

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES  
CENTRO DE ESTUDIOS DE POSTGRADO  
MAESTRÍA DE MANEJO DE CUENCAS

**DESARROLLO DE UN MÓDULO SIG  
BASADO EN SOFTWARE LIBRE PARA EL  
CÁLCULO DE UN BALANCE EDAFO-  
CLIMÁTICO**

ING. FOR. JESUS ANDRADES  
TUTOR: PROF JUAN LÓPEZ  
COTUTOR: PROF ALEX BARRIOS

# **INDICE GENERAL**

<b>CONTENIDO</b>	<b>PAGINA</b>
<b>1. RESUMEN</b>	1
<b>2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	3
<b>3. OBJETIVOS</b>	4
<b>4. HIPÓTESIS</b>	5
<b>5. ANTECEDENTES</b>	6
5.1. SOFTWARE COMERCIAL	6
5.2. FILOSOFIA UNIX	6
5.3. LICENCIAS GNU Y EL SOFTWARE LIBRE	6
5.4. EL SOFTWARE LIBRE EN VENEZUELA	7
5.5. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO DE TECNOLOGÍA LIBRE	8
5.6. MÓDULOS SIG	11
5.7. DESARROLLO DE BALANCES EDAFOCLIMATICOS	12
<b>6. MARCO TEÓRICO</b>	13
6.1. BALANCE EDAFOCLIMÁTICO	13
6.2. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	16
6.3. CIENCIA DE INFORMACIÓN GEOGRAFICA	16
6.4. RASTER Y VECTOR	17
6.5. INTERFAZ DE USUARIO (IU)	18
6.6. PROGRAMACIÓN FUNCIONAL	19
6.7. PROGRMACIÓN ORIENTADA A OBJETOS	20
6.8. ARRAY EN PROGRAMACIÓN	21
6.9. MATRICES EN PROGRAMACIÓN	22
6.10. LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN C++	23

6.11.	LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN JAVA	23
6.12.	LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN PYTHON Y JYTHON	23
6.13.	HERRAMIENTAS Y DESARROLLO DE HERRAMIENTAS	24
6.14.	DIFERENCIA DE MEDIAS CON DATOS INDEPENDIENTES	24
6.15.	ARCVIEW-GIS	25
6.16.	SPSS	26
<b>7.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>27</b>
7.1.	EQUIPOS	28
7.2.	SELECCIÓN DEL SIG	28
7.3.	GENERACIÓN PROGRAMA DE BALANCE PUNTUAL “ILUSTRACIÓN”	31
7.4.	CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DE BALANCES EDAFOCLIMÁTICOS	33
7.5.	COMPROBACIÓN DEL MODULO MEDIANTE SOFTWARE COMERCIAL	40
7.6.	ELABORACIÓN DE MANUAL DE USO DEL MÓDULO	43
<b>8.</b>	<b>RESULTADOS Y ANALISIS</b>	<b>45</b>
8.1.	VALIDACIÓN DEL PROCESO DE CÁLCULO DE LA RESTA (PP-ETP) Y CÁLCULO DE LA MEDIA POR MES	45
8.2.	VALIDACIÓN DEL PROCESO DE CÁLCULO Y GENERACIÓN DEL BALANCE	49
<b>9.</b>	<b>COLCUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>55</b>
<b>10.</b>	<b>REFERENCIAS CITADAS</b>	<b>58</b>

# ÍNDICE DE CUADROS

<b>CUADRO</b>	<b>PÁGINA</b>
1. RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE DIVERSOS SIG LIBRES	29
2. POSIBLES COMBINACIONES EN EL ARRANQUE DEL BALANCE EDAFOCLIMÁTICO	38
3. RESULTADOS DADO PARA EL CÁLCULO DE LA MEDIA (PP-ETP) PARA LAS ZONAS DE BARINAS Y EL SEMIÁRIDIO DE LARA-FALCÓN DE FORMA MANUAL EN ARCVIEW 3.2 Y DE FORMA AUTOMATIZADA	45
4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LA PRUEBA T DE MUESTRAS INDEPENDIENTES DE LA MEDIA PRECIPITACIÓN-ETP PARA LA ZONA DE BARINAS	48
5. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LA PRUEBA T DE MUESTRAS INDEPENDIENTES DE LA MEDIA PRECIPITACIÓN-ETP PARA LA ZONA DE LARA-FALCÓN	49
6. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LA PRUEBA T DE MUESTRAS INDEPENDIENTES EN LA ZONA DE BARINAS	50
7. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LA PRUEBA T DE MUESTRAS INDEPENDIENTES EN LA ZONA DE LARA-FALCÓN	51
8. ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS DEL ERROR CALCULADO PARA LARA-FALCÓN	52
9. ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS DEL ERROR CALCULADO PARA BARINAS	52

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA</b>	<b>PÁGINA</b>
1. APROXIMACIÓN DEL LOS DOS MODELOS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA RASTER Y VECTOR	18
2. ESTRUCTURA GENERAL DE LA METODOLOGÍA APLICADA	27
3. ESTRUCTURA GENERAL DEL PROGRAMA DE BALANCE EDAFOCLIMÁTICO PUNTUAL	31
4. ESTRUCTURA GENERAL DEL MÓDULO DE BALANCE	34
5. ESTRUCTURA DE LA INTERFAZ GRÁFICA GENERADA	35
6. ESTRUCTURA GENERAL DEL BALANCE.PY	36
7. ESTRUCTURA DEL FUNCIONAMIENTO DEL MÓDULO PARA EL MES ELEGIDO POR EL USUARIO PARA ARRANQUE DEL MISMO	39
8. VARIACIÓN DE LA MEDIA PP-ETP (MM) PARA LAS ZONAS DE BARINAS DE FORMA MANUAL EN ARCVIEW 3.2 Y DE FORMA AUTOMATIZADA	46
9. VARIACIÓN DE LA MEDIA PP-ETP (MM) PARA LAS ZONAS DE LARA-FALCON DE FORMA MANUAL EN ARCVIEW 3.2 Y DE FORMA AUTOMATIZADA	46
10. VARIACIÓN MENSUAL DEL ERROR ENTRE LOS VALORES MANUALES Y AUTOMATIZADOS DE PP-ETP (MM) MEDIA PARA LAS ZONAS DEL SEMIÁRIDO DE LARA-FALCÓN	47

11. VARIACIÓN MENSUAL DEL ERROR CALCULADO (MÍNIMO, MÁXIMO Y MEDIO) PARA LARA-FALCÓN	53
12. VARIACIÓN MENSUAL DEL DEL ERROR CALCULADO (MÍNIMO, MÁXIMO Y MEDIO) PARA BARINAS	54

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

C.C.Reconocimiento

# 1. RESUMEN

A través de los años en Venezuela se han utilizado preferencialmente las licencias comerciales (privativas) de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Sin embargo, la aprobación del decreto presidencial N° 3390 acerca del software libre, aunado a que los balances Edafoclimáticos espacio-temporalmente son una forma innovadora de cuantificar la situación hídrica de un área determinada para un intervalo de tiempo dado. Sin embargo, la generación de éstos manualmente, constituyen un proceso monótono y tedioso, es por ello que se desarrolló un módulo gráfico para software libre para un Balance Edafoclimático. Para el estudio de los balances Edafoclimáticos se generó en lenguaje C++ un programa que ilustró la complejidad del problema hasta un carácter de una estación climatológica individual.

El módulo de Balances Edafoclimáticos (espacialmente distribuido) se desarrolló en el SIG GVSIG 1.0.2 (Generalitat Valenciana-SIG) de licencia libre. Utilizando el lenguaje Python y su consola Jython, así como los códigos dados por Thinlet (para elaborar la interfaz gráfica), se diseñó un proceso interactivo usuario-módulo que requiere como datos de entrada 12 mapas raster de Precipitación (PP), 12 mapas Raster de Evapotranspiración (ETP) y un mapas raster de almacenamiento inicial del suelo. En el procesamiento de la data se destacan tres fases: la primera de preprocesamiento, en la cual se le da al usuario información (media de PP-ETP por mes) para que éste seleccione el mes de inicio del balance, la segunda selección por parte del usuario del mes de inicio del balance, y la tercera consiste en el procesamiento y generación de los mapas raster de Exceso/Déficit y Almacenamiento del suelo (los raster manejados son en formato ASCII raster).

Para la validación del módulo se utilizaron los mapas raster producidos por los proyectos Prosalafa II desarrollados por el CIDIAT-ULA, en la zona semiárida de los estados Lara-Falcón y los raster producidos por el Proyecto Estudio Socio Ambiental Específico de la Refinería Batalla de Santa Inés y la Generación de un Polo de Desarrollo Regional, Sustentable desarrollados en la zona húmeda del estado Barinas. Para cada zona se realizaron dos procedimientos, el primero

manual usando el algebra de mapas de ArcView GIS 3.2 y el segundo automatizado usando el módulo desarrollado. En este trabajo se Aplicaron dos grupos de pruebas igualdad de medias se validó el módulo, para ello se utilizó el programa estadístico SPSS 12. La primera prueba consistió en la validación de la fase de la media Precipitación-ETP presentada al usuario y la segunda el análisis de igualdad de medias de los Excesos/Déficit por ambos procesos para cada una de las zonas. Los resultados obtenidos de las pruebas en ambas zonas muestran que la las pruebas de igualdad de medias son poco significativas por lo que se concluye que el módulo funciona correctamente. Adicionalmente, se estimó el error producido por el módulo y éste reveló diferencias en milésimas de milímetros por lo que se desprecia el error. La causa de ésta diferencia es que al almacenar el mapa raster producido únicamente se almacenan a un máximo de dos posiciones decimales.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

C.C.Reconocimiento



## **2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

A través de los años se han utilizado preferencialmente las licencias comerciales de software propietario para el análisis espacial y temporal de los recursos naturales, bien sea suelo, agua ó vegetación. Sin embargo, la brecha tecnológica generada entre las naciones productoras de este tipo de software y aquellas que no lo producen sino que son sólo usuarias de los mismos, es muy profunda. El Ejecutivo Nacional aprobó el 28 de diciembre de 2004, el Decreto Presidencial N° 3390 que tiene como objetivo emplear prioritariamente en la administración pública el software libre con estándares abiertos en sus sistemas, proyectos y servicios informáticos, y con ello promover el desarrollo tecnológico, la adición de valor agregado y la disminución de la dependencia y de la brecha tecnológica entre los países. Por otro lado, el uso de los balances edafo-climático juega un papel relevante en la planificación y manejo de los recursos, así como en la planificación y uso de la tierra. Según Grassi (1998), un balance Edafoclimático es una forma de cuantificar la situación hídrica de un área determinada para un intervalo de tiempo dado. Tradicionalmente éste tipo de análisis se realiza puntualmente en estaciones climatológicas. Las tecnologías SIG han brindado la posibilidad de transformar un balance edafo-climático puntual en una estructura de análisis espacio-temporal que provee información confiable para la toma de decisiones. Esto, aunado a la política de promoción del uso de licencias de libre acceso por parte del Ejecutivo Nacional y que los balances hídricos son ampliamente utilizados en Venezuela para evaluar la disponibilidad de los recursos, conduce al planteamiento del presente proyecto de tesis de maestría, el cual está dirigido al desarrollo de un módulo SIG que estime balances hídricos espacialmente distribuidos, usando la tecnología libre como herramienta de trabajo.

### **3. OBJETIVOS**

#### *General*

Diseñar y elaborar un módulo SIG de tecnología libre, para un balance Edafo-climático espacialmente distribuido.

#### *Específicos*

- Elaborar un sub-módulo gráfico de pre-procesamiento de datos que facilite la toma de decisiones del Balance.
- Elaborar un sub-módulo gráfico que automatice la generación de balances hídricos espacialmente distribuidos.
- Comprobar el correcto funcionamiento del módulo generado utilizando un software SIG comercial con datos de zonas semiáridas y Áridas de los estados Lara-Falcón y a la zona húmeda del estado Barinas

## **4. HIPÓTESIS**

Es posible elaborar un módulo gráfico en un SIG de software libre para balance edafo-climático, espacialmente distribuido. Este módulo tomaría en cuenta el proceso de variación espacio-temporal del balance Edafo-Climático a nivel mensual, ayudando a identificar la cantidad de exceso y déficit de agua en el suelo, proceso que facilitaría la toma de decisiones en la ordenación de los recursos naturales presentes en una zona, especialmente si estos últimos son escasos.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

C.C.Reconocimiento

## **5. ANTECEDENTES**

### **5.1 SOFTWARE COMERCIAL (Fundación Vía Libre, 2000)**

Consiste en sistemas y programas expresados en código fuente (texto de las instrucciones que los programadores ordenan para su ejecución por las computadoras) sólo accesible a usuarios con licencia.

De hecho, para utilizar tales programas y/o sistemas, es menester comprar (en realidad, meramente licenciar) el derecho correspondiente al "propietario" de ese software, so pena de violar las leyes que protegen la propiedad intelectual y/o el derecho de autor. Las consecuencias legales de las infracciones a las citadas leyes difieren en las diversas legislaciones nacionales, pero en casi todas son importantes, tanto en el orden civil como en el penal.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

### **5.2 FILOSOFIA UNIX (Estrada, S/f)**

UNIX incorpora un conjunto de herramientas que guardan cierta analogía con una navaja multiusos. Son simples, pero hacen *muy bien* su trabajo. En lugar de construir programas muy complejos, UNIX proporcionaba muchas pequeñas herramientas, y un esquema para poder *combinarlas* de forma efectiva. Este diseño escala muy bien, permitiendo al sistema crecer, incorporar nuevas herramientas y, a la vez, ser compatible hacia atrás.

### **5.3 LICENCIAS GNU Y EL SOFTWARE LIBRE**

Los contratos de licencia de la mayor parte del software están diseñados para quitarle su libertad de compartir y modificar dicho software. En contraste, la "GNU General Public License" pretende garantizar su libertad de compartir y modificar el software "libre", esto es para asegurar que el software es libre para todos sus usuarios. Esta licencia pública general se aplica a la mayoría del software de la

C.C.Reconocimiento

"FSF Free Software Foundation" (Fundación para el Software Libre) y a cualquier otro programa de software cuyos autores así lo establecen. Algunos otros programas de software de la Free Software Foundation están cubiertos por la "LGPL Library General Public License" (Licencia Pública General para Librerías), la cual puede aplicar a sus programas también (Rodríguez, 2001).

Según Rodríguez, (2002), y Fundación Vía Libre, (2000), cuando se habla de software libre, se refiere a libertad, no al precio. Las licencias "General Public Licenses" están diseñadas para asegurar que:

1. La libertad de distribuir copias del software libre (y cobrar por ese sencillo servicio si así lo desea)
2. Recibir el código fuente (o tener la posibilidad de obtenerlo si así lo desea)
3. La libertad de modificar el software o utilizar partes de el en nuevos programas de software libre
4. La libertad de ejecutar el programa con cualquier propósito.
5. La libertad de estudiar cómo funciona el programa y adaptarlo a las necesidades propias.
6. La libertad de mejorar el programa y liberar esas mejoras al público y de ese modo beneficiar a toda la comunidad.
7. La Libertad de que usted esté enterado de que tiene la posibilidad de hacer todas estas cosas.

#### **5.4 EL SOFTWARE LIBRE EN VENEZUELA**

El decreto de Software libre es una legislación basada en la política nacional que tiene la intención de que la administración pública emplee software libre con estándares abiertos en sus sistemas, proyectos y servicios informáticos. A tales fines, todos los órganos y entes de la administración pública iniciarán los procesos de migración gradual y progresiva hacia el software libre desarrollado con estándares abiertos y el ejecutivo nacional promoverá el uso generalizado del

mismo en la sociedad, para lo cual desarrollará mecanismos orientados a capacitar e instruir usuarios en la utilización del software libre desarrollado con estándares abiertos (República Bolivariana de Venezuela, 2004).

En estos momentos se ha iniciado el levantamiento de información de los softwares propietarios usados en la administración pública en el país. La información recopilada permitirá clasificarlas en: a) Softwares propietarios que pueden migrarse a software libre y b) Softwares propietarios que deben mantenerse y justificarse ante el gobierno. Según las excepciones consideradas por el decreto 3390, podrán justificarse: a) Aquellos softwares propietarios sin un equivalente libre, y b) los que tienen un equivalente libre, pero no cubren todas las funcionalidades requeridas. Como resultado de estas primeras actividades se espera describir los diferentes escenarios de impacto para su posterior análisis y evaluación (PROCEDATOS, 2005).

## 5.5 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO DE TECNOLOGÍA LIBRE

Existen diversos programas de SIG con licencias GNU, tal es el caso de:

- GVSIG (Generalitat Valenciana-SIG) el cual es una herramienta para usuarios finales de información de naturaleza geográfica, ya sea para uso de profesionales o de la administración pública. Se caracteriza por una interfaz amigable, siendo capaz de acceder a los formatos más usuales de forma ágil tanto ráster como vectoriales (Conselleria d'Infraestructures i Transport, 2006).
- GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) es un Sistema de Información Geográfico (SIG) usado para el procesamiento de datos, el procesamiento de imágenes, la producción de gráficos, el modelado espacial, y la visualización de muchos tipos de datos (GRASS Development Team, 2006).

- SAGA Team (2006), SAGA (Sistema de Análisis Geocientífico Automatizado) es un software con un doble objetivo. Por una parte, se trata de dotar a la comunidad (geo) científica de una plataforma de fácil aprendizaje para la implementación de métodos científicos. Esto se lleva a cabo a través de la Interfaz de programación de la aplicación (API). Por otra parte, se pretende hacer accesibles esos métodos de forma sencilla, lo cual se consigue gracias a una adecuada interfaz gráfica de usuario (GUI). En conjunto, estos elementos conforman el verdadero núcleo de SAGA: un conjunto de módulos en constante crecimiento, agrupados en librerías específicas. SAGA está escrito en C++ y sigue un enfoque orientado a objetos. Puede aplicarse a elementos geométricos (puntos, intersecciones), numéricos (operaciones matriciales) y otras herramientas (manejo de memoria, cadenas...), clases de objetos para tablas, capas vectoriales y ráster, que incorporan rutinas óptimas de manejo de memoria, acceso a datos y manipulación de éstos mediante métodos específicos, interacción con la interfaz gráfica de usuario y desarrollo de herramientas para la creación de interfaces de los módulos (ventanas de parámetros, etc.), implementadas de forma sencilla y rápida. Cabe destacar que existe una versión de SAGA GIS en español denominada Sextante.
- Jump fue uno de los primeros SIG gratuitos y por lo tanto ha servido de base a otros desarrollos, tanto públicos como aquellos generados por empresas de programación. Se trata de un SIG modular programado en Java que basa su funcionalidad en módulos (*plugins*). De esta forma si queremos cargar cualquier tipo de imagen o dato vectorial sólo tenemos que encontrar o programar el módulo necesario. Lo mismo ocurre con cualquier funcionalidad adicional que se desee implementar: consultas, ediciones avanzadas, etc (Jiménez *et al.*, S/f). JUMP es una aplicación SIG

modular de código libre que permite la consulta y la creación/modificación de datos geográficos vectoriales almacenados bajo distintos formatos incluidos como GML, DXF o ESRI shapefile. El programa permite también la explotación de servicios WMS.

Este Sistema de Información Geográfica está programado en Java y es multiplataforma. Su arquitectura modular facilita la creación de numerosos plugins que añaden funcionalidades específicas tales como: comprobación de topología; generación de Modelos Digitales del Terreno; lectura de formatos raster, métodos de interpolación (kriging, triangulación de Delaunay, polígonos de Voronoi); tracing; creación de metadatos; etc (Wikipedia, 2007.a).

- Quantum GIS (o QGIS) es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de código libre para plataformas Linux, Unix, Mac OS y Microsoft Windows. Permite manejar formatos raster y vectoriales, así como bases de datos (Wikipedia, 2007.b). Algunas de sus características son:
  - Soporte para la extensión espacial de PostgreSQL, PostGIS.
  - Manejo de archivos vectoriales en formatos Shapefile, coberturas ArcInfo, Mapinfo, GRASS GIS, etc.
  - Soporte para un importante número de tipos de archivos raster (GRASS GIS, GeoTIFF, TIFF, JPG, etc.)

Una de sus mayores ventajas es la posibilidad de usar Quantum GIS como GUI del SIG GRASS, utilizando toda la potencia de análisis de este último en un entorno de trabajo más amigable.

- UDIG es una plataforma a través de la cual los desarrolladores pueden crear nuevos y derivados usos. El uDig es un elemento de la base en un sistema de información geográfico con base en Internet. uDig se ha



desarrollado con un énfasis fuerte en el soporte de los estándares públicos que eran convertidos por él un SIG de estándares abiertos (uDig, 2007).

- HIDRO-SIG es un sistema de información geográfico (SIG) para la estimación, despliegue y análisis de las variables más importantes del ciclo hidrológico en ese país, tales como precipitación, evaporación potencial y real y escorrentía, tanto a nivel anual como mensual. El SIG ha sido creado utilizando el lenguaje IDL. Es un SIG flexible y versátil para la estimación hidrológica en cuencas con o sin medición, ya que permite estimar los caudales promedios de largo plazo en cualquier punto de la hidrografía colombiana, usando la metodología de balances hídricos de largo plazo (Mesa *et al.*, 2006).

## 5.6 MÓDULOS SIG

Es de destacar que se han desarrollado diversos módulos SIG que aceleran y facilitan el manejo de diversos modelos de simulación. Un ejemplo es el caso de SWAT, interfaz desarrollada, para la estimación de erosión, sedimentación y concentraciones de fertilizantes, en cuencas de distintas escalas a través de aplicación de la USLE (*Universal Soil Loss Equation*) (Neitsch *et al.*, 2002). Otro ejemplo es CASC2D, modelo físicamente basado y de parámetros distribuidos. Los componentes principales del modelo incluyen la contabilidad de humedad de suelo continua, la intercepción de precipitación, la infiltración, la formación de escorrentía, la erosión y el transporte de sedimentos. La interfaz puede tener acceso a datos tanto del ARC/INFO como del GRASS GIS (NASA, 2006). Otra interfaz es TOPMODEL, desarrollada en SAGA GIS, ésta estima el riesgo de erosión a través de la aplicación de la USLE, y la capacidad de retención de humedad del suelo, entre otras aplicaciones (Olaya, 2004). El modelo HEC-HMS es un módulo desarrollado para ArcGis que calcula crecidas máximas, mediante la aplicación de un modelo precipitación - escorrentía para la estimación de avenidas, es ejecutable en entorno de Microsoft Windows (CEDEX, 2006)

## 5.7 DESARROLLO DE BALANCES EDAFOCLIMÁTICOS

Guevara (S/f) citado por Dal Pozzo (2004), desarrolló un balance edafoclimático puntual usando el lenguaje Fortran (IV), el cual fue adaptado y corregido para Fortran (VII) por Dal Pozzo en 1990, el mismo Dal Pozzo genera una versión beta 1 para el balance en el año 2004 pero esta vez el lenguaje de programación usado es Delphy 7, éste último soluciona el problema de la aplicación del almacenamiento utilizando una ficha (Dal Pozzo, 2004). Bidlake y Boetcher (1997) desarrollaron un modelo que simula el proceso de infiltración, capacidad de retención de humedad del suelo, percolación profunda, evapotranspiración y evaporación de la superficie del suelo. Este modelo de balance hídrico fue desarrollado usando la teoría del movimiento del flujo del agua en un suelo no saturado y en argumentos empíricos para estimar la evapotranspiración de las plantas, para el desarrollo del software se utilizó el programa Turbo Pascal 5.0 y su código es de libre acceso. Según Olaya (2006), Sextante GIS ha desarrollado Balances suelo – agua mas no de carácter Edafoclimáticos tal es el caso del modelo Modelización Distribuida de la Humedad Edáfica que implementa un modelo capaz de ofrecer un valor cuantitativo de humedad de suelo en función no solo de la morfología de terreno, sino también de otra serie de parámetro.

## 6. MARCO TEÓRICO

### 6.1 BALANCE EDAFOCLIMÁTICO

Según García *et al.* (1996), la capa de suelo donde está dispuesto el sistema radical de los cultivos representa no sólo el medio físico de soporte de las plantas, sino también juega un papel de reservorio de agua y nutrientes. Este reservorio se llena con agua por vía natural y al mismo tiempo las plantas absorben cierta cantidad de humedad para suplir sus necesidades hídricas, y al mismo tiempo, se producen pérdidas por evaporación desde la superficie del suelo y por escurrimiento. El modelo matemático que describe este fenómeno se basa en la ecuación de balance hídrico, la cual se confecciona para una capa de suelo y un período de cálculo determinado. La razón de tal procedimiento, es que el objetivo del régimen de riego busca mantener la humedad óptima para las plantas en la capa activa del suelo; su determinación se puede obtener únicamente disponiendo de una información probable de la dinámica de la humedad y el déficit, lo cual se puede lograr a través del modelo matemático que se describe por la ecuación de balance hídrico.

El balance hídrico del suelo en equilibrio con el clima, es una forma de cuantificar la situación hídrica de un área determinada para un intervalo de tiempo dado. Al respecto, cabe destacar que se realiza con fines de planificación agrícola, regional o zonal y también con fines de diseño y funcionamiento de un sistema de riego (Grassi, 1998).

Según Pacheco *et al.* (1995) y García *et al.* (1996), las variaciones de la humedad en el suelo pueden explicarse aplicando una ecuación de balance hídrico la cual consta de ingresos y egresos del sistema.

$$R_f = R_{in} + \sum \text{Ingresos} - \text{Egresos} = R_{in} + \sum (M_i - E_i) \quad (1)$$

Donde

$R_f$ : reserva de agua al final del período de cálculo

$R_{in}$ : reserva de agua al inicio del período de cálculo

La ecuación del balance hídrico puede simplificarse y adquirir varias formas como resultado de su agrupación, unificación o traslado de sus miembros con respecto al signo de igualdad. Hasta el punto de:

$$R_f = R_{in} + LI - ETP \quad (2)$$

Grassi (1998), menciona que se presentan dos condiciones adicionales en un balance hídrico:

$$(R_{in} + LI) - ETP > \text{Alm} \dots \text{Ex}$$

$$(R_{in} + LI) - ETP < 0 \dots \text{Def}$$

$$(R_{in} + LI) - ETP = 0 \dots \text{Ex} = 0 \text{ y } \text{Def} = 0$$

Donde:

LI: Precipitación ocurrida

ETP: Evapotranspiración

Alm: Máxima Capacidad de Almacenamiento del Suelo

Ex: Exceso

Def: Déficit

Según Grassi (1998), el balance conviene iniciarlo a continuación de un período en el cual los aportes superan notablemente a la evapotranspiración, en cuyo caso está colmada la capacidad de almacenaje del suelo; o, contrariamente, después

de un lapso durante el cual se han sucedido varios valores donde la Evapotranspiración (ETP) supera a la Precipitación, por lo que el almacenaje será nulo.

Las ecuaciones anteriormente expuestas se aplican a un balance puntal, es decir, una estación individual, sin embargo en los últimos años se han desarrollado balances edafoclimático espaciales aprovechando así la potencia de los SIG, Barrios (2006) presenta el modelo cartográfico a seguir para elaborar un balance edafo-climático espacialmente distribuido:

En el Mes de inicio

$$AT_n = AMAX + (PRE_n - ETP_n)$$

$$MAY_n = AT_n > AMAX$$

$$MEN_n = AT_n < 0$$

$$OK_n = (MAY_n + MEN_n) * NEG + POS$$

$$ALM_n = AMAX * MAY_n + AT_n * ((MAY_n + MEN_n) * NEG + POS)$$

$$DEFEXC_n = MAY_n * (AT_n - AMAX) + MEN_n * AT_n$$

Para los meses siguientes

$$AT_7 = ALM_{n-1} + (PRE_n - ETP_n)$$

$$MAY_n = AT_n > AMAX$$

$$MEN_n = AT_n < 0$$

$$OK_n = (MAY_n + MEN_n) * NEG + POS$$

$$ALM_7 = ALM_{n-1} * MAY_n + AT_n * (MAY_n + MEN_n) * NEG + POS$$

$$DEFEXC_7 = MAY_n * (AT_n - AMAX) + MEN_n * AT_7$$

Donde:

AT Almacenamiento del suelo tentativo

ALM Almacenamiento del suelo definitivo

PRE Precipitación

ETP Evapotranspiración

MAY Máscara indicando las celdas con  $AT > AMAX$

MEN	Máscara indicando las celdas con $AT < 0$
MM	Máscara indicando las celdas donde el AT debe ser corregido
OK	Máscara indicando las celdas donde el AT es correcto
POS	Raster 1
NEG	Raster de -1
n	Mes de cálculo respectivo
n-1	Mes anterior respectivo
AMAX	Almacenamiento máximo del suelo
DEFEX n	Capa Raster de Exceso/Déficit

## **6.2 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (Geographic Information System)**

Conjunto de métodos, herramientas y actividades que actúan coordinada y sistemáticamente para recolectar, almacenar, validar, manipular, integrar, analizar, actualizar, extraer y desplegar información, tanto gráfica como descriptiva de los elementos considerados, con el fin de satisfacer múltiples propósitos (Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2006).

## **6.3 CIENCIA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (Geographic Information Science)**

La Ciencia de Información Geográfica (CIG) puede ser definida como el campo de investigación fundamental que procura redefinir conceptos geográficos y su empleo en el contexto de sistemas de información geográficos (SIG). La CIG también examina los impactos de SIG sobre individuos y sociedad, y las influencias de sociedad sobre SIG. La CIG reexamina algunos temas más fundamentales en campos tradicionales espacialmente orientados, como la geografía, la cartografía, y la geodesia, incorporando acontecimientos muy recientes en la ciencia cognoscitiva y de la información. La CIG también se superpone y dibuja campos de investigación más especializados como la

informática, la estadística, matemáticas, y la psicología, y se contribuye para progresar en aquellos campos. Esto apoya la investigación en la ciencia política y la antropología, y utiliza aquellos campos en los estudios de información geográfica y sociedad (NCGIA, 1999).

#### **6.4 RASTER Y VECTOR**

Los SIG funcionan con dos tipos diferentes de estructuras de información geográfica:

- El modelo raster funciona a través de una retícula que permite asociar datos a una imagen; es decir, se pueden relacionar un conjunto de variables a los píxeles de una imagen digitalizada.
- En el modelo vectorial, la información sobre puntos, líneas y polígonos se almacena como una colección de coordenadas x,y. La ubicación de una característica puntual, pueden describirse con un sólo punto x,y. Las características lineales, pueden almacenarse como un conjunto de puntos de coordenadas x,y. Las características poligonales, pueden almacenarse como un circuito cerrado de coordenadas (Lycos, S/f), la figura 1 muestra una aproximación del los dos modelos de información geográfica.

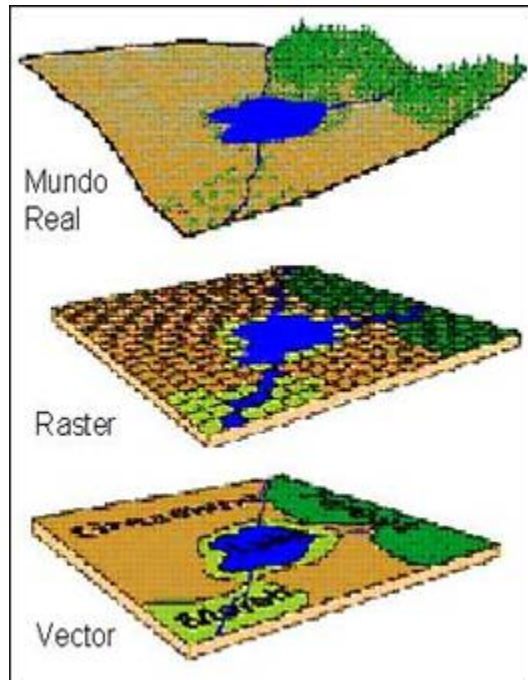


Figura 1. Aproximación de los dos modelos de información geográfica Raster y Vectorial.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## 6.5 INTERFAZ DE USUARIO (IU)

Según Larson (1992) citado por Rivera (2000), la IU es uno de los componentes más importantes de cualquier sistema computacional, pues funciona como el vínculo entre el humano y la máquina. La interfaz de usuario es un conjunto de protocolos y técnicas para el intercambio de información entre una aplicación computacional y el usuario. La IU es responsable de solicitar comandos al usuario, y de desplegar los resultados de la aplicación de una manera comprensible. La IU no es responsable de los cálculos de la aplicación, ni del almacenamiento, recuperación y transmisión de la información.

El éxito de un programa frecuentemente se debe a qué tan rápido puede aprender el usuario a emplear el software, de igual importancia es el que el usuario alcance sus objetivos con el programa de la manera más sencilla posible.



Es importante señalar que dentro del proceso de creación de la IU existen cuatro diferentes tipos de personas involucradas. La primera persona, y probablemente la más importante, es el *usuario final* o simplemente *usuario*. El usuario es quien va a utilizar el programa final. La segunda persona es aquella que crea la interfaz de usuario. Esta persona es conocida como *diseñador* o *arquitecto de la interfaz de usuario*. Trabajando muy cercanamente con el diseñador estará el *programador de la aplicación*, este será el encargado de la escritura del software del resto de la aplicación. Muy frecuentemente el diseñador utilizará herramientas especiales para la creación del software de la IU (como los *toolkits*), y estas herramientas son elaboradas por el *creador de herramientas*.

## 6.6 PROGRAMACIÓN FUNCIONAL (Ajacima et al, 2007 y Wikipedia, 2007.c)

El objetivo es conseguir lenguajes expresivos y *matemáticamente elegantes*, en los que no sea necesario bajar al nivel de la máquina para describir el proceso llevado a cabo por el programa, y evitando el concepto de *estado* del cómputo. La secuencia de computaciones llevadas a cabo por el programa se regiría única y exclusivamente por la *reescritura* de definiciones más amplias a otras cada vez más concretas y definidas, usando lo que se denominan "definiciones dirigidas".

Características:

Los programas escritos en un lenguaje funcional están constituidos únicamente por definiciones de funciones, entendiendo éstas no como subprogramas clásicos de un lenguaje imperativo, sino como funciones puramente matemáticas, en las que se verifican ciertas propiedades como la *transparencia referencial* (el significado de una expresión depende únicamente del significado de sus subexpresiones), y por tanto, la carencia total de *efectos laterales*.

Otras características propias de estos lenguajes son la no existencia de asignaciones de variables y la falta de construcciones estructuradas como la secuencia o la iteración (lo que obliga en la práctica a que todas las repeticiones de instrucciones se lleven a cabo por medio de funciones recursivas).

Existen dos grandes categorías de lenguajes funcionales: los funcionales *puros* y los *híbridos*. La diferencia entre ambos estriba en que los lenguajes funcionales híbridos son menos dogmáticos que los puros, al admitir conceptos tomados de los lenguajes imperativos, como las secuencias de instrucciones o la asignación de variables. En contraste, los lenguajes funcionales puros tienen una mayor potencia expresiva, conservando a la vez su transparencia referencial, algo que no se cumple siempre con un lenguaje funcional híbrido.

En programación funcional la aplicación de valores de entrada para valores de salida es alcanzado directamente. El Programa es una Función (o un grupo de funciones). Usualmente compuesto de Funciones más simples.

La relación entre las funciones es muy simple:

- Una Función puede llamar a otra Función, o el resultado de una Función puede ser usado como el argumento de otra Función.
- Las variables, comandos y efectos laterales son exclusivos.
- Los programas son escritos enteramente dentro del lenguaje de expresiones, funciones y declaraciones.

## **6.7 PROGRAMACIÓN ORIENTADA A OBJETOS (Ajacima *et al*, 2007 y Wikipedia, 2007.d)**

La Programación Orientada a Objetos (POO u OOP según siglas en inglés) es un paradigma de programación que define los programas en términos de "clases de objetos", objetos que son entidades que combinan *estado* (es decir, datos), *comportamiento* (esto es, procedimientos o métodos) e identidad (propiedad del objeto que lo diferencia del resto). La programación orientada a objetos expresa un programa como un conjunto de estos objetos, que colaboran entre ellos para

realizar tareas. Esto permite hacer los programas y módulos más fáciles de escribir, mantener y reutilizar.

De esta forma, un objeto contiene toda la información, (los denominados atributos) que permite definirlo e identificarlo frente a otros objetos pertenecientes a otras clases (e incluso entre objetos de una misma clase, al poder tener valores bien diferenciados en sus atributos). A su vez, dispone de mecanismos de interacción (los llamados métodos) que favorecen la comunicación entre objetos (de una misma clase o de distintas), y en consecuencia, el cambio de estado en los propios objetos. Esta característica lleva a tratarlos como unidades indivisibles, en las que no se separan (ni deben separarse) información (datos) y procesamiento (métodos).

## **6.8 ARRAY EN PROGRAMACIÓN (Tejeda, 2005 y Wikipedia, 2007.e)**

Vector, array, arreglo o alineación es un conjunto o agrupación de variables del mismo tipo cuyo acceso se realiza por índices. Los vectores o arrays de dos o más dimensiones se denominan matrices, que pueden tener tantas dimensiones como se desee; aunque lo correcto es llamarlo arreglo (de memoria) ya que una variable de más de dos dimensiones, no cumple con las características matemáticas de una matriz numérica.

Desde el punto de vista del programa, una matriz (array ó vector) es una zona de almacenamiento contiguo, que contiene una serie de elementos del mismo tipo, los elementos de la matriz. Desde el punto de vista lógico podemos considerarlas como un conjunto de elementos ordenados en fila. Así pues, en principio todas las matrices son de una dimensión, la dimensión principal, pero veremos que los elementos de esta fila pueden ser a su vez matrices (un proceso que puede ser recursivo), lo que nos permite hablar de la existencia de matrices multidimensionales, aunque las más fáciles de "ver" o imaginar son las de dos y tres dimensiones.

Puede afirmarse que las matrices son un recurso de programación simple y socorrido; en realidad pueden considerarse como las "estructuras" de datos más simples que cabe imaginar (todos los elementos del mismo tipo). Presentan la ventaja de que sus elementos son rápidamente accesibles, en especial si utiliza punteros en vez de subíndices, pero presentan una notable limitación: son de tamaño fijo; es preciso definir su tamaño desde el principio y no pueden ser fácilmente incrementadas o disminuidas sino mediante complejos procesos de copia.

Estas estructuras de datos son adecuadas para situaciones en las que el acceso a los datos se realice de forma aleatoria e impredecible. Por el contrario, si los elementos pueden estar ordenados y se va a utilizar acceso secuencial sería más adecuado utilizar una lista.

## 6.9 MATRICES EN PROGRAMACIÓN (Wikipedia, 2007.f)

Una matriz es un conjunto de elementos de cualquier naturaleza aunque, en general, suelen ser números ordenados en filas y columnas.

Se llama matriz de orden " $m \times n$ " a un conjunto rectangular de elementos  $a_{ij}$ , dispuestos en filas " $m$ " y en columnas " $n$ ". El orden de una matriz también se denomina dimensión o tamaño, siendo  $m$  y  $n$  números naturales.

Las matrices se denotan con letras mayúsculas: A, B, C, ... y los elementos de las mismas con letras minúsculas y subíndices que indican el lugar ocupado: a, b, c, ... Un elemento genérico que ocupe la fila  $i$  y la columna  $j$  se escribe  $a_{i,j}$ . Si el elemento genérico aparece entre paréntesis también representa a toda la matriz :  
A (i,j)

Cuando nos referimos indistintamente a filas o columnas hablamos de líneas. El número total de elementos de una matriz  $A_{m \times n}$  es  $m \cdot n$

## 6.10 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN C++

Es un lenguaje de programación de propósito general orientado a la programación de sistemas, C++ es un superconjunto del lenguaje de programación C que utiliza además de las utilidades de C utilidades flexibles y eficientes para la definición de nuevos tipos. Es un lenguaje definido como basado en objetos, es decir, técnicas que cuando se aplican dan lugar a programas más cortos, más fáciles de mantener y más fáciles de comprender (Stroustrup, 2002).

## 6.11 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN JAVA (Schildt, 2007)

Java es un lenguaje lanzado en el año 1995 por Sun Microsystem, el código de Java a diferencia de otros lenguajes de programación es que éste es un código ejecutable si no un código de *bytes*, es decir, es un código altamente optimizado de instrucciones diseñado para que sea ejecutado por el sistema Java en tiempo de ejecución. A dicho sistema se le denomina la máquina virtual de Java (Java Virtual Machine, JVM), la máquina virtual es un interprete de código de bytes.

## 6.12 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN PYTHON Y JYTHON

Python es un lenguaje de programación multiparadigma. Esto significa que más que forzar a los programadores a adoptar un estilo particular de programación, permite varios estilos: programación estructurada, programación funcional y programación orientada a aspectos. Otros muchos paradigmas más están soportados mediante el uso de extensiones. Una característica importante del Python es la resolución dinámica de nombres, lo que enlaza un método y un nombre de variable durante la ejecución del programa.

Otro objetivo del diseño del lenguaje era la facilidad de extensión. Nuevos módulos pueden ser fácilmente escritos en C o C++. Python puede ser utilizado como un lenguaje de extensión para módulos y aplicaciones que necesitan de una interfaz programable. Aunque el diseño de Python es de alguna manera hostil a la

programación funcional tradicional del Lisp (segundo lenguaje de programación, después de Fortran, de alto nivel Lisp es un acrónimo de "LIStProcessing"), existen bastantes analogías entre Python y los lenguajes minimalistas de la familia del Lisp como puede ser Scheme (Python Software Foundation, 2007 y Wikipedia, 2007.g).

Por otro lado se encuentra Jython (Python en Java) es un lenguaje de programación de alto nivel, dinámico y orientado a objetos basado en Python e implementado en Java (100%), su antecesor fue JPython, Jython al igual que Python es un proyecto de código libre. El lenguaje de programación Jython funciona prácticamente igual que el lenguaje Python, en su versión 2.1 (McGrath, 2007 y Wikipedia.a, 2007.i).

### **6.13 HERRAMIENTAS Y DESARROLLO DE HERRAMIENTAS**

El nivel más avanzado de usuario de SIG es el de programador de SIG. En proyectos grandes y complejos, las herramientas disponibles en un SIG pueden no ser suficientes, por tanto el usuario necesita incorporar sus propios módulos (SIGMA Consultores, 2006).

### **6.14 DIFERENCIA DE MEDIAS CON DATOS INDEPENDIENTES**

Cuando trabajamos con datos cuantitativos y deseamos saber si existen diferencias entre dos grupos empleamos el contraste conocido como diferencia de medias. Con esta comparación de las medias lo que tratamos de comprobar es si ambas muestras proceden de una misma población, y por lo tanto las diferencias observadas a nivel muestral son debidas al azar, o si las muestras proceden de dos poblaciones diferentes.

Consideramos dos grupos como independientes cuando los sujetos han sido asignados al azar a cada uno de los grupos y por tanto no hay motivo para pensar que entre ellos puede haber alguna relación (correlación nula) (UNIOVI, 2000).

## 6.15 ARCVIEW-GIS (ESRI, 2007)

ArcView es una herramienta SIG con la que se puede visualizar, analizar, crear y gestionar información geográfica. La mayoría de la información posee una componente que puede relacionarse con un lugar geográfico: direcciones, códigos postales, posiciones de GPS, secciones censales, ciudades, regiones, países u otro tipo de localizaciones. ArcView permite visualizar, explorar y analizar estos datos, revelando patrones, relaciones y tendencias que no se aprecian bien en bases de datos, hojas de cálculo o conjuntos estadísticos.

ArcView puede ayudar a responder cuestiones como:

- ¿Dónde están mis clientes?
- ¿Cuál es el impacto medioambiental de una nueva explotación?
- ¿Dónde debería abrir nuevas tiendas o negocios?
- ¿Quién se ve afectado en una emergencia?
- ¿Cuál es la mejor manera de responder a un apagón?
- ¿Cuáles son las áreas de mayor tráfico en una ciudad?
- ¿Qué impuestos debe pagar determinada parcela?

ArcView es utilizado por gente en todo el mundo en numerosos sectores de mercado y en diferentes aplicaciones.

## **6.16 SPSS (SPSS INC, 2007)**

El programa SPSS (Statistical Product and Service Solutions) es un conjunto de potentes herramientas de tratamientos de datos y análisis estadístico. Al igual que el resto de las aplicaciones que utilizan como soporte el sistema operativo Windows, el SPSS funciona mediante menús desplegables y cuadros de diálogo que permiten hacer la mayor parte del trabajo utilizando el puntero del ratón.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

C.C.Reconocimiento



## 7. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el logro de los objetivos plantados se plantea la metodología presentada en la figura 2:

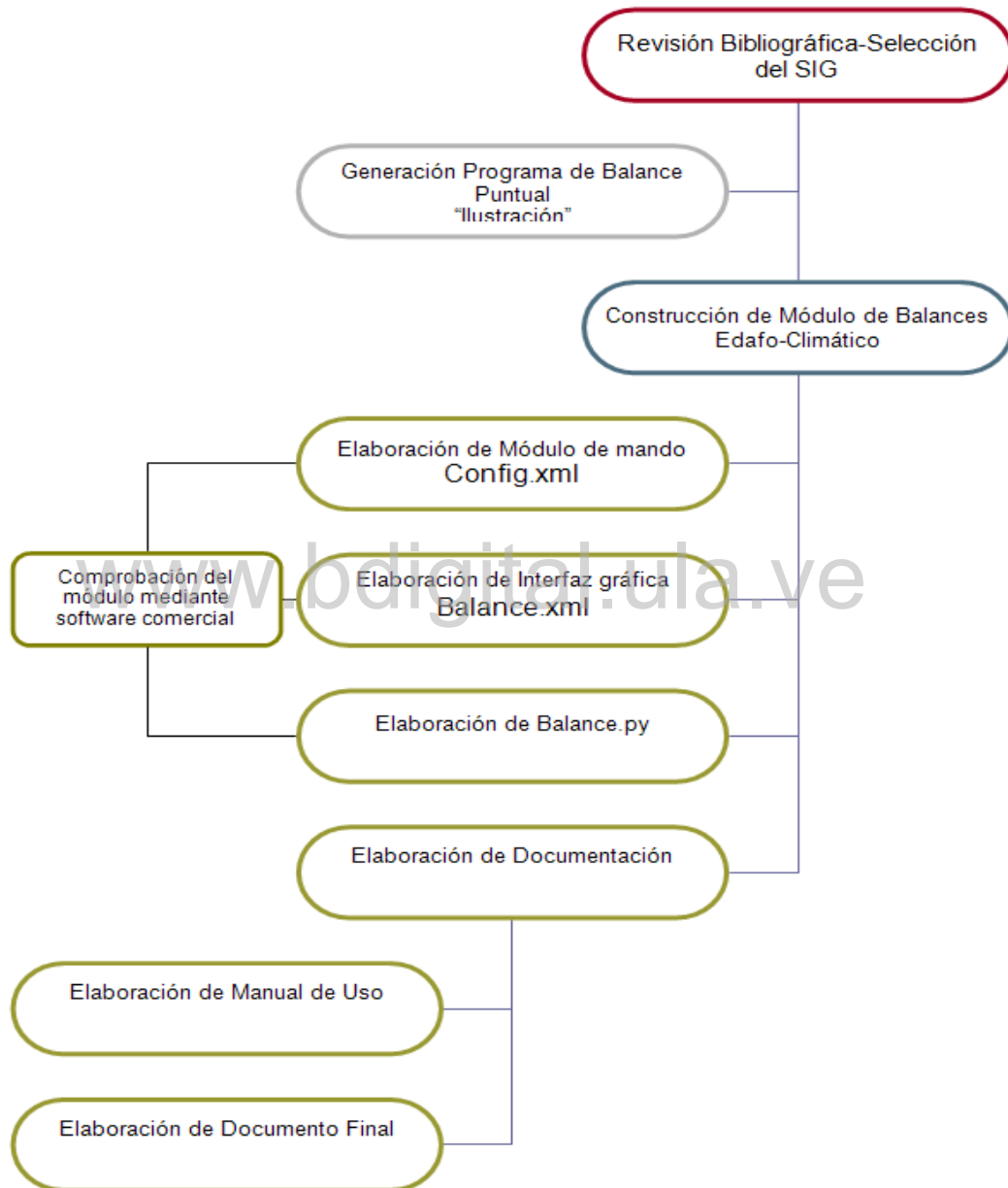


Figura 2. Estructura general de la metodología aplicada

## 7.1 EQUIPOS

1 Computadora portátil Pentium IV de 1.7 Ghz, Disco Duro de 80 GB y 768 MB de Memoria RAM, Sistema Operativo Linux Debian.

1 Computadora de escritorio con un procesador AMD 2 Duo de 2.2Ghz, Disco duro de 200 GB y 2GB, Sistema Operativo

## 7.2 SELECCIÓN DEL SIG

A fin de realizar una apropiada selección del Sistema de Información Geográfico se evaluaron las bondades y limitaciones de diversos paquetes con licencia GNU ó GLP, en total se evaluaron las características de ocho programas SIG libres que se mencionan a continuación:

- SAGA GIS 1.0; 1.2 y 2.0
- Sextante 1.0
- JGRASS 2.0
- GVSIG 1.0.2
- UDIG 1.1.0
- Quatum GIS
- JUMP 1.1
- GRASS 6.0

El cuadro 1 muestra un resumen de las características de cada uno de los SIG evaluados.

Cuadro 1. Resumen de las características generadas de diversos SIG libres

SIG	Lenguaje	Formatos que acepta	Sistema Operativo	Interfaz Usuario	Estado de desarrollo actual	Otras características relevantes
SAGA GIS	C++	Raster/Vector	Linux, Windows	Amigable	Suspendido	Suspendido para fusionarse con GVSIG y Sextante
Sextante	C++	Raster/Vector	Linux, Windows	Amigable	Suspendido	Versión de SAGA en español Suspendido para fusionarse con GVSIG y SAGA
JGRASS	Java	Raster/Vector	Linux, Windows, otros	Poco amigable	Suspendido	Suspendido para fusionarse con UDIG
GVSIG	Java, Python y Jython	Raster/Vector	Linux, Windows, otros	Amigable	Versión Estable	En español
UDIG	Java	Vector	Linux, Windows, otros	Amigable	Experimental	Plataforma de programación Eclipse
Quantum GIS	C++	Raster/Vector	Linux, Windows, otros	Amigable	Versión Estable	
JUMP	Java	Vector	Linux, Windows, otros	Amigable	Versión Estable no actualizada	
GRASS 6	C++	Raster/Vector	Linux	Poco amigable	Versión Estable	

Originalmente SAGA GIS y GRASS GIS debido a poseer un formato de análisis raster bien desarrollado fueron preseleccionados, pues ambos poseen análisis raster bien desarrollado (Interpoladores, Álgebras de Mapas, etc), sin embargo debieron ser descartados debido a:

- La fusión de SAGA GIS, y Sextante con GVSIG en noviembre del 2006 para de manera de incluir en GVSIG las herramientas de SAGA GIS y Sextante.
- El defecto fundamental de GRASS GIS es su interfaz de usuario, la cual es poco amigable y muy difícil de usar, es por ello que se descarta el uso del mismo debido a que esto está en contra del objetivo buscado por este proyecto.
- Otro elemento adicional es que muchos de los programas SIG libres fueron programados con el lenguaje de programación C++ (SAGA GIS y GRASS GIS) lo que dificulta la elaboración de la plataforma de desarrollo, esto

debido a la poca disponibilidad de las librerías necesarias y las múltiples complicaciones que hay que realizar para establecer una plataforma de desarrollo de condiciones adecuadas, este problema se presentó al compilar el software SAGA GIS para establecer una plataforma de desarrollo.

Es por ello, que con el fin de minimizar el problema de establecer una plataforma de desarrollo adecuada se formularon un conjunto de requerimientos básicos que debe cumplir el programa SIG, estos son:

- SIG de software libre de versión estable
- Capaz de soportar formato raster (grid)
- Lenguaje de Programación del SIG debe ser Java o algún lenguaje interpretado (Python ó Jython)
- Su desarrollo no debe estar suspendido

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

De los ocho SIG originalmente analizados únicamente GVSIG 1.0.2 cumple con los requerimientos preestablecidos, por ello se eligió este SIG como la plataforma a desarrollar. Es de destacar que este software tiene incluidas las actualizaciones Piloto Raster y sextante\_gvsig\_01b.jar, la primera es una actualización para diversos formatos raster tales como ASCII Raster, Binari Raster, entre otros, y la segunda es un conjunto de 161 extensiones desarrolladas para Sextante que fueron rescritas para GVSIG 1.0.2

### 7.3 GENERACIÓN DEL PROGRAMA DE BALANCE PUNTUAL “ILUSTRACIÓN”

A fin de estudiar el problema planteado se realizó una aproximación del balance edafoclimático, esto con el fin de analizar la dificultad del mismo y la posible estructura de trabajo necesaria para analizarlo. El compilador utilizado para la programación fue Visual Studio 6.0 y el lenguaje de programación usado fue C++. En la figura 3 se ilustra la estructura lógica de los vectores aplicados para éste programa (en el Apéndice 1 se presenta el código fuente del mismo).

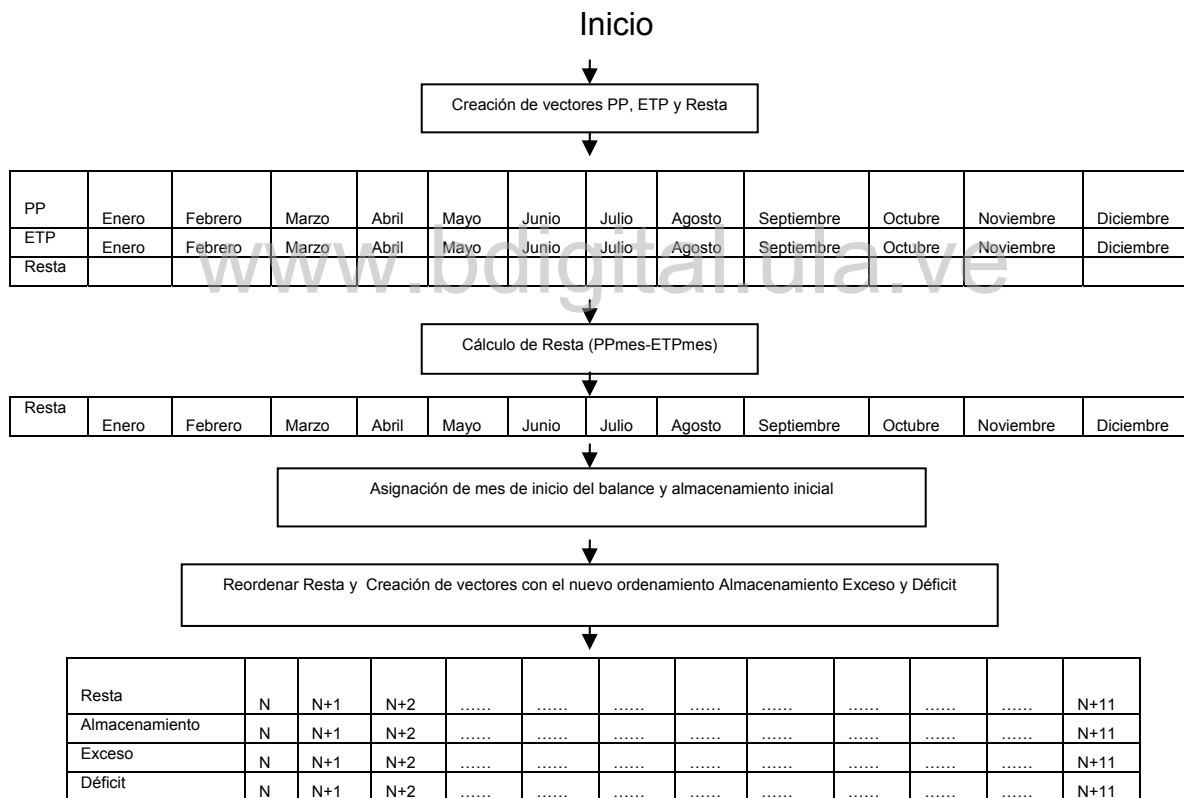


Figura 3. Estructura general del programa de balance Edafoclimático puntual

Este programa se basó en la aplicación de vectores que funcionan como casillas de información, donde se almacenan los datos de precipitación mensual, ETP mensual, almacenamiento mensual, exceso y déficit. Se crearon tres vectores

para pre-procesar la data y ofrecerle al usuario la información para el mes de inicio, estos vectores son:

1. Vector para introducir los datos de precipitación por mes (mes inicio Enero, mes final Diciembre)
2. Vector para introducir los datos de ETP por mes (mes inicio Enero, mes final Diciembre)
3. Vector RESTA precipitación menos ETP por mes (mes inicio Enero, mes final Diciembre)

Posteriormente se generó un algoritmo de procesamiento que se activa luego de que el usuario ingresa el valor de almacenamiento de inicio y asigna el mes de inicio del balance de su preferencia, este código reordena el vector Resta partiendo del mes asignado por el usuario como de inicio del balance y crea tres vectores, Almacenamiento, Exceso y Déficit, éstos últimos son calculados a partir de la ejecución de unas condicionales (if), de forma tal de dirigir la aplicación de las ecuaciones y de almacenar correctamente en los vectores correspondientes la información calculada, las condicionales aplicadas son:

- Si el almacenamiento del mes anterior es igual al almacenamiento máximo y la resta entre precipitación y ETP (Resta) es mayor o igual que cero entonces Resta es igual a Exceso.
- Si el almacenamiento del mes anterior es igual a cero y la resta entre precipitación y ETP (Resta) es menor que cero entonces Resta es igual a Déficit.
- Si el almacenamiento del mes anterior es mayor que 0 y menor que el almacenamiento máximo y la Resta es mayor que cero entonces almacenamiento del mes es igual a resta, hasta que este llegue al almacenamiento máximo, si existe un sobrante el mismo se convierte en Exceso.
- Si el almacenamiento del mes anterior esta entre 0 y el almacenamiento máximo y la precipitación es menor que cero entonces el almacenamiento

dona agua hasta llegar a cero, si todavía existe un sobrante éste se convierte en Déficit.

#### **7.4 CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DE BALANCES EDAFO-CLIMÁTICO**

Aunque originalmente se planteó la programación modular, este estilo se descartó debido a que GVSIG impone un estilo de programación que es un híbrido entre programación orientada a objetos y programación funcional, por ello se adoptó éste estilo de programación, para el desarrollo del módulo de Balances Edafoclimático.

Para construir el módulo de balances edafoclimáticos se partió del código fuente de un módulo del SIG previamente elaborado por GVSIG denominado Centrar Vista Sobre un Punto, así como del código fuente de GVSIG (ambos descargados del sitio oficial de GVSIG) (Consellería d'Infraestructures i Transport, 2007) y utilizando el manual Guía de Scripting Versión 2 GVSIG 1.0 (Consellería d'Infraestructures i Transport, 2007) como instructivo de diseño de trabajo; adicionalmente se establecieron unos requerimientos básicos del módulo a elaborar, éstos se presentan a continuación:

- 12 mapas raster de precipitación interpolados previamente por el usuario
- 12 mapas raster de Evapotranspiración interpolados previamente por el usuario
- 1 mapa raster de almacenamiento inicial elaborado previamente por el usuario
- Todos los raster deben ser cuadrados (es decir mismo número de filas y columnas con el mismo tamaño de píxel y el mismo sistema de coordenadas y proyección).

El desarrollo del módulo se realizó en Linux Debian, esto con el fin de localizar fácilmente los errores de programación, mediante la uso de la consola de este sistema operativo.

Posteriormente se procedió a construir el módulo Balance, éste módulo está estructurado en tres secciones, Config.xml; Balance.xml y Balance.py, la figura 4 muestra la estructura general del módulo de Balance en orden de mando descendente.

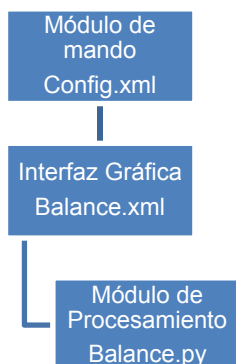


Figura 4. Estructura General del Módulo de Balance.

A continuación se presenta la estructura lógica y función de cada uno de los archivos:

Módulo de Mando (Config.xml): sus funciones son la inserción en el menú principal de GVSIG 1.0.2, así como hace también el llamado a su archivo de rango inferior Balance.xml, para acceder al código fuente ver (Apéndice 2).

Interfaz Gráfica (Balance.xml): es la Interfaz gráfica del módulo está desarrollado bajo los términos presentados en el Manual Guía de Scripting Versión 2 GVSIG 1.0 (Consellería d'Infraestructures i Transport, 2007), en esta guía se sugiere el desarrollo del módulo gráfico utilizando los términos dados por la librería gráfica Thinlet (2007), adicionalmente este archivo (Balance.xml) llama a Balance.py. Para acceder al código fuente de Balance.xml ver Apéndice 3. En la figura 5 se presenta la estructura general de la interfaz gráfica generada.



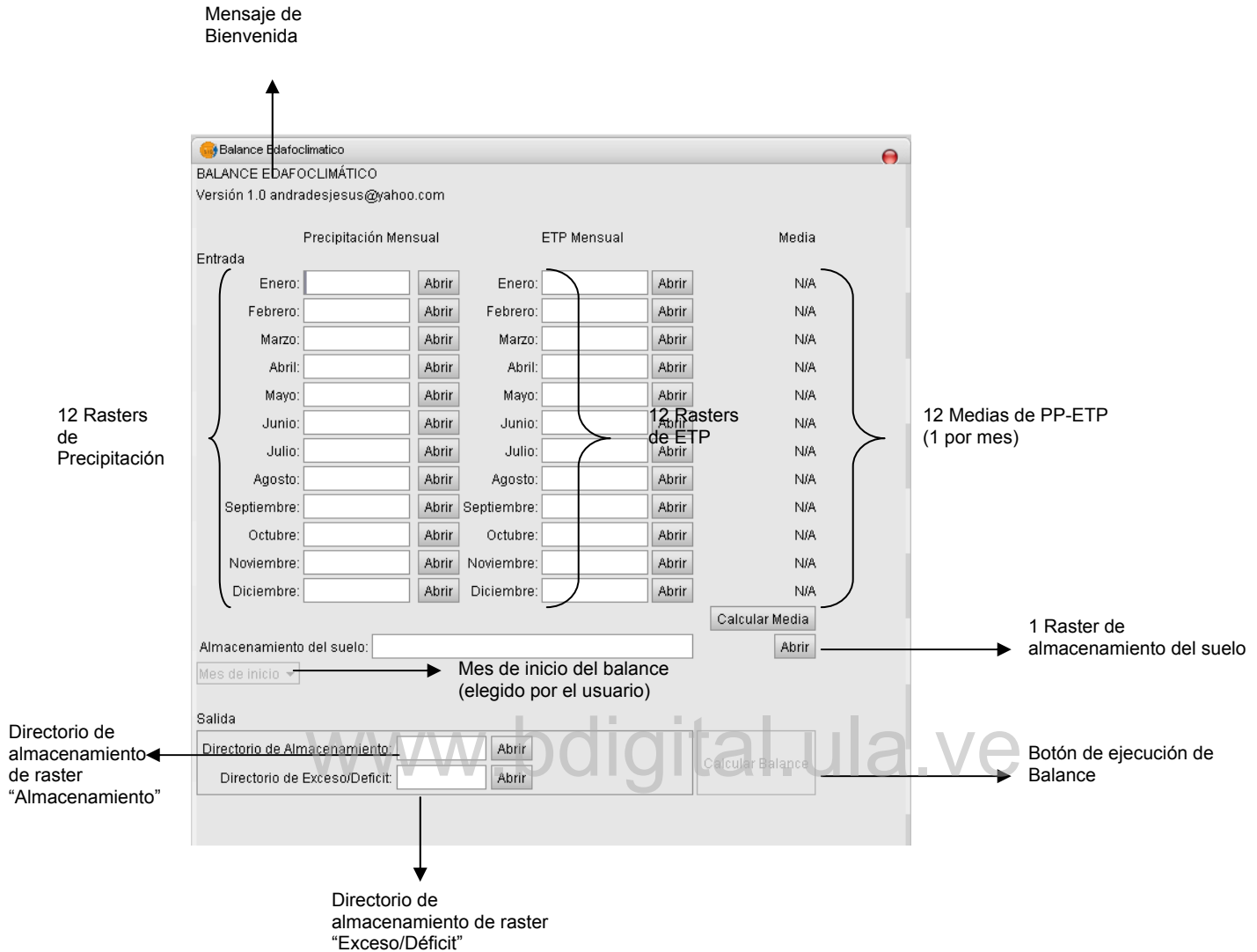


Figura 5. Estructura de la interfaz gráfica generada

Módulo de Procesamiento (Balance.py) (ver Apéndice 4): Es un archivo desarrollado en Python, que contiene los procesos de ejecución del balance espacialmente distribuido, para el desarrollo del mismo se tenían dos alternativas:

- o Generar un código que calcule Excesos/Déficit y Almacenamiento utilizando las ecuaciones sugeridas por Grassi (1998) y ampliándolas a un conjunto de  $n$  píxeles.

- o Generar un código que calcule Excesos/Déficit y Almacenamiento utilizando análisis matricial y las ecuaciones sugeridas por Barrios (2006).

Para fines prácticos se aplicaron las ecuaciones sugeridas por Barrios (2006).

La figura 6 presenta la estructura general del Balance.py

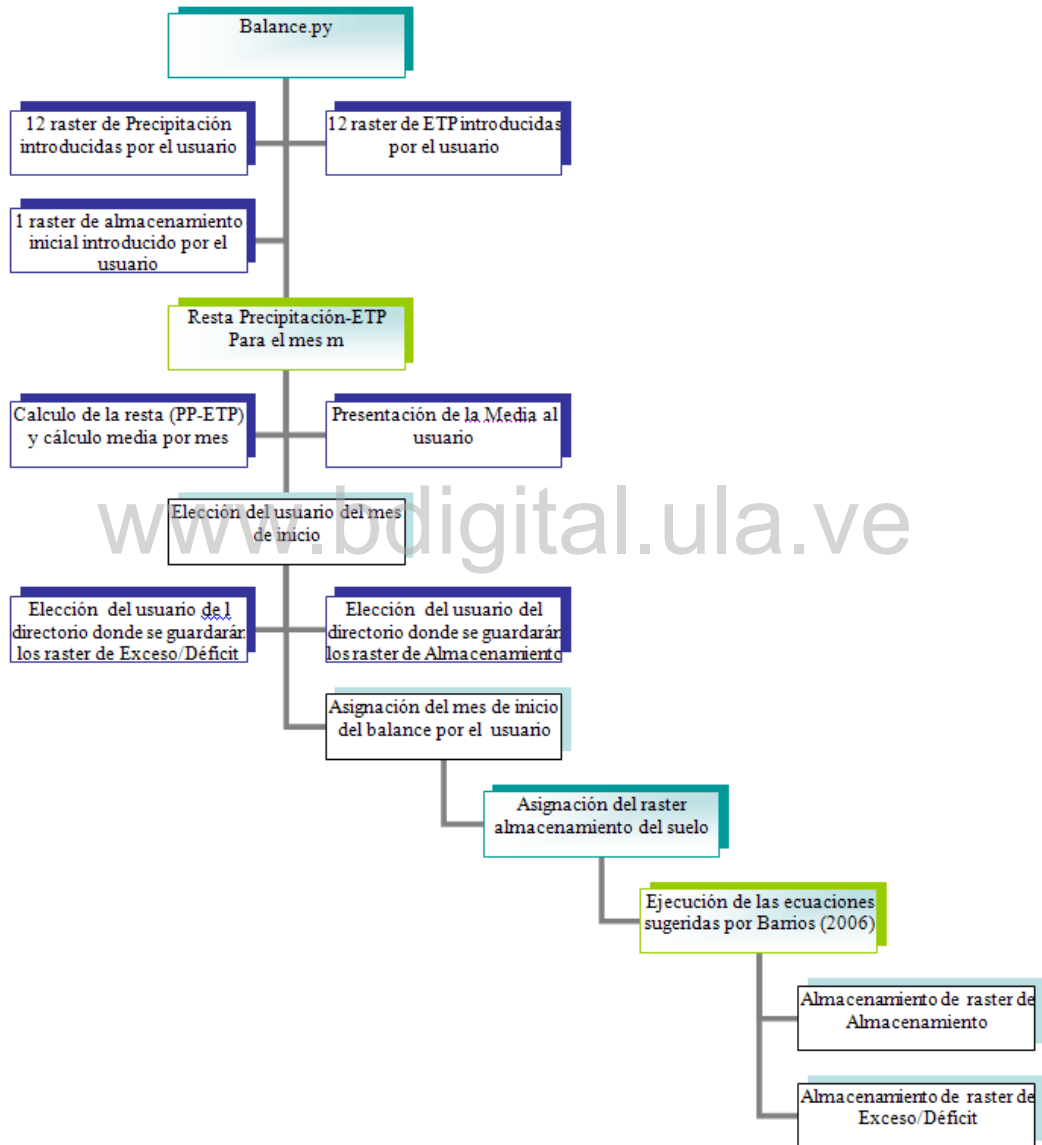


Figura 6. Estructura general del Balance.py

De la figura 6 se destacan cuatro fases explicadas a continuación:

- Entrada de raster a GVSIG 1.0.2: La forma de reconocer la entrada del raster se generó usando un enlace con el archivo del código fuente GeoRasterFile.Jar.
- Cálculo de la resta (PP-ETP) y cálculo media por mes: dado que se decidió que el usuario es el que va a elegir el mes de inicio del balance debido a la imposibilidad de conocer cuál es el criterio técnico que quiera tomar en cuenta el para el arranque del mismo, es por ello que se decidió restar PP-ETP para el mes m, donde m va de 1 a 12

$$CL1 = PP1-ETP1$$

$$CL2 = PP2-ETP2$$

$$CL3 = PP3-ETP3$$

.

.

.

$$CL12 = PP12-ETP12$$

$$CLn = PPn-ETPn$$

$$PCLn = CLn/Area$$

Donde

CLn es la resta de la PP menos ETP para el mes n

PP es la precipitación mensual para el mes n

ETP es la evapotrasnpiración para el mes n

Area: Area total que ocupa el Grid

PCLn es el promedio mensual de CL (mm/Unidades área)

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

Si a esos resultados se le divide entre el número de píxeles los resultados muestran la media por mes (mm/Unidades área), estos valores se le presentan al usuario de manera de que éste pueda elegir el mes de arranque.

- Selección del mes de inicio: debido a que era poco recomendable que el módulo seleccionara automáticamente el mes de inicio del balance, debido a que la selección del mes de arranque está determinado por el conocimiento del área que tenga el usuario y que existen 12 posibles combinaciones de inicio (ver cuadro 2), se decidió que el usuario eligiera el mes de inicio.
- Aplicación de arreglo (mes inicio elegido por el usuario al mes final): Ya elegido el año de inicio por el usuario se llama a un vector, debido a las 12 posibilidades de ejecución del balance estas se presentan en el cuadro 2

Cuadro 2. Posibles combinaciones en el arranque del balance edafoclimático

Posibilidad	Mes Inicio	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10	Mes 11	Mes 12
1	En	Feb	Marz	Ab	May	Jun	Jul	Ag	Spt	Oct	Nov	Dic
2	Feb	Marz	Ab	May	Jun	Jul	Ag	Spt	Oct	Nov	Dic	En
3	Marz	Ab	May	Jun	Jul	Ag	Spt	Oct	Nov	Dic	En	Feb
4	Ab	May	Jun	Jul	Ag	Spt	Oct	Nov	Dic	En	Feb	Marz
5	May	Jun	Jul	Ag	Spt	Oct	Nov	Dic	En	Feb	Marz	Ab
6	Jun	Jul	Ag	Spt	Oct	Nov	Dic	En	Feb	Marz	Ab	May
7	Jul	Ag	Spt	Oct	Nov	Dic	En	Feb	Marz	Ab	May	Jun
8	Ag	Spt	Oct	Nov	Dic	En	Feb	Marz	Ab	May	Jun	Jul
9	Spt	Oct	Nov	Dic	En	Feb	Marz	Ab	May	Jun	Jul	Ag
10	Oct	Nov	Dic	En	Feb	Marz	Ab	May	Jun	Jul	Ag	Spt
11	Nov	Dic	En	Feb	Marz	Ab	May	Jun	Jul	Ag	Spt	Oct
12	Dic	En	Feb	Marz	Ab	May	Jun	Jul	Ag	Spt	Oct	Nov

Por ello se generó un vector (ver figura 7) que inicia en el mes elegido por el usuario *posición 0* y finaliza en la *posición 11* y en el cual se asigna el raster correspondiente de precipitación para el mes  $m$ , el raster correspondiente de evapotranspiración para el mes  $m$  y el raster de almacenamiento (mes anterior ( $m-1$ ) y mes inicial si es el caso) de manera de calcular el raster de exceso/déficit del mes  $m$  y el raster de almacenamiento del mes  $m$ .

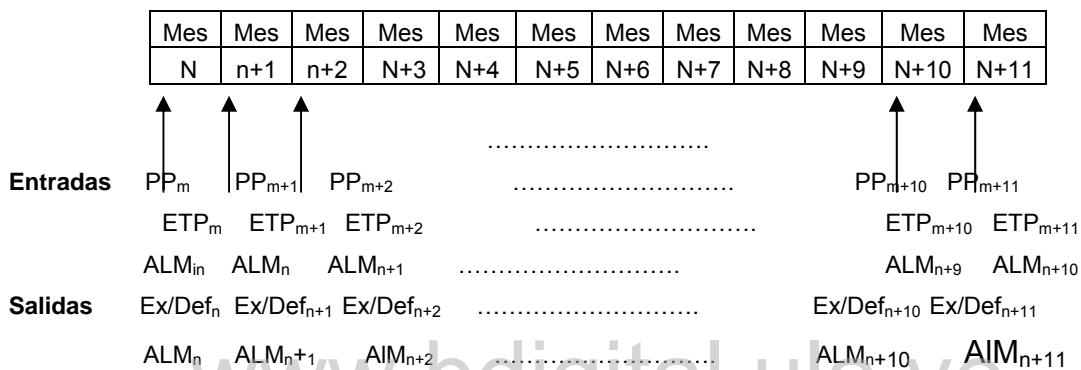


Figura 7. Estructura del funcionamiento del módulo para el mes elegido por el usuario para arranque del mismo

Almacenamiento de raster producidos por el módulo Balance: a fin de facilitar el almacenamiento de los raster producidos se decidió generar dos procesos de almacenamiento masivo, el primero para Almacenamiento del suelo y el segundo para Exceso/Déficit, para ello el usuario debe definir una carpeta de almacenamiento para cada grupo de raster (Almacenamiento del suelo y Exceso/Déficit). El módulo diseñado solamente puede utilizar el formato raster ASCII raster (.asc), debido a que éste es un formato de fácil manejo y creación, los raster de salida almacenados también poseen el mismo formato. Es de destacar que para la creación de los mapas raster creados por el módulo se utilizaron los

comandos en python, de forma de transferir los datos básicos de los raster de entrada a los raster de salida:

*ncols* para escribir el número de columnas del raster

*nrows* para escribir el número de filas

*xllcorner* Coordenada X de la esquina inferior izquierda del raster

*yllcorner* Coordenada Y de la esquina inferior izquierda del raster

*cellsize* Tamaño del píxel

*NODATA\_value*"\t-9999\n" Escritura de los valores en blanco No Data

A fin de facilitar la velocidad de almacenamiento de los raster generados en memoria módulo se utilizó en el código de escritura del Python 2 posiciones decimales por píxel.

## 7.5 COMPROBACIÓN DEL MÓDULO MEDIANTE SOFTWARE COMERCIAL

A fin de comprobar el correcto funcionamiento del módulo, se probó utilizando los mapas raster generados por los proyectos Prosalafa II y Estudio Socio Ambiental Específico de la Refinería Batalla de Santa Inés y la Generación de un Polo de Desarrollo Regional, Sustentable. El proyecto Prosalafa II posee los mapas raster (Precipitación y ETP) del tamaño de píxel de 500 m para los estados Lara y Falcón y sus inmediaciones. Su característica principal es que, dado que en esta área se concentra una gran parte del semiárido de Venezuela, los balances típicamente producirán déficit. El caso del Proyecto Estudio Socio Ambiental Específico de la Refinería Batalla de Santa Inés y la Generación de un Polo de Desarrollo Regional, Sustentable es que éste se ubica en la zona de Barinas y el Piedemonte andino donde los balances en la gran mayoría de los meses producirán Exceso. Estos los mapas raster poseen un tamaño del píxel de 250 m. Se eligieron ambas zonas para comprobar el correcto funcionamiento del módulo, debido a:

- Las dos zonas poseen climas bien contrastantes los estados Lara y Falcón presentan un clima árido y semiárido, mientras que en Barinas predomina el clima húmedo de los llanos Occidentales y el Piedemonte Andino.
- Poseen mapas raster de distinto tamaño del píxel (500 m en el primer caso y 250 m en el segundo)

Los datos utilizados de almacenamiento máximo (AMAX) son mapas raster de valores constantes para ambas áreas de trabajo (Lara-Falcón y Barinas), valores de 0 mm de almacenamiento del suelo Lara-Falcón y valores de 100 mm de almacenamiento del suelo para Barinas. En cuanto al mes de inicio del Balance se utilizó el criterio sugerido por Grassi (1998):

- Para Lara-Falcón, que es una zona donde la ETP supera sustancialmente la Precipitación, el mes de inicio seleccionado es marzo debido a que es el mes más seco del año.
- Para Barinas, que es una zona donde la Precipitación supera sustancialmente la ETP, el mes de inicio seleccionado es junio debido a que es el mes más húmedo del año.

Para poder verificar el correcto funcionamiento del módulo se aplicaron dos comparaciones:

- Comparación de la media entre PP-ETP de forma manual utilizando el álgebra de mapas de ArcView 3.2 y el cálculo de las estadísticas descriptivas contra los datos dados por el módulo de Balances Edafoclimático en GVSIG 1.0.2 en el cálculo de la media entre PP-ETP. Si los resultados son iguales o aproximadamente iguales el funcionamiento del módulo hasta esta fase es correcto.

Para validar estadísticamente el proceso de información preliminar dada al usuario se planteó la siguiente prueba de hipótesis:

H0: La Media PP-ETP automático del mes n = Media PP-ETP del mes n manual

H1: La Media PP-ETP automático del mes n  $\neq$  Media PP-ETP del mes n manual

Si se acepta H0 se obtiene que el módulo información preliminar generado tiene un correcto funcionamiento, en caso de que se acepte la alternativa se acepta lo contrario.

- Aplicando las en las ecuaciones sugeridas por Barrios (2006) para el cálculo del Balance Edafoclimático espacial de forma manual a las superficies producidas por los proyectos Prosalafa II y Estudio Socio Ambiental Específico de la Refinería Batalla de Santa Inés y la Generación de un Polo de Desarrollo Regional, Sustentable usando el álgebra de mapas de ArcView 3.2 y comparar los resultados con los mapas raster de almacenamiento y Exceso/Déficit e iniciando en el mismo mes de inicio que en el módulo automatizado producido para GVSIG 1.0.2, si los resultados son iguales o aproximadamente iguales el funcionamiento del módulo es correcto. Para la extracción de la data a comparar se utilizó la extensión Grid Analyst Extensión (Ver 1.1) de ArcView 3.2, esta extensión posee una herramienta denominada **Extract X,Y, and Z values for point theme from Grid Theme**, la misma extrae los datos de X,Y y Z de un raster a partir de un vector de punto. El uso de ésta herramienta funcionó para extraer los datos de Exceso/Déficit producidos manualmente y los resultados dado por el módulo de Balances Edafoclimático a fin de compararlos. Los puntos que se usaron para la extracción fueron los mismos que se usaron para interpolar los raster:



- 175 estaciones para Lara-Falcón
- 87 estaciones para Barinas

Con el fin de demostrar el correcto funcionamiento del módulo se realizó una prueba de de igualdad de medias utilizando la siguiente prueba de hipótesis:

H0: Exceso/Déficit = Exceso/Déficit del mes n manual

H1: Exceso/Déficit del mes n automático  $\neq$  Exceso/Déficit del mes n manual

Si se acepta H0 se obtiene que el módulo generado tiene un correcto funcionamiento, en caso de que se acepte la alternativa se acepta lo contrario.

El equipo utilizado en esta fase fue una computadora de escritorio con un procesador AMD 2 Duo de 4.2Ghz, Disco duro de 200 GB y 2GB, Sistema Operativo Windows XP

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## **7.6 ELABORACIÓN DE MANUAL DE USO DEL MÓDULO**

Para facilitar la utilización del módulo por parte del usuario final se generó un manual de uso del mismo, éste manual va desde su instalación hasta su uso definitivo (ver Apéndice 5). Como se mencionó anteriormente los datos de entrada al módulo son:

- 12 raster de precipitación interpolados previamente por el usuario en formato ASCII raster
- 12 raster de Evapotranspiración interpolados previamente por el usuario en formato formato ASCII raster
- 1 raster de almacenamiento inicial elaborado previamente por el usuario en formato formato ASCII raster

Los requerimientos del sistema son:

- PC Pentium IV o superior con de 256 MB de RAM se recomienda 512 MB de RAM
- Tener Instalado GVSIG 1.0.2 o versión superior
- Tener Instalado la Extensión Piloto Raster
- Tener Instalado el conjunto de extensiones sextante\_gvsig\_01b1 o superior

Los resultados del módulo son: 12 mapas Raster de Exceso/Déficit y 12 de almacenamiento del suelo.

Es de destacar que para obtener los raster de precipitación y ETP el usuario debe crearlos partiendo de data climática de carácter puntual, para realizar este proceso se debe completar el proceso teórico que se presenta en el apéndice 6, el cual muestra el diagrama de flujo teórico para la creación de un raster interpolado, y su posterior exportación a formato ASCII raster.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## 8. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 8.1 VALIDACIÓN DEL PROCESO DE CÁLCULO DE LA RESTA (PP-ETP) Y CÁLCULO DE LA MEDIA POR MES

En el Cuadro 3 se presentan los resultados de las medias entre la diferencia de Precipitación-ETP en milímetros, dadas para ambas zonas mediante la aplicación de ambos procesos (manual y automatizado). En ambas zonas y se observan valores que son visualmente idénticos para cada mes, lo cual ilustra el correcto funcionamiento del módulo en esta fase.

Cuadro 3. Resultados dados para el cálculo de la Media PP-ETP (mm) para las zonas de Barinas y el Semiárido de Lara-Falcón de forma manual en ArcView 3.2 y de forma automatizada

Mes	Barinas		Lara-Falcón	
	Manual	Automatizado	Manual	Automatizado
Enero	-118,2	-118,18	-128,15	-128,01
Febrero	-114,2	-114,23	-132,85	-132,70
Marzo	-107,3	-107,32	-151,01	-150,84
Abril	10,7	10,68	-93,29	-93,19
Mayo	115,5	115,47	-53,99	-53,93
Junio	159,8	159,82	-62,21	-62,23
Julio	143,3	143,30	-74,58	-74,50
Agosto	117,0	116,96	-69,16	-69,08
Septiembre	78,8	78,78	-43,8	-43,79
Octubre	69,8	69,82	-21,06	-21,03
Noviembre	-2,8	-2,76	-34,66	-34,62
Diciembre	-71,6	-71,62	-78,80	-78,71

Se observa que en la zona de Barinas los meses de Enero a Marzo y Noviembre y Diciembre presentan valores negativos mientras que los restantes meses presentan valores positivos, este comportamiento es propio de la zona húmeda.

Por otro lado, se destaca también la zona de Lara-Falcón donde a través del año la ETP es mayor que la Precipitación presentando así valores negativos en su media, causados por el clima semiárido y árido que domina esa zona. Estos fenómenos se observan claramente en las figuras 8 y 9.

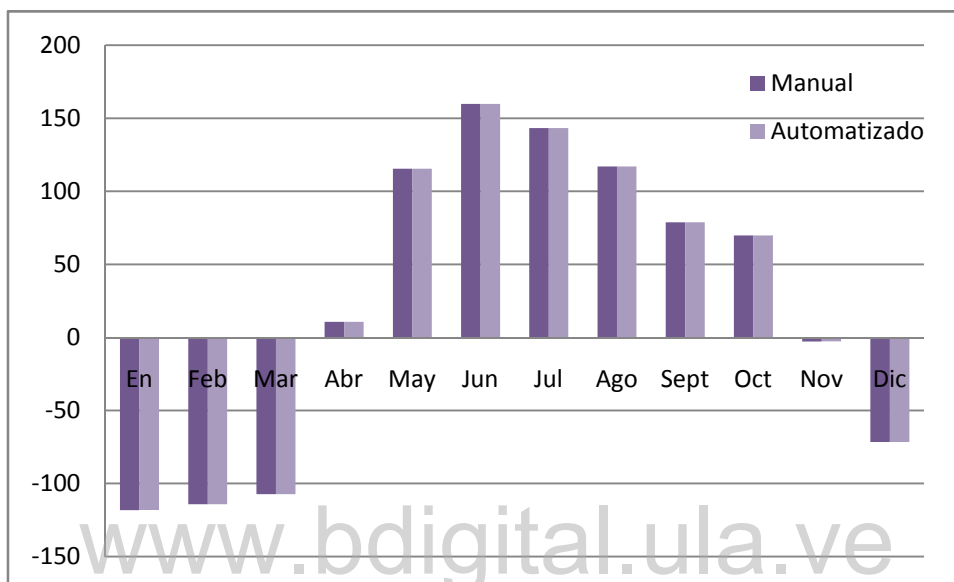


Figura 8. Variación de la Media PP-ETP (mm) para las zonas de Barinas calculada de forma manual en ArcView 3.2 y de forma automatizada

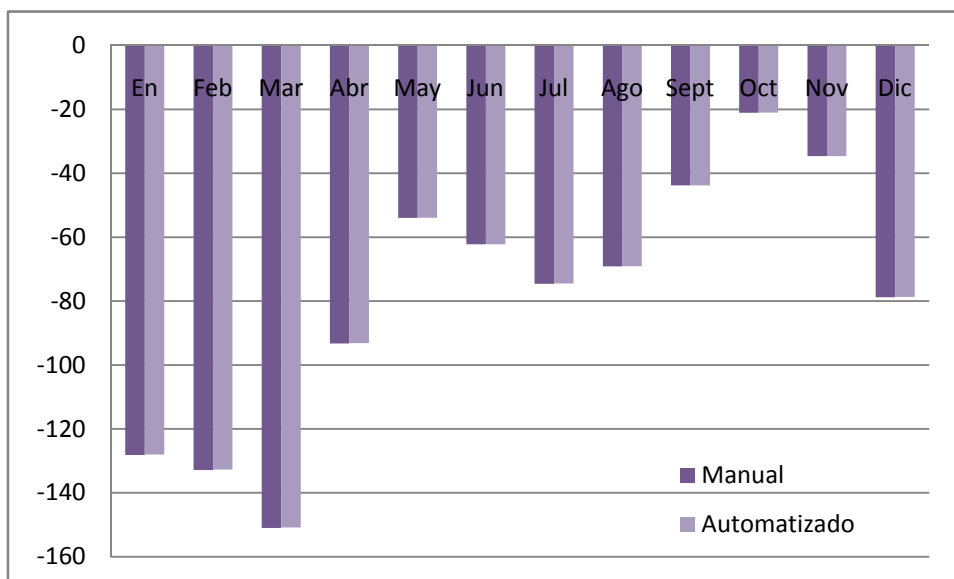


Figura 9 Variación de la Media PP-ETP (mm) para las zonas del Semiárido de Lara-Falcón calculada de forma manual en ArcView 3.2 y de forma automatizada

Derivado de los datos dados por el cuadro 3 se presenta la figura 10 que representa la variación mensual del error en milímetros para cada una de las zonas analizadas. En el caso de Barinas se observa que el error mensual oscila entre 0 mm y 0,04 mm, alcanzando su mínimo en el mes de julio y el máximo en los meses de agosto y noviembre, el caso del semiárido representa una mayor variabilidad en terminos relativos dado que ésta apenas alcanza un máximo de de 0,17 mm en el més de marzo y un mínimo valor de 0,01 mm en el mes de septiembre.

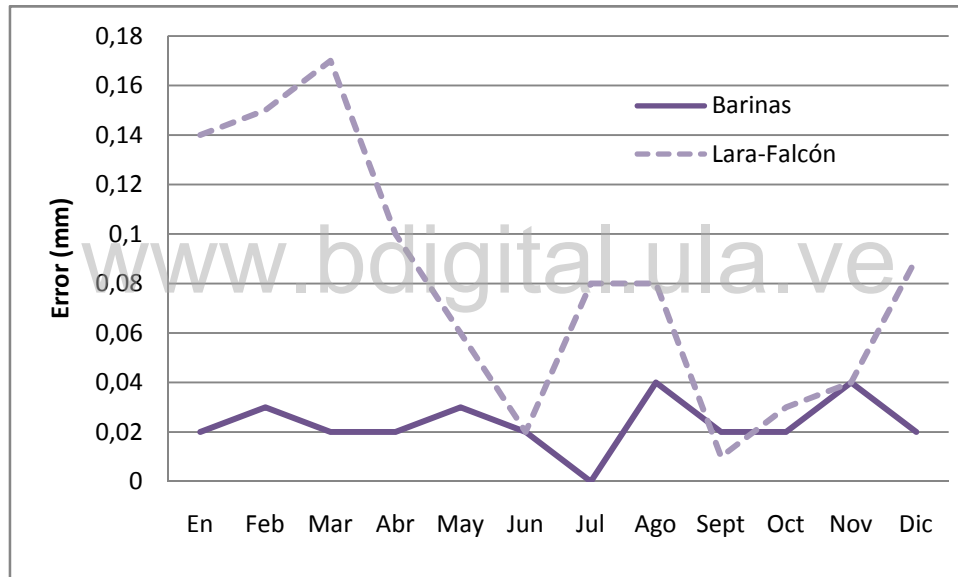


Figura 10. Variación mensual del error entre los valores Manuales y Automatizados de PP-ETP (mm) media para las zonas del Semiárido de Lara-Falcón.

Por otro lado, se observa claramente que el error calculado para Lara-Falcón es mucho mayor que el obtenido para la zona de Barinas, esto posiblemente sea causado a que la zona de Lara-Falcón posee una mayor variabilidad climática que lo que presenta la zona de Barinas.

Para validar estadísticamente el proceso de información preliminar dada al usuario se planteó la siguiente prueba de hipótesis:

H0: La Media PP-ETP automático del mes n = Media PP-ETP del mes n manual

H1: La Media PP-ETP automático del mes n  $\neq$  Media PP-ETP del mes n manual

Si se acepta H0 se obtiene que el módulo información preliminar generado tiene un correcto funcionamiento, en caso de que se acepte la alternativa se acepta lo contrario.

Los resultados obtenidos se observan en el cuadro 4, para la zona de Barinas y el cuadro 5 para la zona de Lara-Falcón

Cuadro 4. Resultados del análisis de la prueba T de muestras independientes de la media Precipitación-ETP para la zona de Barinas

Prueba de Levene para la igualdad de varianzas		Prueba T para la igualdad de medias						
F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Error típ. de la diferencia	95% Intervalo de confianza para la diferencia	
							Inferior	Superior
,000	1,000	,000	22	1,000	,006	42,88	-88,93	88,94

Cuadro 5. Resultados del análisis de la prueba T de muestras independientes de la media Precipitación-ETP Zona de Lara-Falcón

Prueba de Levene para la igualdad de varianzas		Prueba T para la igualdad de medias						
F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Error típ. de la diferencia	95% Intervalo de confianza para la diferencia	
							Inferior	Superior
,000	,996	-,005	22	,996	-,077	16,63	-34,57	34,42

En ambos casos se observa que los resultados no son altamente significativos, esto quiere decir que se acepta la hipótesis nula antes planteada, en la que la Media PP-ETP automático del mes n y Media PP-ETP del mes n manual son iguales, por lo que se acepta el correcto funcionamiento del proceso de generación de información preliminar (media PP-ETP).

## 8.2 VALIDACIÓN DEL PROCESO DE CÁLCULO Y GENERACIÓN DEL BALANCE

Para el análisis de los resultados se utilizó la extensión Grid Analyst Extensión (Ver 1.1) de ArcView 3.2, esta extensión posee una herramienta denominada **Extract X,Y, and Z values for point theme from Grid Theme**, los resultados de las extracciones del procedimiento manual y del procedimiento automatizado se muestran en los Apéndices 7 al 10. Para validar estadísticamente el módulo de Balances se aplicó la siguiente prueba de hipótesis:

H0: Exceso/Déficit = Exceso/Déficit del mes n manual

H1: Exceso/Déficit del mes n automático  $\neq$  Exceso/Déficit del mes n manual  
están altamente correlacionadas.

Si se acepta H0 se obtiene que el módulo generado tiene un correcto funcionamiento, en caso de que se acepte la alternativa se acepta lo contrario.

Para la aplicación de ésta prueba de hipótesis se utilizó el programa estadístico SPSS Versión 12.

Este proceso se realizó para ambas zonas de trabajo, tanto en Lara-Falcón como en Barinas, los resultados se presentan en los cuadros 6 y 7 respectivamente.

Cuadro 6. Resultados del análisis de la prueba T de muestras independientes en la Zona de Barinas

Mes	Prueba de Levene para la igualdad de varianzas		Prueba T para la igualdad de medias			Diferencia De medias	Error típ. de la diferencia	95% Intervalo de confianza para la diferencia	
	F	Sig.	T	Gl	Sig. (bilateral)			Inferior	Superior
	Febrero	0,00	1,00	0,00	172,00			1,00	0,00
Marzo	0,00	1,00	0,00	172,00	1,00	0,00	7,73	-15,26	15,26
Abril	0,00	1,00	0,00	172,00	1,00	0,00	9,20	-18,16	18,16
Mayo	0,00	1,00	0,00	172,00	1,00	0,00	6,05	-11,94	11,94
Junio	0,00	1,00	0,00	172,00	1,00	0,00	10,86	-21,43	21,43
Julio	0,00	1,00	0,00	172,00	1,00	0,00	12,85	-25,37	25,37
Agosto	0,00	1,00	0,00	172,00	1,00	0,00	11,68	-23,05	23,05
Septiembre	0,02	0,88	0,12	172,00	0,91	1,27	11,01	-20,45	23,00
Octubre	0,02	0,90	-0,12	172,00	0,91	-1,14	9,69	-20,26	17,98
Noviembre	0,00	1,00	0,00	172,00	1,00	0,00	9,14	-18,04	18,04
Diciembre	0,00	1,00	0,00	172,00	1,00	0,00	4,72	-9,31	9,31
Enero	0,01	0,94	-0,03	172,00	0,97	-0,14	3,94	-7,91	7,64



Cuadro 7. Resultados del análisis de la prueba T de muestras independientes en la Zona de Lara Falcón

Mes	Prueba de Levene para la igualdad de varianzas		Prueba T para la igualdad de medias			Diferencia De medias	Error típ. de la diferencia	95% Intervalo de confianza para la diferencia	
	F	Sig.	T	Gl	Sig. (bilateral)			Inferior	Superior
	Febrero	0,00	1,00	0,00	348,00			1,00	0,00
Marzo	0,00	1,00	0,00	348,00	1,00	0,00	4,80	-9,43	9,43
Abril	0,00	1,00	0,00	348,00	1,00	0,00	7,54	-14,84	14,84
Mayo	0,00	1,00	0,00	348,00	1,00	0,00	9,85	-19,38	19,38
Junio	0,00	1,00	0,00	348,00	1,00	0,00	12,72	-25,02	25,02
Julio	0,00	1,00	0,00	348,00	1,00	0,00	12,21	-24,02	24,02
Agosto	0,00	1,00	0,00	348,00	1,00	0,00	9,95	-19,58	19,58
Septiembre	0,00	1,00	0,00	348,00	1,00	0,00	8,15	-16,03	16,03
Octubre	0,00	1,00	0,00	348,00	1,00	0,00	6,85	-13,48	13,48
Noviembre	0,00	1,00	0,00	348,00	1,00	0,00	6,01	-11,83	11,83
Diciembre	0,00	1,00	0,00	348,00	1,00	0,00	6,68	-13,13	13,13
Enero	0,00	1,00	0,00	348,00	1,00	0,00	4,26	-8,38	8,38

En ambas zonas de trabajo se acepta la hipótesis nula es decir que las medias son iguales para todos los meses, por lo que se acepta correcto del proceso de ejecución del Balance.

Debido a que el módulo generado utiliza una precisión de dos posiciones decimales para la escritura de la data creada (raster Exceso/Déficit y Almacenamiento), debe existir un error de cálculo, el cual puede variar espacio temporalmente en ambas zonas climáticas; para la estimación del mismo se aplicó la siguiente ecuación utilizando la herramienta de los algebras de mapas de ArcView GIS 3.2:

$$\text{Error Mes n} = | |\text{Def/Ex Mes n Automático}| - |\text{Def/Ex Mes n Manual}| |$$

Los cuadros 8 y 9 muestran los resultados de las estadísticas descriptivas del error calculado, para cada una de las zonas de trabajo.

Cuadro 8 Estadísticas descriptivas del error calculado para Lara-Falcón

<b>Mes</b>	<b>Error Mínimo (mm)</b>	<b>Error Máximo (mm)</b>	<b>Error Medio (mm)</b>	<b>Desviación Estándar del Error (mm)</b>	<b>Rango (mm)</b>
Enero	0,0000	0,0051	0,0025	0,0014	0,0051
Febrero	0,0000	0,0051	0,0025	0,0014	0,0051
Marzo	0,0000	0,0051	0,0025	0,0014	0,0051
Abril	0,0000	0,0051	0,0025	0,0014	0,0051
Mayo	0,0000	0,0051	0,0025	0,0014	0,0051
Junio	0,0000	0,0051	0,0025	0,0014	0,0051
Julio	0,0000	0,0051	0,0025	0,0014	0,0051
Agosto	0,0000	0,0051	0,0025	0,0014	0,0051
Septiembre	0,0000	0,0051	0,0025	0,0014	0,0051
Octubre	0,0000	0,0051	0,0025	0,0014	0,0051
Noviembre	0,0000	0,0051	0,0025	0,0014	0,0051
Diciembre	0,0000	0,0051	0,0025	0,0014	0,0051
<b>Total</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0611</b>	<b>0,0300</b>	<b>0,0173</b>	<b>0,0611</b>
<b>Media</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0051</b>	<b>0,0025</b>	<b>0,0014</b>	<b>0,0051</b>

Cuadro 9. Estadísticas descriptivas del error calculado para Barinas

<b>Mes</b>	<b>Error Mínimo (mm)</b>	<b>Error Máximo (mm)</b>	<b>Error Medio (mm)</b>	<b>Desviación Estándar del Error (mm)</b>	<b>Rango (mm)</b>
Enero	0,0000	0,0238	0,0028	0,0022	0,0238
Febrero	0,0000	0,0148	0,0026	0,0016	0,0148
Marzo	0,0000	0,0177	0,0025	0,0015	0,0177
Abril	0,0000	0,0190	0,0016	0,0017	0,0190
Mayo	0,0000	0,0207	0,0020	0,0021	0,0207
Junio	0,0000	0,0051	0,0025	0,0015	0,0051
Julio	0,0000	0,0051	0,0025	0,0015	0,0051
Agosto	0,0000	0,0099	0,0025	0,0015	0,0099
Septiembre	0,0000	0,0164	0,0025	0,0015	0,0164
Octubre	0,0000	0,0179	0,0025	0,0015	0,0179
Noviembre	0,0000	0,0175	0,0010	0,0015	0,0175
Diciembre	0,0000	0,0279	0,0016	0,0023	0,0279
<b>Total</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,1956</b>	<b>0,0265</b>	<b>0,0203</b>	<b>0,1956</b>
<b>Media</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0163</b>	<b>0,0022</b>	<b>0,0017</b>	<b>0,0163</b>

Derivado de los cuadros 8 y 9 se presentan las figuras 11 y 12 en las que se muestra la variación del error para ambas zonas de trabajo, en ellas se muestra que prácticamente no existe variación del error a lo largo del año para ambas zonas de trabajo (Lara-Falcón y Barinas) obteniendo un error promedio de 0,0025 mm en Lara-Falcón y 0,0022 mm para Barinas, y un máximo de 0,0051 mm en el semiárido y 0,0279 en Barinas, el error calculado resulta ser insignificante y descartable para el grado de precisión que maneja un usuario estándar, el cual alcanza una décima de milímetro, por lo que este error claramente es aceptado.

Otro aspecto que se destaca es que el error mensual prácticamente no presenta variación a lo largo del año, lo que demuestra que el módulo generado es consistente espacio temporalmente, independientemente de la zona climática y de las características intrínsecas que posea ésta.

Figura 11. Variación mensual del error calculado (Mínimo, Máximo y Medio) para

Lara-Falcón

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

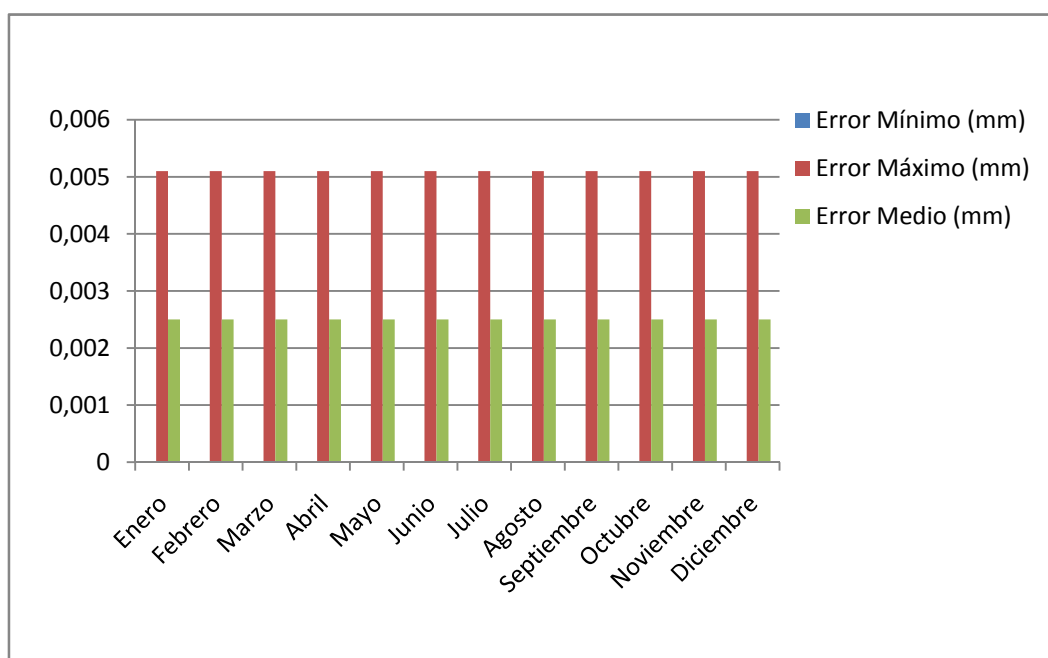
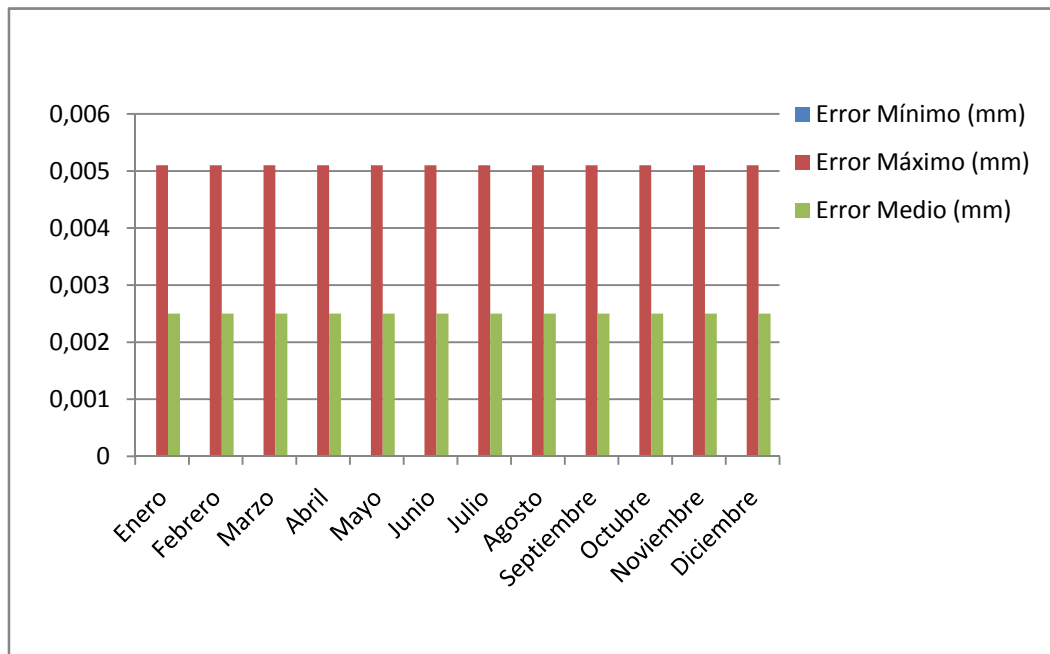


Figura 12. Variación mensual del error calculado (Mínimo, Máximo y Medio) para Barinas



[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

C.C.Reconocimiento

## **9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

- Previamente a la programación de un módulo deben establecerse la estructura de datos geográficos a trabajar, esto es con el fin de facilitar la planificación del proyecto.
- La selección del formato de datos espaciales raster como estructura de datos de entrada, salida y procesamiento fue fundamental para el manejo, producción y control de la información en el módulo.
- Es de gran importancia establecer unos requerimientos básicos para la selección del SIG a programar, esto con el fin de reducir la incertidumbre en la programación.
- El desarrollo de los SIG libres tiene ventajas sobre los SIG comerciales debido a que el desarrollador posee acceso al código fuente del programa, esto facilita enormemente la solución de los problemas planteados.
- Los SIG libres poseen la desventaja de no tener todas las herramientas de análisis espacial debido a su corto tiempo de desarrollo y por encontrarse en un proceso de fusiones múltiples. Este punto hace que la solución a los problemas sea más compleja de lo normal.
- Para un programador poco experimentado es poco recomendable imponer un estilo de programación para un SIG, es más recomendable adaptarse a las condiciones que le ofrece el SIG y programar bajo el estilo que le ofrece el mismo. Es por esto que fue imposible lograr aplicar el estilo original planteado en este proyecto, que era programación modular. El estilo de

programación utilizado en éste trabajo podría denominarse un híbrido entre programación funcional y programación orientada a objetos.

- La ejecución del programa de balance puntual ofreció la ventaja de poder estudiar a fondo el problema planteado; adicionalmente se pudo estudiar la factibilidad del problema y planificar, a groso modo, la estrategia a ejecutar en la elaboración del módulo.
- El módulo de balances Edafoclimáticos puede facilitar la ejecución más efectiva y eficiente en la elaboración de proyectos ya sean de investigación o comerciales, debido al gran avance tecnológico que se generó mediante este desarrollo que permite una disminución sustancial tiempo de ejecución de este proceso.
- Es evidente que la velocidad del módulo generado está afectada por el número de píxeles que tengan los raster de entrada, dado que si éste es muy grande el número de celdas a generar y a procesar es muy elevado y retardará el desarrollo del proceso en el sistema.
- Aproximadamente la duración del procesamiento para una computadora de gran velocidad es de 25 minutos, para ambas zonas climáticas trabajadas.
- El módulo generado abre las puertas para posteriores mejoras al mismo o al desarrollo de nuevos módulos más complejos, tal como el desarrollo de interpoladores de raster o análisis geostadísticos.
- La elección de Python como lenguaje de programación del módulo facilitó el desarrollo del mismo, debido a que este es un lenguaje interpretado que desecha las compilaciones ya sea para Windows como para Linux o algún otro sistema operativo.

- El desarrollo del módulo en Linux permitió identificar fácilmente los errores en la programación del mismo.
- El módulo generado es funcional para cualquier sistema operativo, debido a que éste es desarrollado en un lenguaje interpretado.
- El módulo creado está diseñado para generar un proceso interactivo Usuario-Máquina en la elección del mes de inicio del mismo, debido a que no es recomendable que el módulo eligiera automáticamente el mes de inicio, pues éste depende del conocimiento de las condiciones climáticas que tenga el usuario sobre la zona de estudio.
- El módulo programado adicionalmente fue validado estadísticamente utilizando pruebas T de igualdad de medias para muestras independientes, en este se observó el correcto funcionamiento para todos los meses calculados, tanto para la zona húmeda de Barinas como para la zona del semiárido de Lara-Falcón, por lo que se acepta que funciona correctamente.

## 10. REFERENCIAS CITADAS

- Acajima, R., Azabache, J., León, M., Merino, J, Rodríguez, J y Zavaleta, J. 2007. Modelos de lenguajes de programación. [En línea 15/1/07]. <http://www.inf.unitru.edu.pe/~pelm/Modelos/Presenta.html>
- Barrios, A. 2006. Modelado cartográfico en el SIG para el Balance Edafoclimatológico. 2p.
- Bidlake, W. y Boetcher, P. 1997. Simulation of the soil water balance of an undeveloped prairie in west-central Florida. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2472. 57p.
- CEDEX. 2006. HEC-HMS. [En Línea 30/01/07]. <http://hercules.cedex.es/IngSis/hec-hms.htm>
- Consellería d'Infraestructures i Transport. 2007.a. GVSIG 1.0. [En Línea 15/02/07]. <http://www.gvsig.gva.es/>
- Consellería d'Infraestructures i Transport. 2007.b. Guía de Scripting Versión 2 GVSIG 1.0. [En Línea 27/02/07]. <http://www.gvsig.gva.es/index.php?id=manuales MANUALL=0>
- Consellería d'Infraestructures i Transport. 2006. ¿Qué es gvSIG?. [En Línea 27/05/06]. <http://www.gvsig.gva.es/index.php?id=queesgvsig MANUALL=0>
- Dal Pozzo, F. 2004. Código fuente Balance. 12p. (Mimeografiado).



Estrada, M. S/f. Herramientas en GNU/Linux para estudiantes universitarios. [En línea 28/09/06]. <http://es.tldp.org/Presentaciones/200304curso-glisa/introduccion/curso-glisa-introduccion-html/x225.html>

ESRI. 2007. ArcView-GIS creación de mapas, análisis e integración de información. [En línea 13/07/07]. <http://www.esri-es.com/index.asp?pagina=181>

Fundación Vía Libre. 2000. Que es el software libre?. [En línea 27/05/06]. <http://www.vialibre.org.ar/index.php/article/articleview/2/1/12/>

García, R., González, E. y Tzenva, L. 1996. El riego. Editorial Pueblo y Educación. Primera Edición. 447p.

GRASS Development Team. 2006. GRASS: Introduction. [En Línea 28/05/06]. <http://grass.itc.it/intro/general.php#programming>

Grassi, C. 1998. Fundamentos de riego. CIDIAT. Primera Edición. Pp 171-177.

Jiménez, J., Aguilera, M. y Meroño, J. S/f. Alternativas de software libre a los sistemas de información geográfica. [En Línea 17/11/06]. <http://www.cartesia.org/geodoc/ingegraf2005/gis10.pdf>

Lycos. S/f. Definición y aplicaciones del SIG. [En Línea 26/02/07]. <http://usuarios.lycos.es/geografia2/twodescphotos.html>

Mcgrath, S. 2007. The Jython Project. [En Línea 26/02/07].  
<http://www.jython.org/Project/index.html>

Mesa, O. Poveda, G. Vélez, J. Barco, J. Botero, B. Cuartas, A. Hoyos, C. Mantilla, R. Mejía, J. Montoya, M. 2006. Hidro-sig: una herramienta para la estimación de balances hídricos de Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Pregrado de Ingeniería Civil. [En línea 27/05/06].  
[http://cires.colorado.edu/~ricardo/br>papers/hidrosig\\_VENEZUELA.pdf](http://cires.colorado.edu/~ricardo/br>papers/hidrosig_VENEZUELA.pdf)

Nacional Center of Geographic Information and Analysis. 1999. Geographic Information Science. [En Línea 27/05/06].  
<http://www.ncgia.buffalo.edu/giscidefn.html>

NASA. 2006. CASC2D: Hydrologic Modelling. [En Línea 27/05/06].  
<http://gcmd.nasa.gov/records/CASC2D.html>

Neitsch, S. Arnold, J. Kintry, J. Williams, J. King, K. 2002. Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation. [En línea 27/5/06].  
<http://www.brc.tamus.edu/swat/downloads/doc/swat2000theory.pdf>

Olaya, V. 2004. A gentle Introduction to SAGA GIS. 216p.

Olaya, V. 2006. Fundamentos de análisis con SEXTANTE. 371p.

Pacheco, J. Rodríguez, N. Pujol, P. y Camejo, E. 1995. Riego y drenaje. Editorial Pueblo y Educación. Primera Edición. 414p.

PROCEDATOS. 2005. Aplicación del Decreto 3390 sobre software libre y su impacto en la corporación Enelven - segunda parte. [En Línea 27/05/06]. <http://www.procedatos.com.ve/DatosInteresantes/toptech.htm>

República Bolivariana de Venezuela. 2004. Decreto Presidencial N° 3390. Gaceta Oficial N° 38.095. 4p.

Rivera, C. 2000. Interfaz de Usuario. [En Línea 27/05/06]. <http://www.fismat.umich.mx/~crivera/tesis/node11.html>

Rodríguez, F. 2002. GNU General Public License. [En Línea 6/5/2007]. <http://www.garaitia.com/new/gpl-spanish.php>

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

SAGA Team. 2006. ¿Qué es SAGA?. [En Línea 17/11/06]. <http://www.saga-gis.uni-goettingen.de/html/index.php?newlang=spa>

Schildt, H. 2007. Fundamentos de Java. McGraw-Hill. Tercera edición. 623p.

SIGMA Consultores. 2006. Introducción a los Sistemas de Información Geográfica. [En Línea 22/11/06]. <http://epi.minsal.cl/SigEpi/tema01.html>

SPSS INC. 2007. SPSS Guía para el análisis de de datos. [En Línea 13/09/07]. <http://www2.uca.es/serv/ai/formacion/spss/Inicio.pdf>

Stroustrup, B. 2002. El Lenguaje de Programación C++. Addison Wesley. Segunda edición. 1050p.

C.C.Reconocimiento

Tejeda. H. Arreglos y cadenas. 2005. [En línea 16/3/07].  
<http://garota.fismat.umich.mx/mn1/manual/node6.html>

Thinlet. 2007. Thinlet. [En Línea 2/2/2007]. <http://www.thinlet.com/>

uDig. 2007. uDig. [En Línea 26/02/07].  
<http://udig.refractions.net/confluence/display/UDIG/Home>

UNIOVI. 2000. Diferencias de medias con datos independientes. [En Línea  
26/02/07].  
[http://www.psico.uniovi.es/Dpto\\_Psicologia/metodos/tutor.5/dmgi.html](http://www.psico.uniovi.es/Dpto_Psicologia/metodos/tutor.5/dmgi.html)

Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 2006. Concepto de SIG. [En Línea  
27/05/06]. <http://www.udistrital.edu.co/comunidad/profesores/rfranco/intro.htm>

Wikipedia. 2007. a.JUMP. [En Línea 26/02/07]. <http://es.wikipedia.org/wiki/JUMP>

Wikipedia. b. 2007. Quantum GIS. [En Línea 26/02/07].  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_GIS](http://es.wikipedia.org/wiki/Quantum_GIS)

Wikipedia.2007.c. Programación Funcional. [En Línea 26/02/07].  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Programaci%C3%B3n\\_funcional](http://es.wikipedia.org/wiki/Programaci%C3%B3n_funcional)

Wikipedia.2007.d. Programación Orientada a Objetos. [En Línea 26/02/07].  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Programaci%C3%B3n\\_orientada\\_a\\_objetos](http://es.wikipedia.org/wiki/Programaci%C3%B3n_orientada_a_objetos)

Wikipedia. e. 2007. Vectores. [En Línea 26/02/07].  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Vector\\_\(programaci%C3%B3n\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Vector_(programaci%C3%B3n))

Wikipedia. 2007. f. Matriz (programación). [En Línea 26/02/07].  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Matriz\\_\(programaci%C3%B3n\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Matriz_(programaci%C3%B3n))

Wikipedia. 2007. g. Python. [En Línea 26/02/07]. <http://es.wikipedia.org/wiki/Python>

Wikipedia. 2007. h. Lisp. [En Línea 26/02/07]. <http://es.wikipedia.org/wiki/Lisp>

Wikipedia. 2007. i. Jython. [En Línea 26/02/07]. <http://es.wikipedia.org/wiki/Jython>

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

C.C.Reconocimiento