancho del cinturón de meandros, varía considerablemente, y parece que está controlada, principalmente, por el material de las bancas del río, generalmente varía entre 10 y 20 veces el ancho del cauce. En las llanuras de estos ríos se presenta una situación intermedia entre los procesos de erosión lateral en las partes externas de las curvas de los meandros (lado cóncavo), y sedimentación en sus partes internas (lado convexo), en las cuales se forman los complejos de orillares. Los meandros se pueden explicar como una forma de disipar energía (Figura 11).

2.4.4.2 Cauces Trenzados

Los cauces trenzados, llamados también por Strahler (1979) anastomosados o anastomóticos, evidencian un aporte de sedimentos a las corrientes, mayor del que ellas pueden transportar; por esto se observa que los 83 depósitos de material dentro del cauce del río son bastante considerables, obligando a las corrientes a dividirse en una serie de canales interconectados

(brazos), y separados por islas, con lo cual van adquiriendo una apariencia de trenza. Los canales trenzados tienden a ser muy anchos y relativamente poco profundos, con materiales gruesos en el fondo y bien gradado. Los canales trenzados se encuentran generalmente en sitios donde las bancas son fácilmente erosionables (materiales arenosos con poco recubrimiento vegetal). La pendiente de estos canales es mayor que la de los tramos adyacentes del río que no son trenzados. De esta manera, el cauce trenzado es una forma de disipar energía cuando la pendiente del río se hace más fuerte, evitando así aumentos en la velocidad del flujo, que podrían producir erosión (Figura 11).

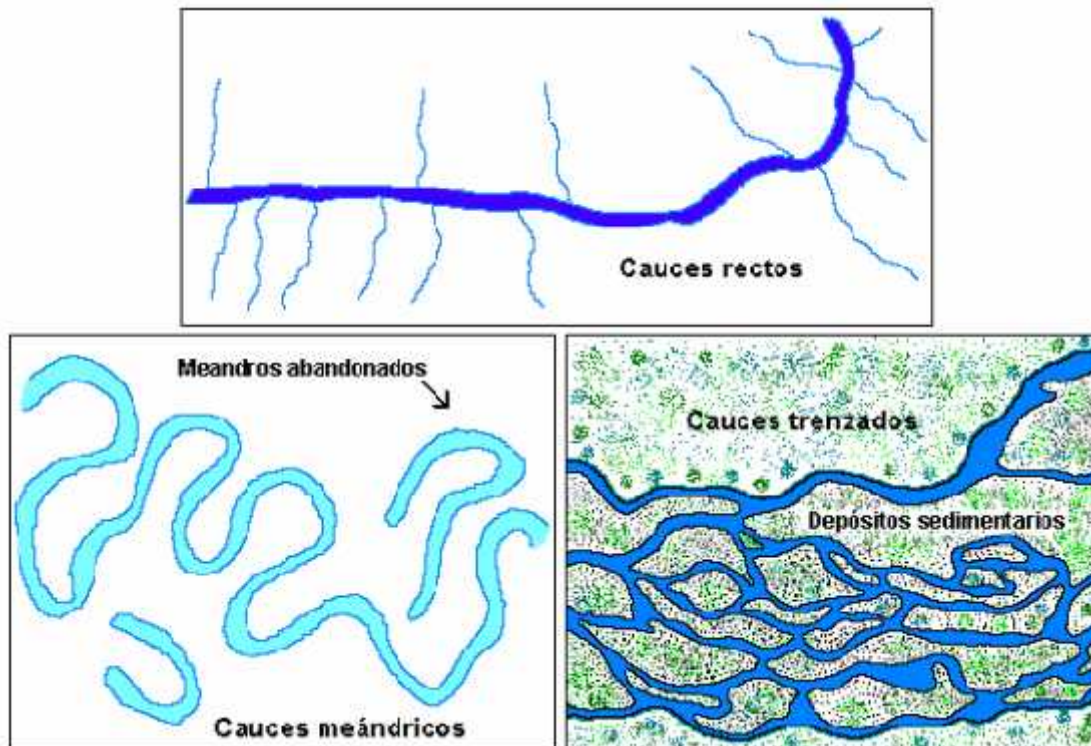


Figura 11. Patrones de drenaje individuales. Fuente: Botero (1978).

En el marco de la investigación se programaron todos los patrones de drenaje con el objetivo de incrementar las posibilidades de detección de aquellos patrones presentes en las imágenes de satélites.

2.5 Caracterización de las imágenes de satélites

En la investigación se utilizan dos imágenes de satélites que abarcan la cobertura de la provincia Mayabeque, capturadas desde un sensor remoto Landsat-7 en el año 2010.

Según Chuvieco (2010), este sensor captura 7 bandas electromagnéticas con una resolución espacial de 30m de las bandas 1-5, 7 y la banda 6 de 120m las cuales se describen a continuación.

- ✓ El Espectro visible (0,4 a 0,7, μm). Se denomina así por tratarse de la única radiación electromagnética que pueden percibir nuestros ojos, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Dentro de esta región suelen distinguirse tres bandas: Banda 1 (0,45-0,52 μm), Banda 2 (0,52- 0,60 μm), Banda 3 (0,63 - 0,69 μm).
- ✓ El Infrarrojo cercano (IRC, 0,7-1,3, μm). También se denomina infrarrojo próximo, reflejado o fotográfico, puesto que parte de él puede detectarse a partir de películas dotadas de emulsiones especiales. Resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad. Dentro de esta región suele distinguirse la Banda 4 (0,76 – 0,90 μm).
- ✓ Infrarrojo medio (1,3 a 8, μm). En esta región se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. La Banda 5 se sitúa entre 1,55 - 1,75 μm , y se denomina infrarrojo de onda corta (Short Wave Infrared, SWIR), que resulta idónea para estimar el contenido de humedad en la vegetación o los suelos. La Banda 7, comprendida principalmente en torno a 2,08- 2,35 μm , se conoce propiamente como infrarrojo medio (IRM), siendo determinante para la detección de focos de alta temperatura (incendios o volcanes activos).
- ✓ Infrarrojo lejano o térmico (IRT, 8 a 14, μm), que incluye la porción emisiva del espectro terrestre en la Banda 6 de 10,40 – 12,50 μm , en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.

Las dos imágenes que se utilizarán son las siguientes:

Imagen 1: Fragmento de la imagen Landsat 7-TM, que aparece en la Figura 12.

Dimensión: 7192 x 3639 x 6 [BIP]

Tamaño: [Byte] 162,525 398 bytes.

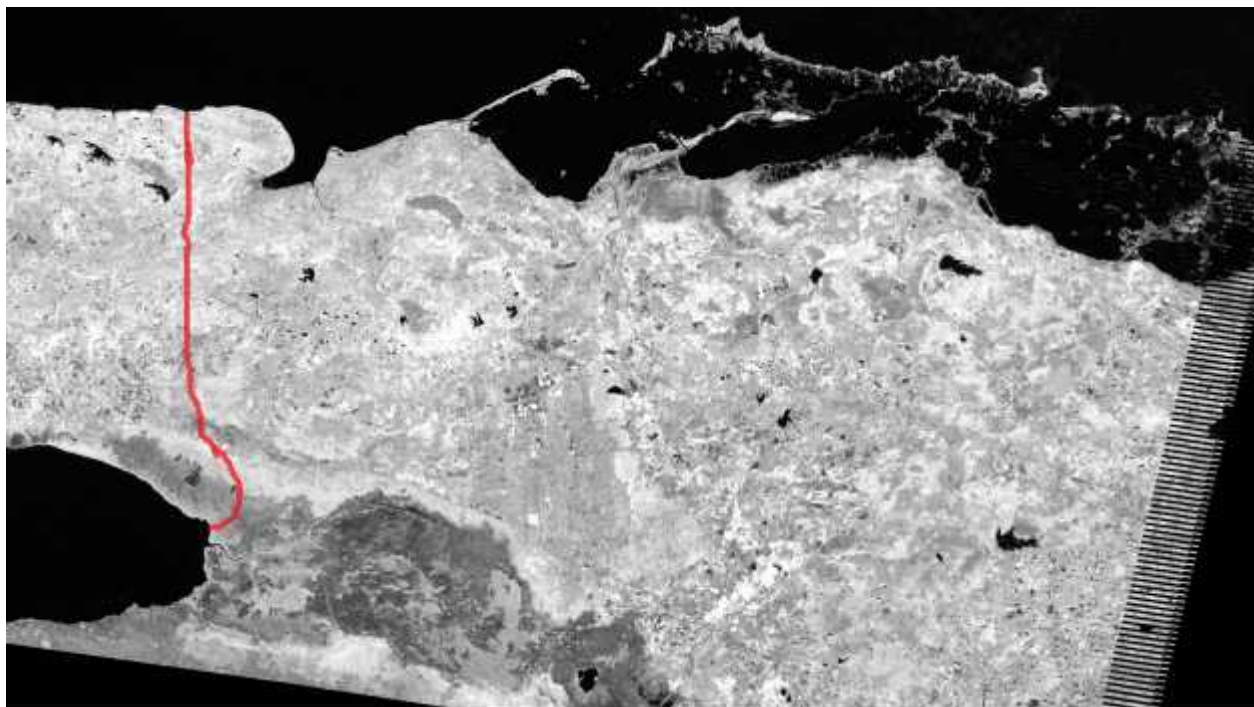


Figura 12. Fragmento de la imagen Landsat 7-TM, banda 4, mostrando la parte derecha de la provincia Mayabeque incorporada al proceso mediante el software ENVI. Fuente: Cortesía de Geocuba-IC.

Imagen 2: Fragmento de la imagen Landsat 7-T, que aparece en la Figura 13.

Dimensión: 7703 x 3688 x 6 [BIP]

Tamaño: [Byte] 173,930 517 bytes.



Figura 13. Fragmento de la imagen Landsat 7-TM, banda 4, mostrando la parte izquierda de la provincia Mayabeque incorporada al proceso mediante el software ENVI. Fuente: Cortesía de Geocuba-IC.

2.6 Conclusiones Parciales

Luego de caracterizar las tecnologías, métodos y herramientas necesarias para sustentar la investigación se arriba a las siguientes conclusiones:

- 1) Se definieron los métodos teóricos y matemáticos-estadísticos que apoyan el desarrollo de la investigación.
- 2) Se definió *Java* como lenguaje de programación de conjunto al Entorno de Desarrollo Integrado (EDI) Netbeans, el cual es compatible con la librería OpenCV que se usó para el diseño de la aplicación en la identificación de las relaciones espaciales entre los objetos hidrológicos y las coberturas terrestres.
- 3) Se definió la herramienta PostgreSQL para almacenar las relaciones espaciales que se fueron generando para su posterior procesamiento.
- 4) Se elaboró la taxonomía hidrológica para identificar los tipos de objetos hidrológicos presentes en el contexto de las imágenes de satélites.
- 5) Se programaron todos los patrones de drenaje con el objetivo de incrementar las posibilidades de detección de distintos patrones presentes en las imágenes de satélites.

CAPÍTULO 3: MÉTODO PARA IDENTIFICAR LAS RELACIONES ESPACIALES ENTRE OBJETOS HIDROLÓGICOS Y COBERTURAS TERRESTRES EN IMÁGENES DE SATÉLITES.

3.0 Introducción

En este capítulo se describe detalladamente el método para identificar las relaciones espaciales entre objetos hidrológicos y coberturas terrestres en imágenes de satélites. Internacionalmente se está trabajando en el desarrollo y perfeccionamiento de estos métodos en bases de datos geográficos. En Cuba, el Método GVC-RAE propuesto por Rossete (2013) se basó en extraer asociaciones espaciales en base de datos geográficas, no desarrollándose aplicaciones con imágenes de satélites, de aquí la novedad e importancia del tema de investigación. El método propuesto tendrá como objetivo identificar relaciones espaciales entre objetos hidrológicos y las coberturas terrestres en imágenes de satélite mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes, conjuntamente con la visualización cartográfica y traducción a un lenguaje común de las relaciones que se generen, facilitando el proceso de interpretación de los resultados y la toma de decisiones. Los elementos característicos del método, y cómo se implementó, se describen en los acápites siguientes.

3.1 Definición de las entidades principales

Imagen satelital: es la imagen que será procesada, con el propósito de localizar los patrones hidrológicos con su descripción correspondiente y las relaciones espaciales que permitan su identificación basados en criterios de identidad con los objetos circundantes.

Patrón de drenaje: es la representación espacial de los objetos hidrológicos de una cuenca o subcuenca hidrográfica, tratados como imagen en formato raster.

Taxonomía hidrológica: son los objetos hidrológicos organizados en forma jerárquica por medio de taxones o nodos.

Objetos hidrológicos: son los objetos presentes en las imágenes de satélites que van a estar contenidos en la taxonomía hidrológica.

Algoritmo de procesamiento de imagen: algoritmo de OpenCV que se utilizará para procesar la imagen, devolviendo una lista con los patrones característicos de los objetos hidrológicos encontrados.

Base de conocimiento: es el conjunto de conocimiento precedente que contiene la información previa necesaria para el funcionamiento del algoritmo de procesamiento digital de imagen.

Lista de patrones: es la lista que devuelve el algoritmo de procesamiento de imagen, conteniendo los patrones detectados con sus coordenadas para visualizarlos en la imagen.

3.2 Método propuesto para identificar relaciones espaciales entre objetos hidrológicos y coberturas terrestres en imágenes de satélites y su descripción

El método propuesto denominado REIS (Relaciones Espaciales en Imágenes de Satélites), se representa en la Figura 14. El mismo consta de 5 etapas que abarcan desde la preparación de los datos hasta la interpretación de las relaciones obtenidas.

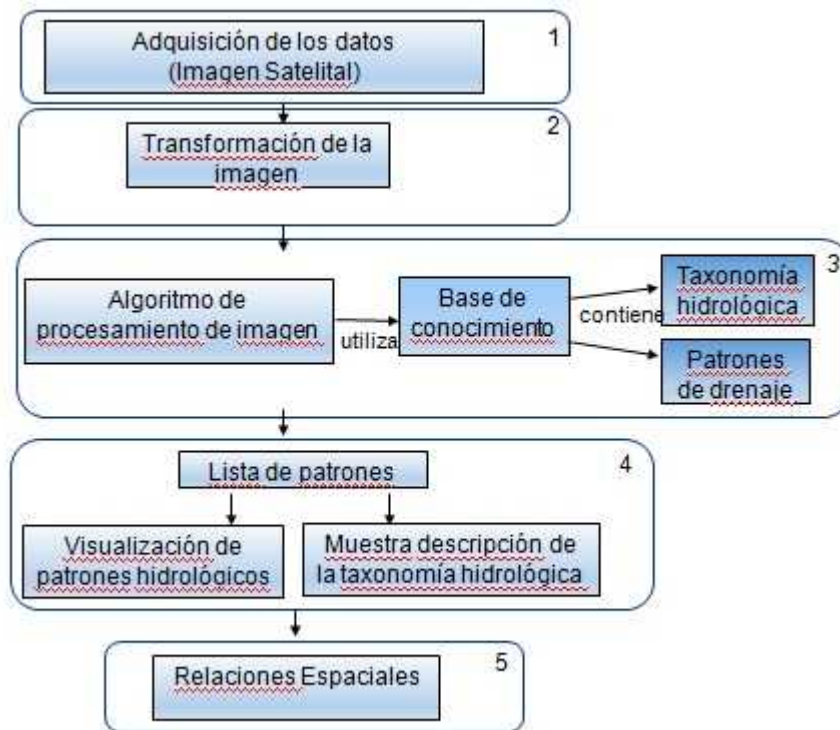


Figura 14. Método REIS para identificar relaciones espaciales entre objetos hidrológicos y coberturas terrestres en imágenes de satélites. Fuente: Elaboración propia del autor.

Para la realización del método se definieron las siguientes etapas:

Etapas

1. Adquisición de los datos (Imagen Satelital).
2. Transformación.
3. Procesamiento de imagen.
4. Descripción y visualización
5. Relaciones espaciales.

A continuación se describen cada una de las etapas y los requisitos funcionales que deben cumplir.

3.2.1 Etapa 1. Adquisición de los datos

Las imágenes de satélites constituyen el núcleo central del método propuesto. Producto de la diversidad de formatos de ficheros para almacenarlas, se hace necesario realizar un análisis previo de los mismos, encaminado a migrarlos hacia el software de trabajo para la identificación de las relaciones espaciales.

Dentro de los formatos existentes para almacenar las imágenes de satélites se pueden encontrar varios en dependencia del sensor remoto que se utilice, por ejemplo: TIFF, NITF, etc., por lo que, primeramente debemos cargar la imagen de satélite en un software de procesamiento digital de imágenes apropiado y convertirla a JPEG, PNG o TIFF que son los formatos que soporta el software “Reconocimiento de Patrones Hidrológicos” para establecer las relaciones espaciales.

Requisitos funcionales que deben cumplir la etapa 1.

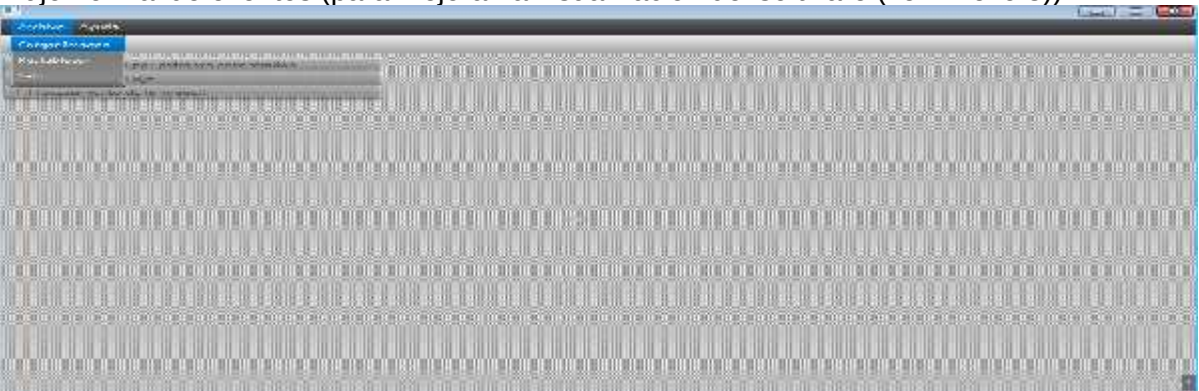
1. Cargar imagen de satélite.

1.1 Buscar imagen

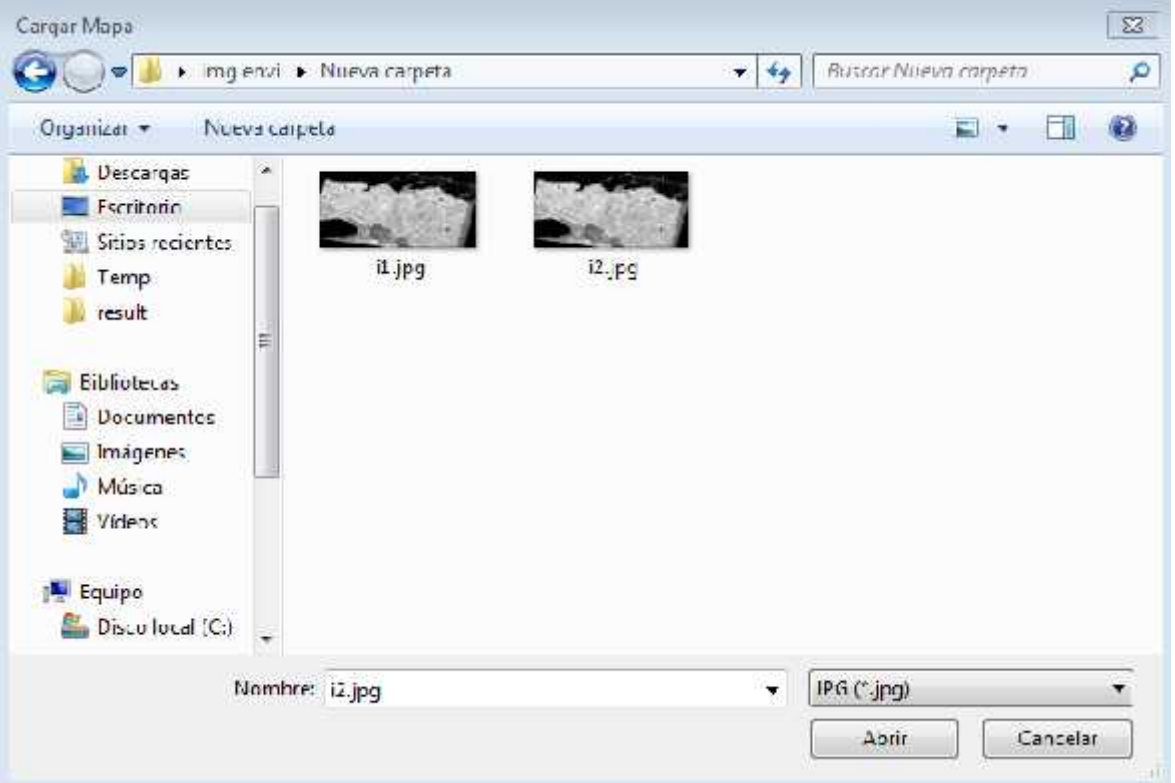
Tabla 2. Descripción del caso de uso: Cargar Imagen.

Nombre del caso de uso	Cargar imagen de satélite
Actores	Usuario
Descripción	El caso de uso se inicia cuando el usuario desea cargar una imagen satelital para procesarla.
Referencias	R1.1(inclusión)
Precondiciones	El usuario ha accedido al sistema.

Flujo normal de eventos (para mejorar la visualización del software (ver Anexo 3))



Acción del actor	Respuesta del sistema
1. El usuario solicita cargar imagen satelital.	1.1 El sistema muestra al usuario una interfaz con la opción “Cargar Imagen”.
2. El usuario selecciona la opción Cargar Imagen.	2.1 El sistema muestra una interfaz para buscar la imagen (R1.1).

Sección Buscar Imagen	El caso de uso se inicia cuando el usuario desea buscar la imagen satelital para cargarla.
Flujo normal de eventos	
	
3. El usuario solicita buscar la imagen satelital.	3.1 El sistema de relaciones espaciales muestra al usuario una interfaz con un explorador.
4. El usuario selecciona la imagen que va a cargar y selecciona la opción Abrir.	4.1 El sistema redimensiona la imagen en proporción con la dimensión de los patrones hidrológicos.
	4.2 El sistema divide la imagen en nueve regiones para facilitar su procesamiento.
	4.3 El sistema copia cada una de las nueve regiones en la carpeta map ubicada en la localización del software Reconocimiento de Patrones Hidrológicos.
	4.4 El sistema redimensiona y muestra la imagen en el visor de la aplicación.
Cursos alternos	
5. El usuario selecciona la opción Cancelar.	5.1 El sistema cierra la interfaz.

3.2.2 Etapa 2. Transformación

El sistema cuenta con un usuario, el cual una vez que la aplicación se inicia, carga una imagen satelital, la cual se redimensiona para establecer una proporción correcta con las dimensiones de los patrones de drenaje y la imagen satelital. Para facilitar su procesamiento, la misma se divide en nueve subimágenes que son copiadas en la carpeta “map” del sistema (ver figura 15).

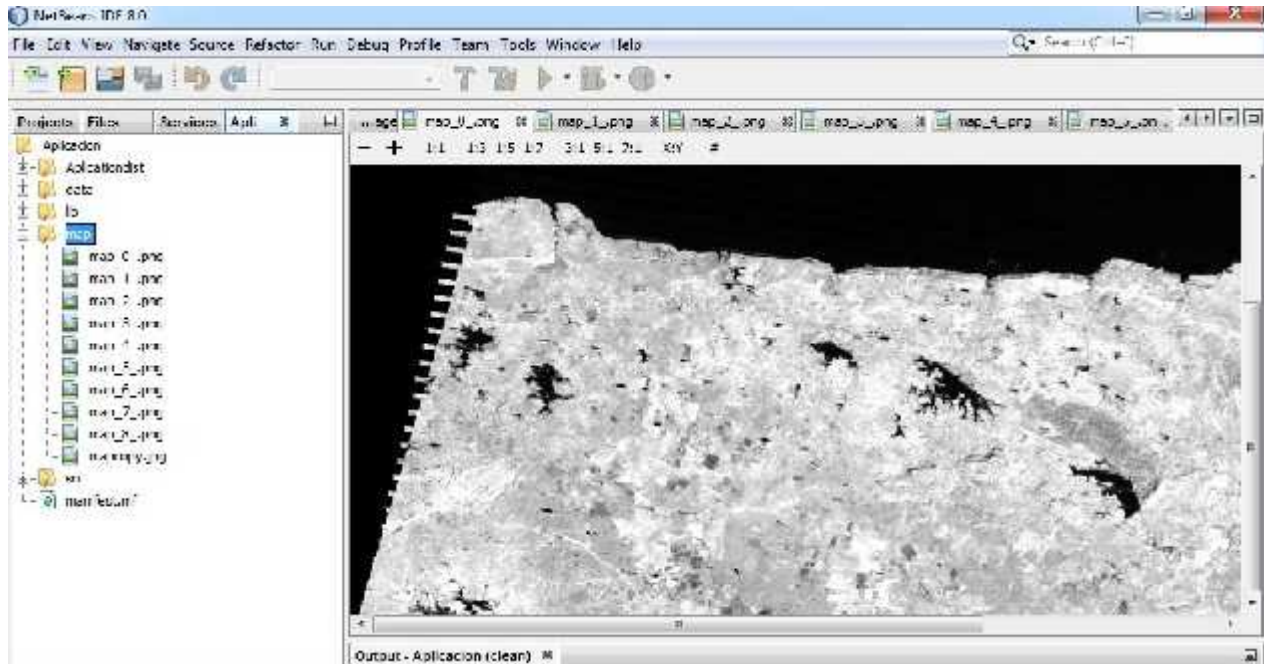


Figura 15. Carpeta map del software REPAH. Fuente: Elaboración propia.

En la parte izquierda de la Figura 15 se muestra los botones de la aplicación donde aparece la carpeta “map” con las 9 subimágenes en que está dividida la imagen original ej. map_0.png es el primer rectángulo de la matriz de 3x3 que se estableció para mejorar el procesamiento de la imagen debido a la proporción con la dimensión de los patrones hidrológicos.

Posteriormente el usuario ejecuta el procesamiento de cada una de las nueve subimágenes, al tiempo que el sistema busca todos los patrones existentes utilizando funciones de OpenCV, como se describen en la etapa siguiente.

3.2.3 Etapa 3. Procesamiento de imagen

Para poder detectar los patrones hidrológicos en una imagen satelital el sistema cuenta con un conjunto de datos previos que se utilizarán como regla de comparación y descripción. Para ello el sistema contiene un árbol taxonómico almacenado en una base de datos, a través del cual se pueden describir los diferentes objetos hidrológicos presentes en el medio geográfico con un

código correspondiente a cada uno. Este árbol será cargado en la memoria del sistema de relaciones espaciales.

El propósito de diseñar una base de datos, es almacenar los datos relevantes para la aplicación, en este caso es necesario incorporar a la misma la taxonomía hidrológica diseñada mostrada en el Anexo 2. Esta base de datos completa es utilizada por el software “REPAH” como criterio de búsqueda a la hora de extraer las relaciones espaciales. Para ello, en cada nodo o taxón de la misma contiene un código a través del cual se buscan los nodos de interés de la misma tipología y también una descripción de las coberturas terrestres a tener en cuenta a la hora de descubrir las relaciones espaciales entre ellas y los objetos hidrológicos como se muestra en un detalle ampliado en la Figura 16. Donde solamente se muestran las tablas del “objeto hidrológico río” con el “patrón de drenaje deposicional” en específico el “reticular” así como los atributos correspondientes a cada una de ellos. El esquema del taxón “humedal” que contiene los nodos representados anteriormente se muestran en la Figura 17.

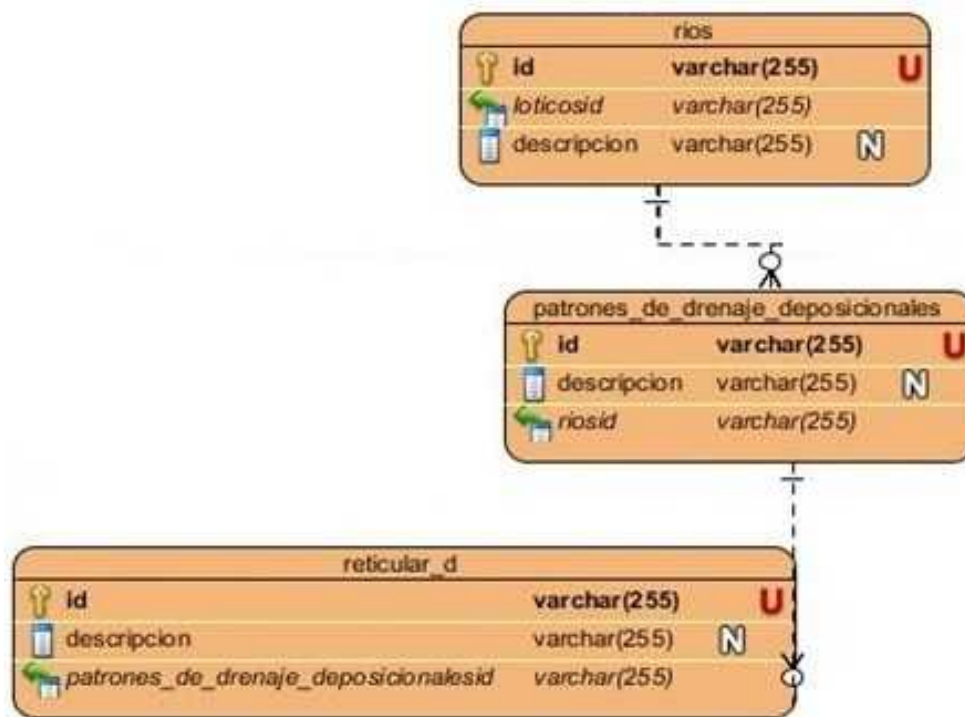


Figura 16. Detalle ampliado de los nodos de los taxones ríos y patrón de drenaje deposicionales (reticular) con los atributos correspondientes a cada uno. Fuente: Elaboración propia.

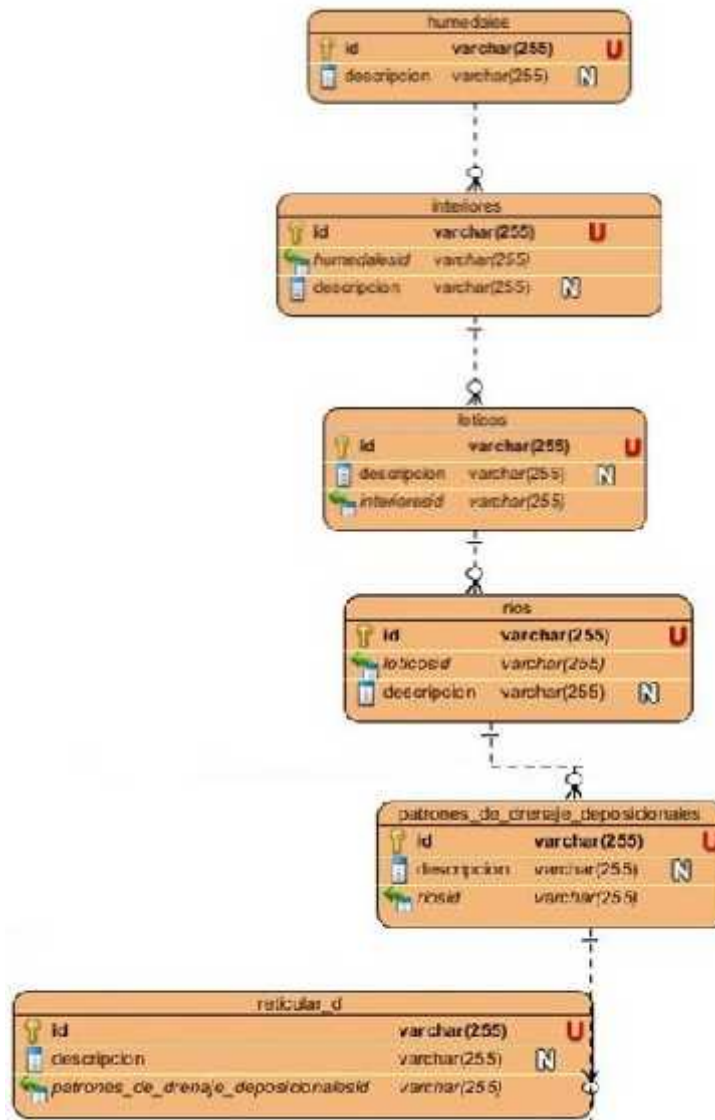


Figura 17. Fragmento del taxón humedal almacenado en una Base de Datos. Fuente: Elaboración propia.

También es necesario contar con un conjunto de patrones hidrológicos en formato raster almacenados en el proyecto, como los descritos en la taxonomía empleada, el nombre de cada uno de los cuales, brinda información referente al código correspondiente con la tabla que lo describe en la Base de Datos. A modo de ejemplo se muestra uno de los patrones utilizados en la Figura 18.

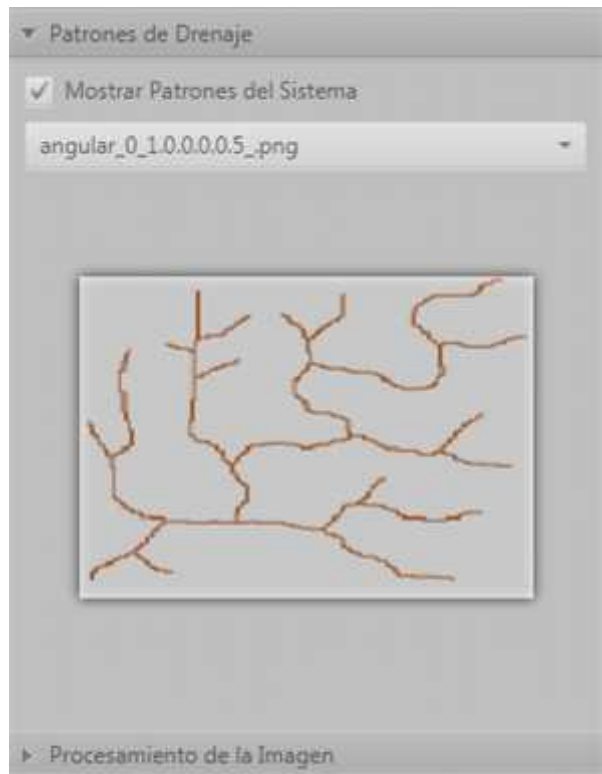


Figura 18. Patrón de drenaje Angular y código. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente el usuario ejecuta el procesamiento de cada una de las nueve imágenes, el sistema busca todos los patrones existentes utilizando funciones de OpenCV, cuyo algoritmo se muestra en el pseudocódigo diseñado a tales efectos.

3.2.3.1 Pseudocódigo del algoritmo de procesamiento de imagen

Este pseudocódigo es el empleado en el software *RePaH* con ayuda de las funcionalidades de la librería OpenCV y se compone de los siguientes elementos:

Entradas: ruta de la imagen, ruta de la plantilla, patrón, método de comparación.

Salida: imagen procesada. Comprende las acciones siguientes:

- Cargar la imagen de entrada y la imagen del patrón.
- Compara el patrón con regiones de la imagen traslapadas utilizando el método CV_TM_SQDIFF.
- Normaliza la salida obtenida en la comparación.

-Localiza el patrón en la imagen basándose en una alta probabilidad de coincidencia (Método MinMaxLoc).

-Devuelve la lista de patrones de mayor coincidencia en la imagen.

-Dibuja rectángulos alrededor de las áreas correspondientes a la mayor coincidencia de patrones.

3.2.3.2 Descripción del algoritmo de procesamiento de imagen

Como se muestra en el pseudocódigo, el algoritmo recibe como entradas la imagen satelital (ver descripción del algoritmo en la tabla 3), la imagen del patrón que va a ser buscado, un tipo de comparación llamado TM_SQDIFF y un objeto patrón donde se almacenará la lista de coordenadas encontradas por el algoritmo, luego se crea una matriz resultante que pasará por varias transformaciones (ver descripción del caso de uso “Procesar imagen satelital” en la tabla 3).

Primeramente se aplica un método de comparación que recibe como parámetro de entrada la imagen satelital, la imagen del patrón, la matriz resultante donde se almacenará el resultado de la comparación y el tipo de comparación especificado. En la medida que la operación se acerca al punto de comparación óptima, al finalizar el método, los valores en la matriz resultante se acercan cada vez más a cero, lo que indica que existe una alta probabilidad de coincidencia con el patrón que se está buscando en la imagen.

Posteriormente a la matriz resultante de la comparación se le aplica un método de normalización que recibe como parámetros de entradas la matriz que será normalizada, la matriz donde se almacenará el resultado de la normalización, un método de normalización que en este caso será NORM_MINMAX, un valor alfa que será el valor de norma inferior, y un valor beta que será el valor de norma superior. Con el tipo de normalización NORM_MINMAX, el método ajusta cada valor de la matriz de entrada entre alfa y beta, almacenando este resultado en la matriz resultante.

Una vez normalizada la matriz, se está en condiciones de aplicar el método de búsqueda MinMaxLoc que recibe como parámetro de entrada la matriz resultante de la normalización y devuelve el punto de máxima probabilidad que será el mínimo local, un valor máximo y un mínimo, alcanzándose el mejor resultado cuando el máximo es un valor muy cercano a uno y el mínimo es muy cercano a cero. Como este método de búsqueda devuelve el punto más óptimo de coincidencia del patrón que se busca y su posición en la imagen, para garantizar que

encuentre varios puntos, es necesario repetir el método cada cierta cantidad de columnas o iteraciones definidas en el sistema.

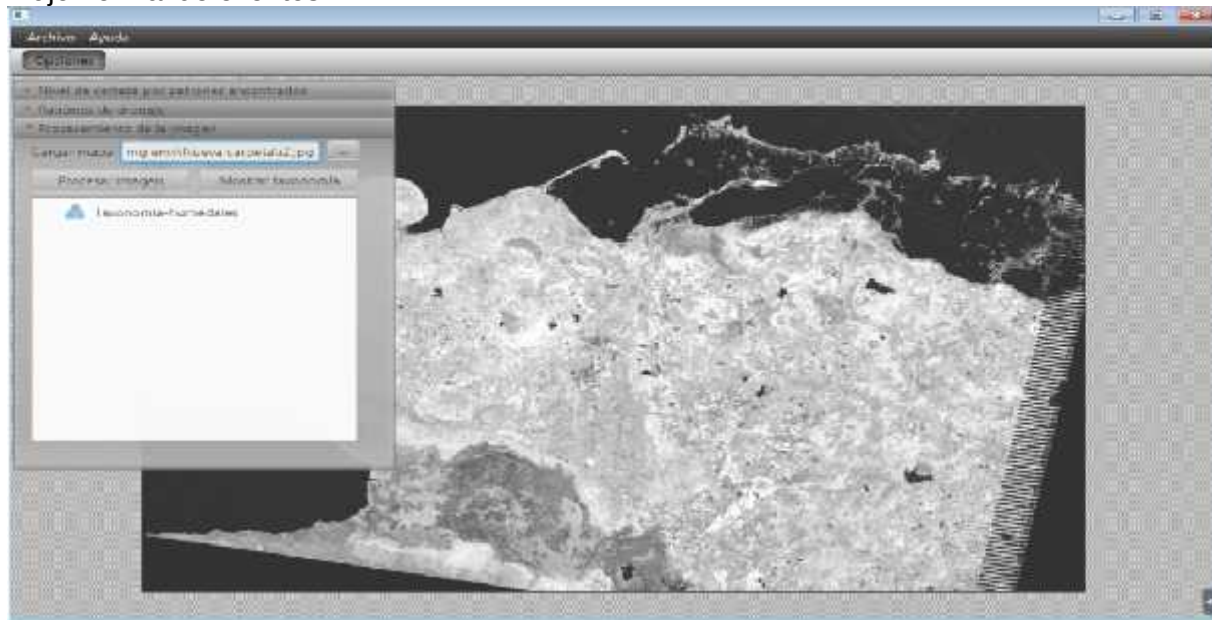
Requisito funcional que debe cumplir la etapa 3.

2. Procesar imagen satelital.

Tabla 3. Descripción del caso de uso Procesar imagen satelital.

Nombre del caso de uso	Procesar imagen satelital
Actores	Usuario
Descripción	El caso de uso se inicia cuando el usuario desea procesar la imagen satelital.
Referencias	
Precondiciones	El usuario ha accedido al sistema y cargado la imagen satelital.

Flujo normal de eventos



Acción del actor	Respuesta del sistema
1. El usuario solicita procesar la imagen satelital.	1.1 El sistema muestra al usuario una interfaz donde se muestra la opción “Procesar imagen”.
2. El usuario selecciona la opción Procesar imagen.	2.1 El sistema procesa cada una de las imágenes contenidas en la carpeta map.
	2.2 El sistema obtiene una lista de los patrones encontrados con sus respectivas coordenadas pertenecientes a cada una de las nueve regiones de la imagen.

Cursos alternos	
3. El usuario selecciona la opción Procesar Imagen sin cargar la imagen satelital.	3.1 El sistema no realiza ninguna acción.

3.2.4 Etapa 4. Descripción y visualización

Al finalizar el procesamiento de la imagen se tiene una lista con los patrones encontrados y sus respectivas posiciones (ver tabla 4). Si el usuario desea ver la taxonomía hidrológica (ver tabla 5), el sistema utiliza el código de estos patrones para realizar una búsqueda en el árbol y de esta manera mostrar la taxonomía correspondiente para cada patrón, apareciendo en cada nodo una descripción de los mismos. También el usuario podrá visualizar los patrones encontrados en el mapa.

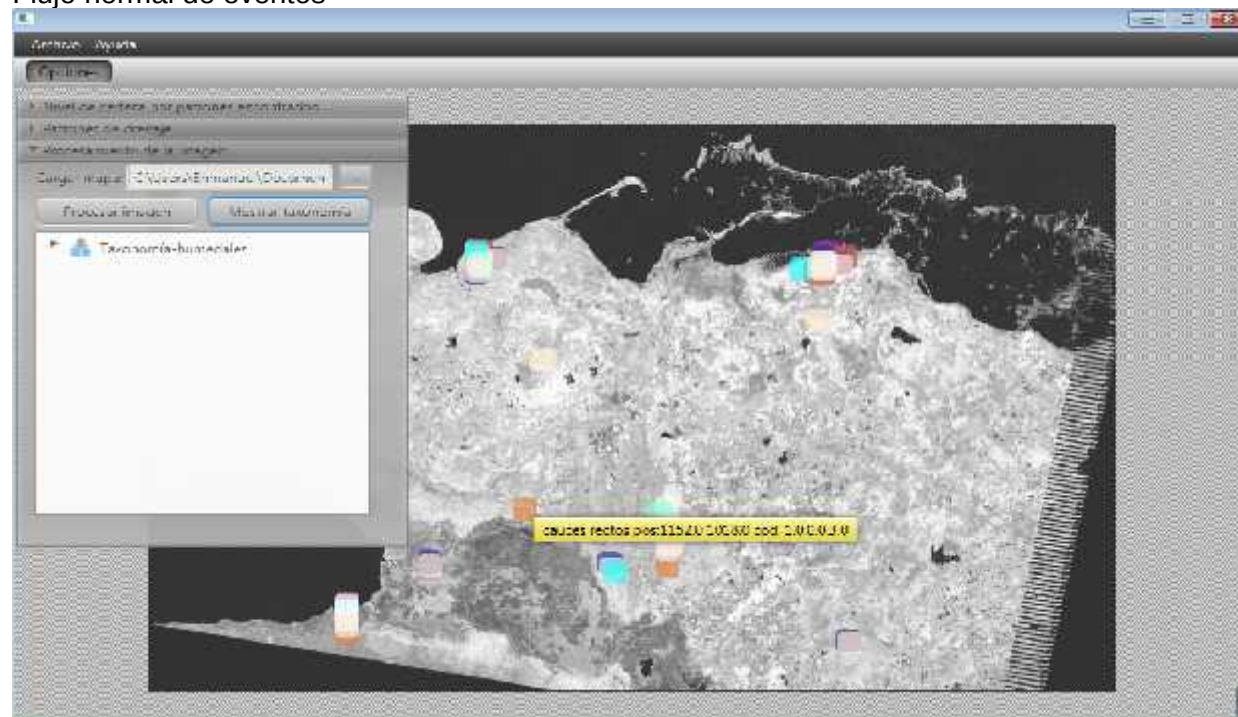
Requisitos Funcionales que deben cumplir la etapa 4.

1. Visualizar los patrones encontrados.
2. Mostrar taxonomía hidrológica.

Tabla 4. Descripción del caso de uso Visualizar los patrones encontrados.

Nombre del caso de uso	Visualizar los patrones encontrados
Actores	Usuario
Descripción	El caso de uso se inicia cuando el usuario desea observar los patrones de los objetos hidrológicos encontrados en el mapa.
Referencias	
Precondiciones	El usuario ha accedido al sistema y procesado la imagen satelital.

Flujo normal de eventos

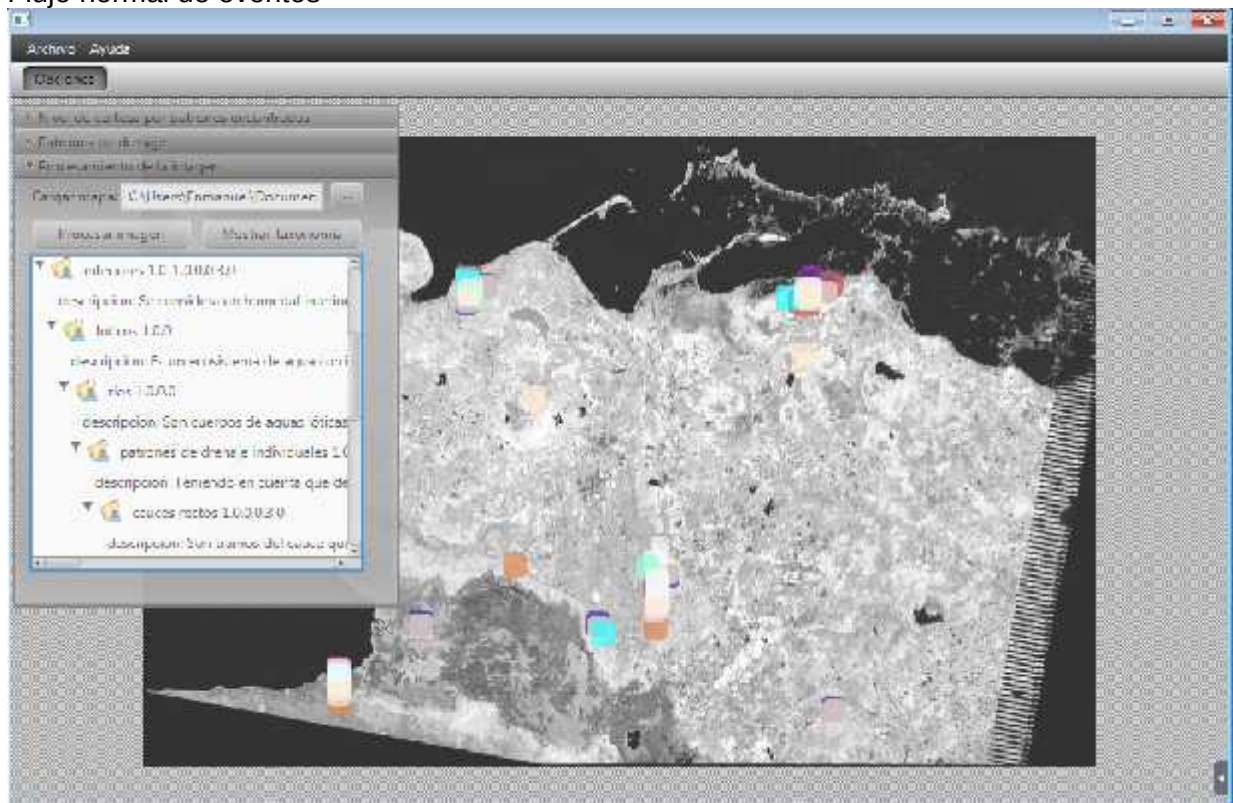


Acción del actor	Respuesta del sistema
1. El usuario desea observar los patrones encontrados en el mapa.	1.1 El sistema muestra al usuario una interfaz con la opción Mostrar Taxonomía.
	1.2 El sistema toma la lista obtenida del procesamiento de la imagen y realiza una conversión de coordenadas al visualizador de la aplicación dependiendo de la región donde se detectó cada patrón.
	1.3 El sistema le asigna un color específico a cada conjunto de patrones de un mismo tipo.
2. El usuario selecciona la opción Mostrar taxonomía.	2.1 El sistema muestra los patrones sobre la imagen del visor utilizando su coordenada correspondiente.
Cursos alternos	
3. El usuario selecciona la opción Mostrar taxonomía sin procesar la imagen satelital.	3.1 El sistema no realiza ninguna acción.

Tabla 5. Descripción del caso de uso Mostrar Taxonomía.

Nombre del caso de uso	Mostrar taxonomía hidrológica.
Actores	Usuario
Descripción	El caso de uso se inicia cuando el usuario desea observar la taxonomía hidrológica de acuerdo a los patrones encontrados, mostrándose las descripciones de los patrones en relación con el medio ambiente que los rodea.
Referencias	
Precondiciones	El usuario ha accedido al sistema y procesado la imagen satelital.

Flujo normal de eventos



Acción del actor	Respuesta del sistema
1. El usuario desea observar la taxonomía hidrológica de acuerdo al resultado del procesamiento.	1.1 El sistema muestra al usuario una interfaz donde se muestra la opción Mostrar taxonomía.
2. El usuario selecciona la opción Mostrar taxonomía.	2.1 El sistema muestra la taxonomía de acuerdo al resultado del procesamiento.

Cursos alternos	
3. El usuario selecciona la opción Mostrar taxonomía sin procesar la imagen satelital.	3.1 El sistema no realiza ninguna acción.

3.2.5 Etapa 5. Relaciones espaciales

Una vez obtenida la lista con los patrones encontrados y sus respectivas posiciones, se muestra la taxonomía correspondiente a cada patrón, apareciendo una descripción de los mismos en cada nodo. Esta descripción contiene elementos sobre el relieve, distribución de la vegetación y las condiciones estructurales de la zona, la cual es utilizada para generar las relaciones espaciales entre los objetos hidrológicos y las coberturas terrestres del entorno que los circunda, como se muestra en la Figura 19. Se puede apreciar que cada patrón de drenaje tiene asignado un color para diferenciarlo con respecto a otro y este se visualiza en la imagen cada vez que se encuentra dicho patrón de acuerdo con el porcentaje de certeza que indica una alta probabilidad de coincidencia del mismo en la imagen.

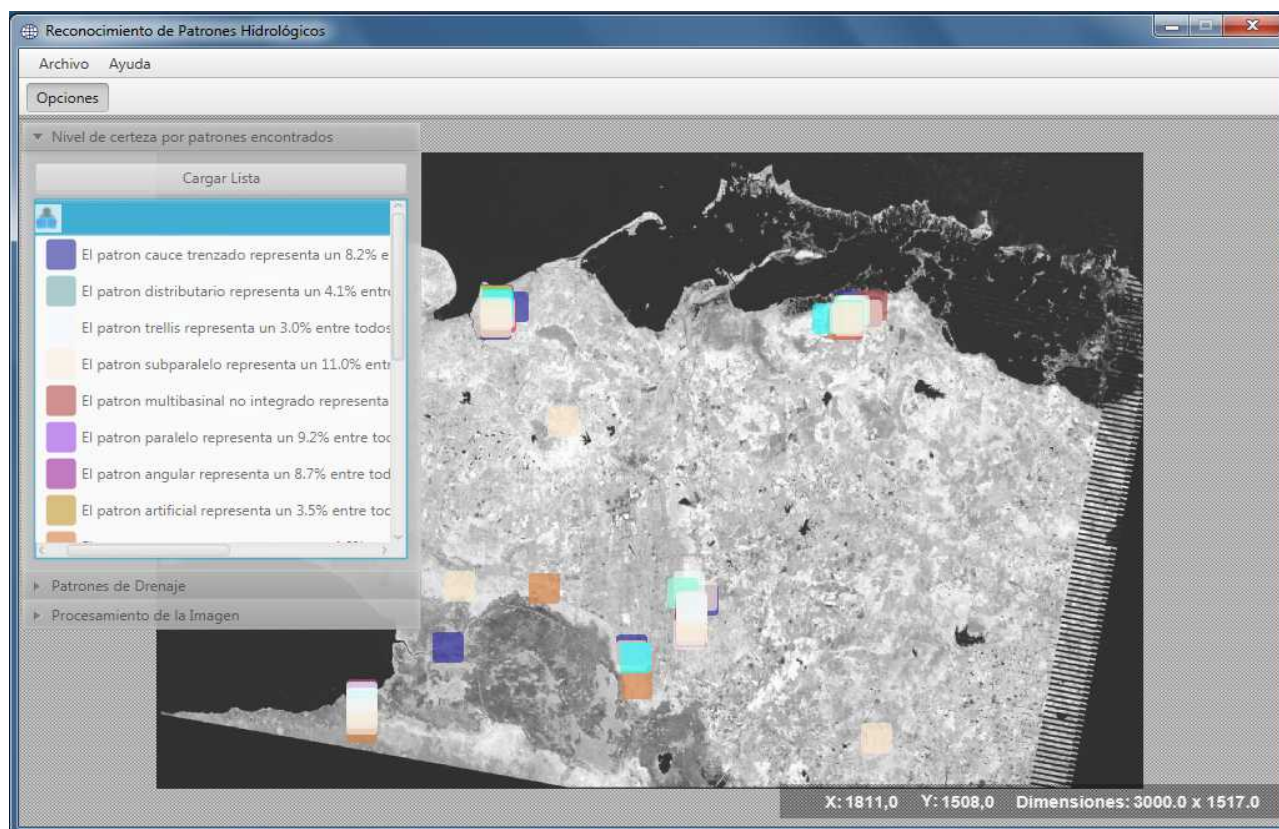


Figura 19. Relaciones espaciales. Fuente: Elaboración propia del autor.

En la investigación se utilizó un método de procesamiento de imagen explicado en el epígrafe 3.2.3.2 para establecer el grado de conectividad entre los patrones hidrológicos y el medio ambiente que los circunda. El procedimiento consistió en identificar las relaciones espaciales establecidas según la categoría topológica (específicamente el predicado espacial “contenida”) en el objeto específico de la taxonomía, puesto que los patrones de drenaje utilizados están contenidos en el objeto hidrológico río.

En la Figura 19, se pueden apreciar los lugares de la geografía mostrada en la imagen con los distintos patrones de drenaje identificados por la aplicación, con la descripción de algunos de ellos mostrados a modo de ejemplo:



Patrón multibasinal no integrado del taxón Río representa un 4.0% de certeza

Relación espacial: contiene sumideros aislados y desconectados entre sí, zonas con rocas solubles, se da principalmente en calizas, yeso, sal gema; pero, además, puede desarrollarse en materiales insolubles porosos.



Patrón subparalelo del taxón Río representa un 11% de certeza

Relación espacial: contiene zonas de alto relieve con pendientes escarpadas.



Patrón cauce trenzado del taxón Río representa un 8,2% de certeza

Relación espacial: contiene materiales arenosos con poco recubrimiento vegetal.

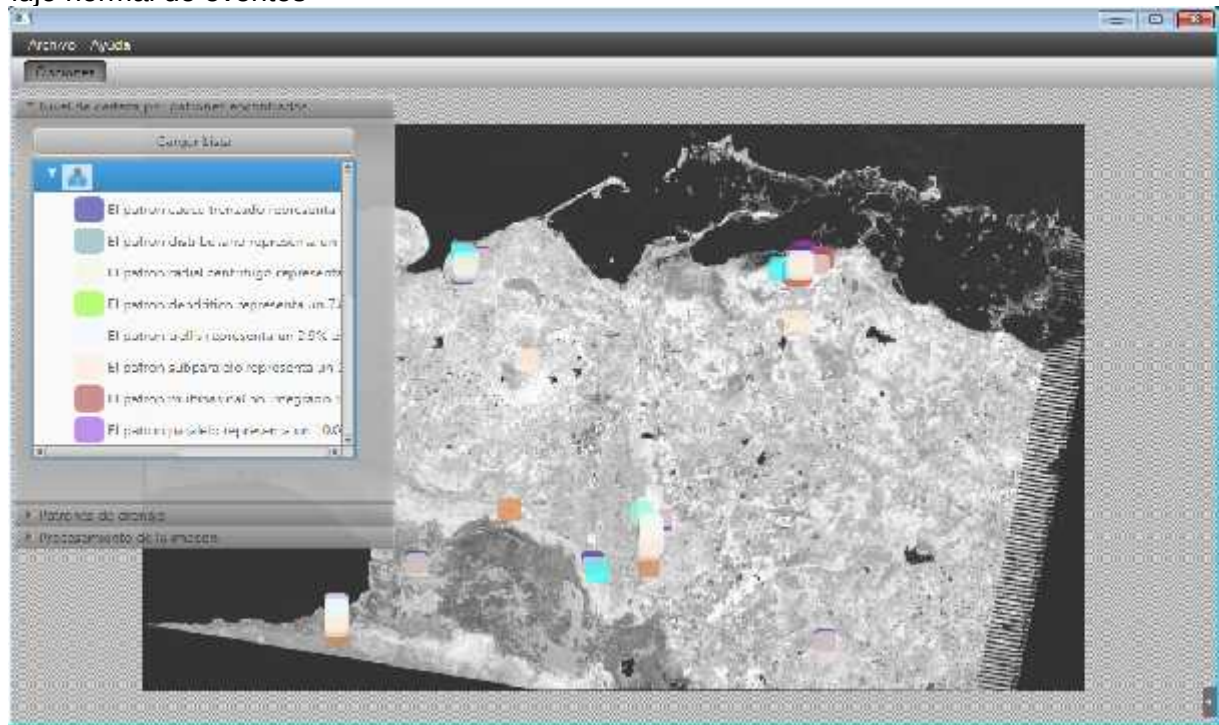
Requisitos Funcionales que debe cumplir la etapa 5.

1. Mostrar % que representa cada patrón.
2. Mostrar patrones de drenaje del sistema.

Tabla 6. Descripción del caso de uso Mostrar % que representa cada patrón.

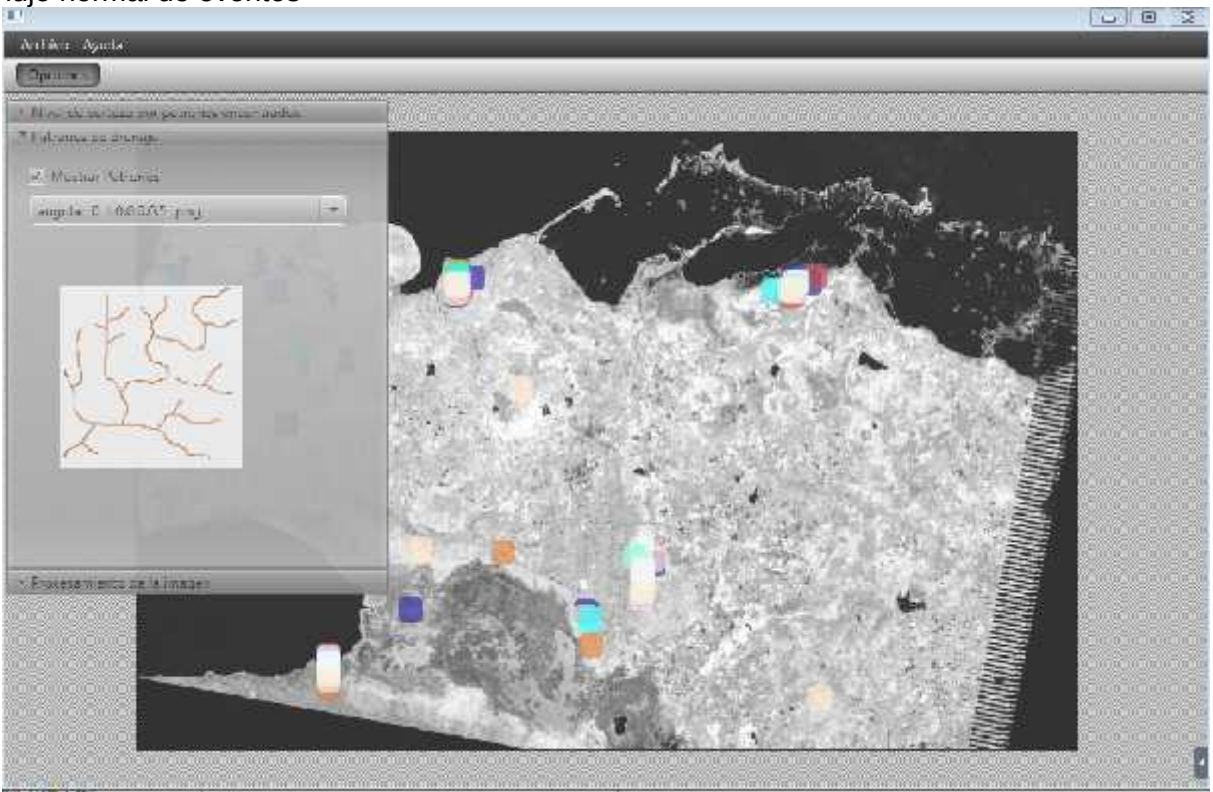
Nombre del caso de uso	Mostrar % que representa cada patrón.
Actores	Usuario
Descripción	El caso de uso se inicia cuando el usuario desea ver el % que representa cada patrón con respecto al total de patrones encontrados en la imagen satelital.
Referencias	
Precondiciones	El usuario ha accedido al sistema y procesado la imagen satelital.

Flujo normal de eventos



Acción del actor	Respuesta del sistema
1. El usuario desea observar la lista donde se muestra el % de cada patrón con respecto al total.	1.1 El sistema muestra al usuario una interfaz donde se muestra la opción de nivel de certeza por patrones encontrados.
2. El usuario selecciona la opción Cargar lista.	2.1 El sistema muestra una lista con el % que representa cada patrón con respecto al total y el color del patrón correspondiente.
Cursos alternos	
3. El usuario selecciona la opción Cargar Lista sin procesar la imagen satelital.	3.1 El sistema no realiza ninguna acción.

Tabla 7. Descripción del caso de uso Mostrar patrones de drenaje del sistema.

Nombre del caso de uso	Mostrar patrones de drenaje del sistema.
Actores	Usuario
Descripción	El caso de uso se inicia cuando el usuario desea conocer los patrones de drenaje con que cuenta el sistema.
Referencias	
Precondiciones	El usuario ha accedido al sistema.
Flujo normal de eventos	
	
Acción del actor	Respuesta del sistema
1. El usuario desea conocer los patrones de drenaje que el sistema utiliza en el procesamiento.	1.1 El sistema muestra al usuario una interfaz donde se muestra la opción Mostrar Patrones.
2. El usuario selecciona la opción Mostrar Patrones.	2.1 El sistema muestra la lista de los patrones existentes.

3.3 Conclusiones parciales

Luego de describir el método para identificar las relaciones espaciales entre objetos hidrológicos y las coberturas terrestres en imágenes de satélites se arriba a las siguientes conclusiones:

- 1) Se demuestra la pertinencia del diseño computacional-informático de los algoritmos implementados para la identificación de relaciones espaciales entre objetos hidrológicos en el contexto de imágenes de satélites.
- 2) El método REIS basado en cinco etapas fundamentales es pertinente ya que se identificaron las relaciones espaciales entre los objetos hidrológicos y las coberturas terrestres de las imágenes de satélites empleadas.
- 3) Se validó el método REIS mediante el software Reconocimiento de Patrones Hidrológicos que se diseñó para la realización de los experimentos apropiados que dieron soporte a la identificación y extracción de las relaciones espaciales entre objetos hidrológicos y las coberturas terrestres implícitas en las imágenes de satélites.
- 4) Se confirma que la aplicación desarrollada es útil para determinar los patrones de drenaje que coexisten en el área de la imagen de satélite introducida al sistema.

CONCLUSIONES GENERALES

Luego del desarrollo de la investigación se arriban a las siguientes conclusiones:

- 1) Se realizó un estudio profundo del estado actual de los métodos, técnicas y herramientas informáticas, estadísticas y de geoinformación para el establecimiento de las relaciones entre los objetos hidrológicos y coberturas terrestre en las imágenes de satélites con énfasis en la detección de los patrones de drenaje.
- 2) Se identificaron cinco actividades del proceso de establecimiento de relaciones espaciales entre objetos hidrológicos y las coberturas terrestres en las imágenes de satélites y se llevaron a cabo mediante seis casos de uso.
- 3) Se elaboró el método REIS en cinco etapas fundamentales basándose en la clasificación supervisada mediante funciones discriminantes. Se considera que es pertinente ya que se identificaron las relaciones espaciales entre los objetos hidrológicos, específicamente de la red de drenaje y las coberturas terrestres de las imágenes de satélites empleadas.
- 4) Se diseñó el software RePaH para la realización de los experimentos apropiados que dieron soporte a la identificación de las relaciones espaciales entre objetos hidrológicos y las coberturas terrestres garantizando la visualización y traducción a un lenguaje común de fácil identificación e interpretación en el contexto de las imágenes de satélites.

RECOMENDACIONES

- 1) Utilizar el método en la Universidad Agraria de la Habana validando su aplicación en imágenes satelitales de la estación seca y húmeda de la provincia Mayabeque, para verificar los posibles cambios en los patrones hidrológicos.
- 2) Proponer al CENATAV su evaluación y desarrollo ulterior añadiendo nuevas funcionalidades al software “Reconocimiento de Patrones Hidrológicos” según las insuficiencias que sean encontradas, especialmente en lo referente a las reglas de asociación espacial de los objetos hidrológicos, dada la complejidad del tema.
- 3) Continuar la investigación en una segunda etapa, como posible tema de doctorado con el fin de perfeccionar y validar el método propuesto en otros contextos geográficos y utilizando software libre de procesamiento digital de imágenes.

BIBLIOGRAFÍA REFERENCIADA

- AGRAWAL, R. T., IMIELINSKI & SWAMI, A. Mining association rules between sets of items in large databases. *Proceeding of the 1993 ACM SIGMOD international Conference on Management of Data*, 1993. 1-4.
- ALJURE, D. C. & AGUDELO, J. G. 2011. Spatial data mining an overview. *Rev Avanc Sist Informát.*, Minería de datos espaciales., 71-7.
- BAE, D. H., BAEK, J. H., SONG, J. W. & KIM, S. W. 2009. Network Infrastructure and Digital Content. *In: CONFERENCE, I. I. (ed.) A spatial data mining system.*
- BASTERRA, I. 1999. *Procesamiento digital de imágenes.*
- BERNAL, J. V. 2012. *Los principios del método geográfico* [Online]. Available: <http://www.contraclave.es/geografia/principiosdelmétodogeográfico.pdf> [Accessed 2 de diciembre 2014].
- BOGORNÝ, V. 2006. *Enhancing Spatial Association Rule Mining in Geographic Databases.* Universidad Federal de Rio Grande del Sur.
- BURKE, D. G., MEYERS, E. J., TINER, R. W. & GROMAN, H. 1988. *Protecting non-tidal wetlands*, Washington, D.C.
- BURROUGH, P. 1988. Principles of Geographical Information Systems for land resources assessment. *Oxford University Press*, Oxford, 80.
- BURROUGH, P. & MCDONNELL, R. 1998. Principles of Geographical Information Systems. *Oxford University Press*, Oxford.
- CASTILLO, F. D. & TEMARIO, T. 2009. Cartografía II. Los Datos Geográficos. *EPS Jaén.*, 23.
- CERDA, L. 2004. Reglas de Asociación aplicadas a la detección de fraude en tarjeta de créditos., 14.
- CERVANTES, M. 1994. *Guía regional para el conocimiento, manejo y utilización de los humedales del noroeste de México.*, México.
- COLEMAN, M., A. M. MABUZA, G. KOK, COETZEE, M. & DURRHEIM, D. N. 2009. Using the SaTScan method to detect local malaria clusters for guiding malaria control programmes. *J. Malar*
- COWARDIN, L. M., CARTER, V., GOLET, F. C., ROE, E. T. L. & U.S., B. S. P. 1979. Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States. *In: PROGRAM, B. S. (ed.) Fish and Wildlife Service.* Washington, D.C.
- CUELLAR, L. & RICARDO, A. 2009. *Elementos de Diseño para Acueductos y Alcantarillado.*
- CHOW, V. T. 1982. Hidráulica de los canales abiertos.
- CHUVIECO, E. S. 2010. *La observación de la Tierra del Espacio*, Teledetección ambiental.
- DING & WEI 2006. Supervised Spatial Association Rule Mining. *A Stratified Approach.*
- GONZÁLEZ, J. C. & CASTELLÓN, M. 2009. Técnicas de clasificación en el entorno de weka para la determinación de cultivos de regadío (cítricos) en librilla, murcia. *In: ESPINARDO, C. D. (ed.) Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua.* España.
- DUDA, R. O., HART, P. E. & STORK, DAVID G. 2001. Pattern classification (2ª edición), Wiley, New York, ISBN 0-471-05669-3.
- GUILLERMO, O. 2010. *Aplicación de minería de datos espaciales en un estudio de cambio de uso del suelo.* Universidad de Concepción Chile.
- HAN, J. & KAMBER, M. 2006. *Data mining concepts and techniques*, Morgan Kaufmann.
- HARMON, J. E. & ANDERSON, S. J. 2003. The Design and Implementation of Geographic Information Systems. *Presented at the John Wiley & Sons.* .
- HARRISON, B. A. & JUPP., D. L. B. 1989. Introduction to Image Processing.: Australia.
- HAUENSTEIN, E., MUÑOZ-PEDREROS, A., PEÑA, F., ENCINA, F. & GONZÁLEZ, M. 1999. *Ecosistemas de alta biodiversidad con problemas de conservación*, Chile.

- HENDRICKSON, D. A. & MINCKLEY, W. L. 1985. *Vanishing climax communities of the American Southwest*, Desert Plants, Biotic Communities of the American Southwest United States and Mexico. .
- GOSLING, J. & JOY, B., ATEELE, G. & BRACHA, G. 2005. *The Java language specification*.
- KAOSAR, M. G. 2009. Distributed Association Rule Mining with Minimum Communication Overhead. *CRPIT*, 101, 7.
- KARASOV, V. 2005. *Spatial data mining as a tool for improving geographical models*. Universidad Tecnológica de Helsinki.
- KOPERSKI, K. & HAN, J. 1995. Discovery of Spatial Association Rules in Geographic Information Databases. 20.
- KORTING, T. S., L.M. G. FONSECA, M.I.S. ESCADA, SILVA, F. D. & SILVA, M. P. D. S. 2008. A novel system for spatial data mining. Data Mining Workshops. *In: GEODMA (ed.) IEEE International Conference;*.
- KUBSKI, M. I. 2005. *Aplicación Orientada al Descubrimiento del Conocimiento en Bases de Datos*. Universidad Nacional del Nordeste: Argentina.
- KUX, H. J. & SOUZA, U. D. 2012. Object-based image analysis of WorldView-2 satellite data for the classification of mangrove areas in city of São Luís. *A Photogr, Rem Sens Spat Inform*.
- LAGANIERE, ROBERT. 2011. *OpenCV 2 Computer Vision Application Programming Cookbook*. s.l. : Packt publishing open source, 2011.
- LAURINI, R. & THOMPSON, D. 1992. *Fundamentals of spatial informations systems*, Academic Press.
- LI, M. S. & LEE, S. Y. 1997. *Forest Ecology and Management*, Mangroves of China.
- LILLESAND, T. M. & KIEFER, R. W. 1987. *Remote Sensing and Image Interpretation*, John Wiley & Sons, Inc., Second Edition.
- LOCKHART, T. 1996. Tutorial de PostgreSQL. *In: POSTGRESQL*, E. E. D. D. D. (ed.).
- LONGLEY, P., GOODCHILD, M., MAGUIRE, D. & RHIND, D. 2001. *Geographic Information Systems and Science*. Presented at the John Wiley & Sons.
- LÓPEZ, J. 1990. *Procesamiento digital de imágenes*. Bogotá.
- LORCA, J. C. & VALDIVIA, C. G. 2007. *John Snow, la epidemia de cólera y el nacimiento de la epidemiología moderna* [Online]. Available: <http://www.scielo.cl/pdf/rci/v24n4/art14> [Accessed 2 de diciembre 2014].
- LOVISON-GOLOB, L. & FISHER, H. T. 1965. Harvard University. Available: <http://www.gis.dce.harvard.edu/fisher/htfisher.htm> [Accessed 2 de diciembre 2014].
- MELH, H. & PEINADO, O. 1992. *In: RAUMFAHRT, D. Z. F. L. U. (ed.) Fundamentos del procesamiento digital de imágenes*.
- MINCKLEY, W. L. & BROWN, D. E. 1982. *Wetlands*, Desert Plants.
- MONTREUX 1990. *Towards the Wise Use of Wetlands*, Gran Bretaña.
- MORALES, A. 2012. Por qué utilizar PostGIS.
- ORACLE. 2011. www.netbeans.org. [En línea] 2011. [Citado el: 7 de 6 de 2015.] <http://netbeans.org>.
- REYES, M. X. D. 2009. Minería de datos espaciales en búsqueda de la verdadera información.
- RIGAUX, P., SCHOLL, M. & A. VOISARD 2001. *Spatial Databases With Application To GIS*. Presented at the Academic Press. .
- ROJAS, R. 2008. *Lagunas de Estabilización, de Aguas Residuales*.
- RONGHUA, M. 2005. Cognitive logic Representation of Spatial Association Rules of knowledge Discovery from GIS Database. 6.
- ROSETTE, F. D. S. 2013. *Método para la extracción de asociaciones espaciales en bases de datos geográficos*. . Doctorado, Ministerio de las Fuerzas Armadas Revolucionarias. Instituto Técnico Militar José Martí. Orden "Antonio Maceo". Orden "Carlos J. Finlay".

- VILLAR, A. A. 2002. *Teledetección y sistemas de tratamiento digital de imágenes*
- VYAS, R., KUMAR, L. & TIWARY, U. 2007. Exploring spatial ARM (Spatial Association Rule Mining) for geo-decision support system. *Journal of Computer Science*, 3, 1-3.
- WORBOYS, M. 1992. A Geometric Model for Planar Geographical ObjectsInternational Journal of Geographical Information Systems. 353-372.
- WORBOYS, M. F. 2004. A Computing Perspective. *CRC*, Presented at the CRC. .
- XIAOSHENGA, L. 2005. Extract Spatial Association Rules by Method of Spatial Analysis. 4.

