

## Criterios para localizar zonas acuíferas en Caimbambo, Angola

Moisés Catanha

Universidad Agostino Neto. Luanda. Angola.

e-mail: [moisescatanha@hotmail.com](mailto:moisescatanha@hotmail.com)

Carlos Sacasas León

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). La Habana. Cuba.

e-mail: [csl@civil.cujae.edu.cu](mailto:csl@civil.cujae.edu.cu)

José Pérez Lazo

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). La Habana. Cuba.

e-mail: [jperezl@civil.cujae.edu.cu](mailto:jperezl@civil.cujae.edu.cu)

### RESUMEN

Las rocas cristalinas fracturadas tienen potencial para la acumulación de agua, sin embargo, determinar la ubicación de los pozos que posibiliten su extracción depende de la evaluación precisa de las condiciones geológicas del área de estudio. El área evaluada incluye las comunas Katengue, Caimbambo, Kanhamela y Wyiangombe pertenecientes al municipio de Caimbambo. El objetivo principal de este trabajo es mostrar los procedimientos utilizados que incluyen la aplicación de técnicas de geoprocésamiento espacial vinculadas con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y de teledetección en una región caracterizada por las formaciones graníticas Pre-Cámbricas.

**Palabras clave:** aguas subterráneas, hidrogeología, hidrología, SIG, teledetección.

## Criteria for locating water-bearing zones in Caimbambo, Angola

### ABSTRACT

Fractured crystalline rocks have potential for water accumulation, however, to determine the location of wells that enable extraction, an accurate assessment of the geological conditions of the study area is necessary. The study area includes Katengue, Caimbambo, Kanhamela and Wyiangombe communities belonging to Caimbambo municipality. The main objective of this paper is to show the applied procedures that include the application of techniques related to Geographic Information Systems (GIS) and remote sensing in a region characterized by the Pre-Cambrian granite formations.

**Keywords:** GIS, groundwater, hidrogeology, hidrology, remote sensing.

## INTRODUCCION

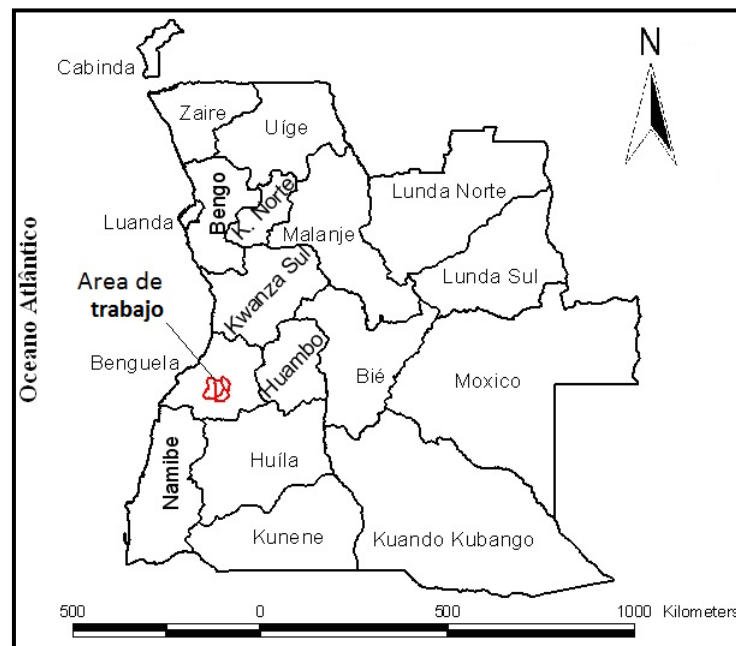
Con el objetivo de contribuir al desarrollo económico de las regiones que carecen de recursos hídricos superficiales en el municipio de Caibambo, provincia de Benguela e incentivar las actividades agropecuarias y el abasto a la población, se ejecutó un programa preliminar de investigaciones, utilizando técnicas geológicas y espaciales con el propósito de establecer las áreas favorables para la perforación de pozos que sean productores.

El objetivo principal de este trabajo es mostrar los procedimientos utilizados, mediante la aplicación de técnicas de geoprocésamiento espacial vinculadas con los Sistemas de Información Geográfica y la teledetección, evaluando las áreas perspectivas para la prospección de aguas subterráneas en una región caracterizada por las formaciones graníticas Pre-Cámbricas.

En la actualidad, en la región de Caibambo, se le da mayor importancia a las aguas subterráneas debido a la ausencia de infraestructuras para la captación y distribución de las aguas superficiales hacia los pequeños asentamientos poblacionales, teniendo en cuenta además la mejor calidad de las aguas subterráneas respecto a las superficiales.

La circulación y acumulación de las aguas subterráneas en las rocas cristalinas ocurre en las fallas y fracturas presentes por lo que es de interés evaluar la densidad de fracturas, sus aberturas e intercomunicación entre ellas que permitan la infiltración de un flujo de agua. Debe cumplirse además que el flujo sea interceptado por una roca que sirva de sello y posibilite su acumulación.

Las rocas cristalinas fracturadas tienen gran potencial para la acumulación de agua, pero ubicar los pozos para su extracción requiere de una evaluación precisa de las condicionantes geológicas ya señaladas. Se evalúan áreas de las comunas Katengue, Caibambo, Kanhamela y Wyiangombe, municipio de Caibambo y se muestran en la figura 1.



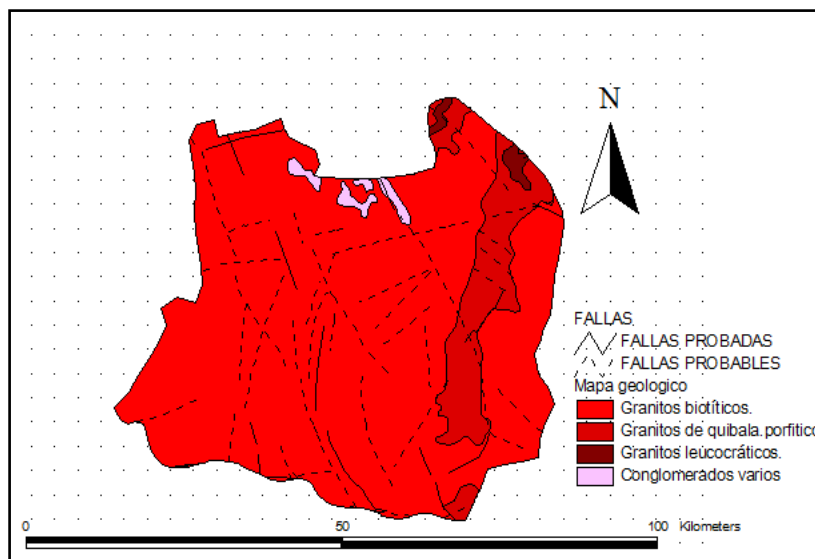
**Figura 1. Localización del área de estudio**

## ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA

### Geología

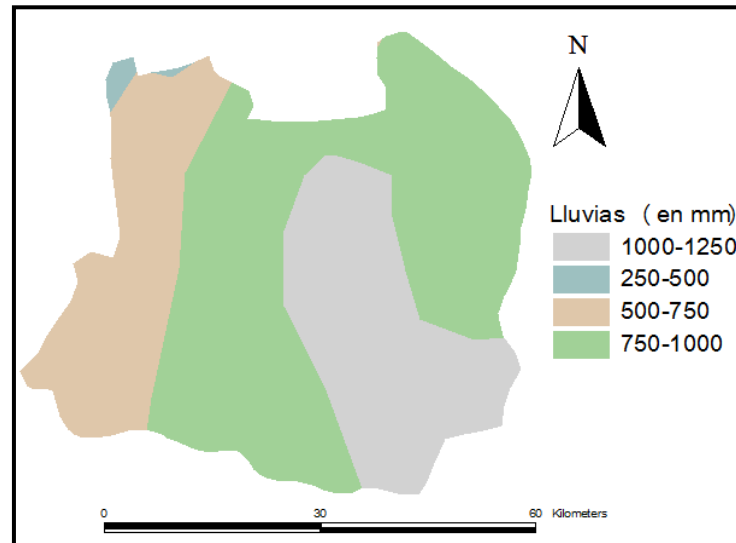
En relación con los aspectos fisiográficos y geológicos regionales del área de Caimbambo, presentadas en (Alaminos et al. 2008) y en (Martín Loeches 2008), dicha área se encuentra en el extremo occidental del Altiplano de Bié (meseta angolana de Bié). Esta unidad geográfica por su elevación con respecto al resto del territorio constituye un centro de dispersión de la red fluvial principal de Angola. La unidad geológica que constituye la meseta se denomina Escudo de Angola (figura 2) y está constituido por rocas ígneas metamórficas de edad Precámbrica notablemente fracturadas siguiendo varias direcciones, fundamentalmente NNE-SSW, NNW-SSE, N-S y E-W, como consecuencia de los esfuerzos tectónicos a que el área estuvo sometida y que inciden más intensamente en la parte central lo cual la hace una zona potencialmente más favorable para que ocurran los procesos de acumulación de aguas subterráneas.

El Escudo de Angola se eleva con respecto al nivel medio del mar con alturas superiores a los 2000 m. En la región de Caimbambo la altura media es cercana a los 800 m con elevaciones puntuales que llegan a superar los 1000 m.



**Figura 2. Esquema del mapa geológico del área de Caimbambo a escala 1:1000 000**

Las características del régimen de precipitaciones observadas en la zona según la información del Instituto Nacional de Meteorología (Araújo 1992) se presentan en la figura 3, donde se pueden apreciar las mayores acumulaciones en la zona central del territorio.



**Figura 3. Mapa de lluvias medias anuales (mm)**

### **INFORMACIÓN RECOPIADA**

Para la ejecución de este trabajo se realizó una recopilación de la información de archivo y otras fuentes relacionados con el área de interés destacándose las siguientes:

- Mapa geológico de Angola, escala 1:1 000 000.
- Modelos digitales de elevación del Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM).
- Esquema tectónico, obtenido por la digitalización del mapa geológico.

Todos los datos fueron sometidos a procesamientos y análisis utilizando variadas técnicas que posibilitaron integrar los datos estructurales, geológicos, hidrogeológicos, hidrológicos y las imágenes satelitales en un Sistema de Información Geográfica.

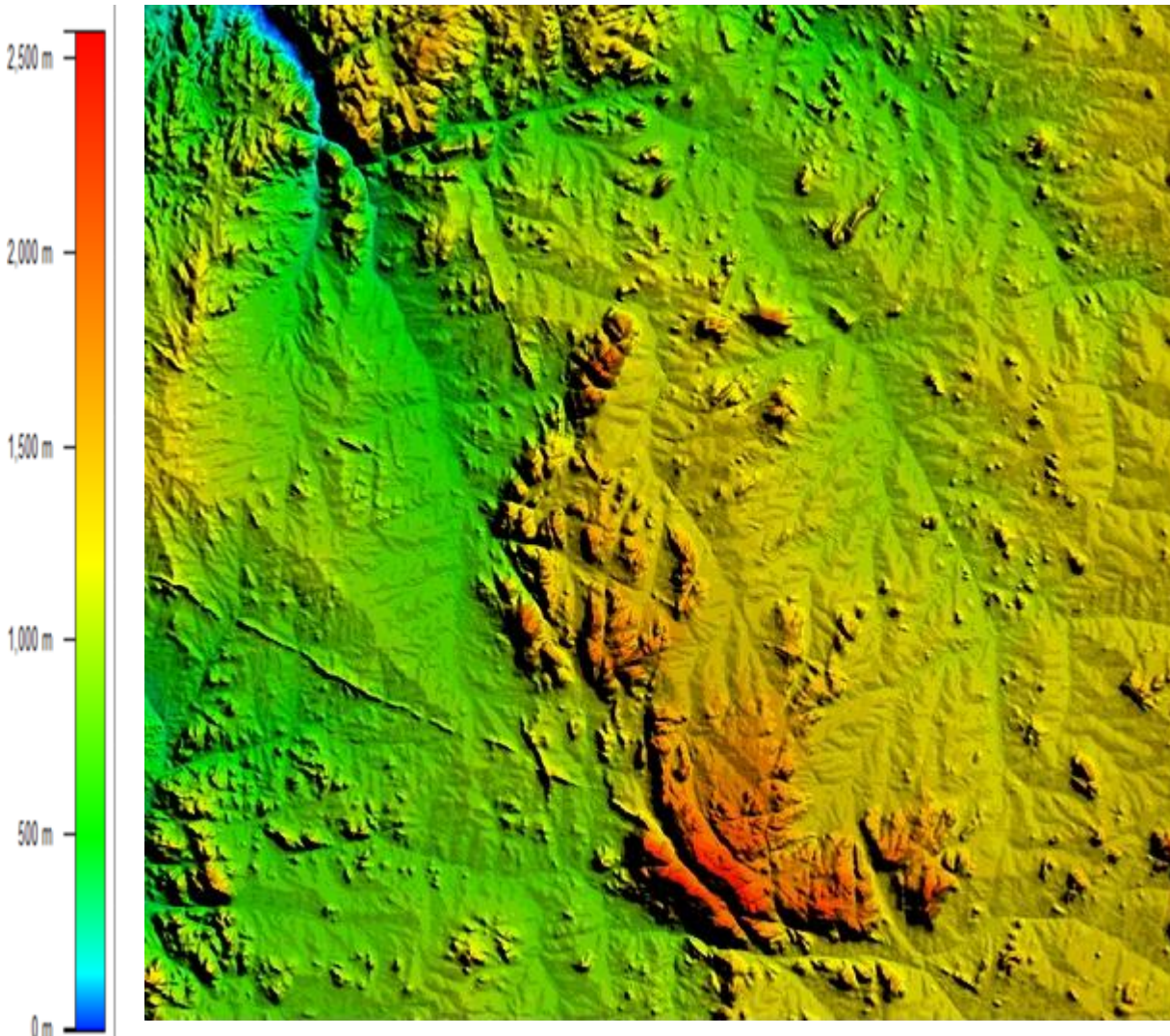
### **Modelo digital de elevaciones (1:1 000 000)**

Los modelos digitales de elevación del SRTM fueron tomados de su formato original (\*.hgt) mediante el software Global Mapper v11.03 realizándose la exportación al formato GEOTIFF (\*.tiff) para las imágenes y Arc ASCII Grid (\*.asc) para las elevaciones que pueden ser manipuladas por varios softwares y en particular por el ArcView 3.3 que fue el SIG utilizado. Para el tratamiento espectral de las imágenes satelitales se utilizó el MULTISPECT.

En el mapa presentado en la figura 4 se aprecia que las alturas de la región de estudio oscilan entre 500 y 2500 m. Las mayores elevaciones se encuentran en el centro sur de Caimbambo.

Los aspectos operacionales y metodológicos están claramente expresados en la literatura disponible (ESRI 1999) que incluyen la utilización del menú básico y de otras muchas posibilidades brindadas por extensiones especializadas como pueden ser las vinculadas con los estudios morfométricos y los hidrológicos. Para la obtención completa de la información se

utilizan extensiones especializadas para estudios hidrológicos como son la GEO-HMS desarrollada por el Hydrologic Engineering Center del US Army y DNR Hydro desarrollada por el Departamento de Recursos Naturales (DNR) de Minnesota.



**Figura 4. Modelo digital de elevaciones para el área de Caimbambo**

### **Análisis hidrológico**

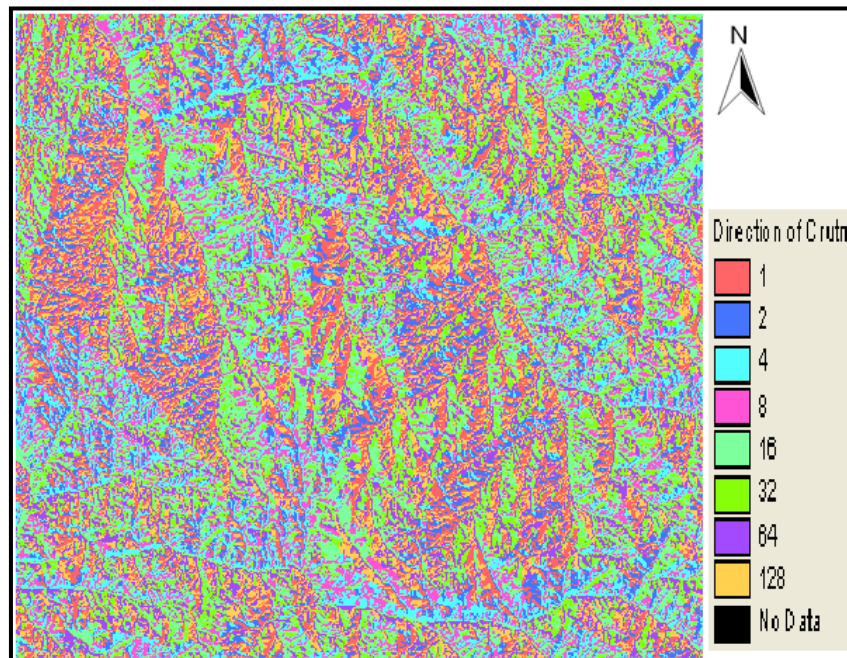
Inicialmente fue utilizada la extensión DNR Hydro teniendo como datos de partida el modelo digital de elevaciones. Se obtuvo así el mapa correspondiente a la dirección de flujo presentado en la figura 5, donde se aprecia la dirección que toma el agua en función de la pendiente del terreno en su movimiento por la superficie.

Esta dirección está asociada con números que a su vez responden a una orientación cardinal según el esquema presentado en la tabla 1. En la figura 5 se puede apreciar el mapa correspondiente según la escala de colores escogida. La observación detallada de este mapa

permite en primera instancia tener una valoración preliminar de las direcciones de escorrentía superficial.

**Tabla1. Leyenda utilizada para el mapa de dirección del flujo**

Orientación cardinal	número	Orientación cardinal	número
Este	1	Oeste	16
Sureste	2	Noroeste	32
Sur	4	Norte	64
Suroeste	8	Nordeste	128



**Figura 5 Direcciones del flujo de escurrimiento en Caimbambo**

Se obtuvo el mapa de índice de humedad que da una medida de las posibilidades del relieve de almacenar agua. Este índice ofrece criterios para la selección de aquellas zonas propensas a mantenerse con acumulaciones de agua. En los mapas se presentan como zonas con mayor índice de humedad las tonalidades más oscuras como se aprecia en la figura 6.

De interés resulta además el mapa de curvatura mostrado en la figura 7 que es un índice cuantitativo de la forma del relieve. La curvatura puede ser cóncava o convexa. En caso de ser cóncava se representa por valores negativos y se corresponde a zonas con posibles acumulaciones de agua.

En caso de ser convexa, está representado por valores positivos, indicando un aumento en la pendiente del terreno, mientras que los valores cero se refieren a terrenos horizontales con altas posibilidades de producir encharcamientos de agua.

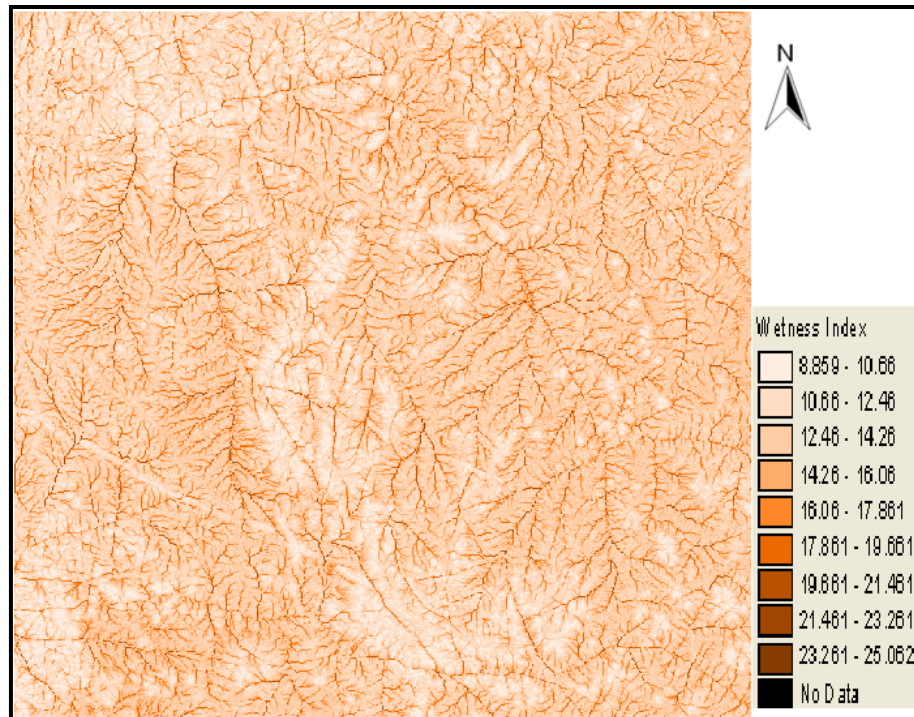


Figura 6. Índice de humedad del área de Caimbambo

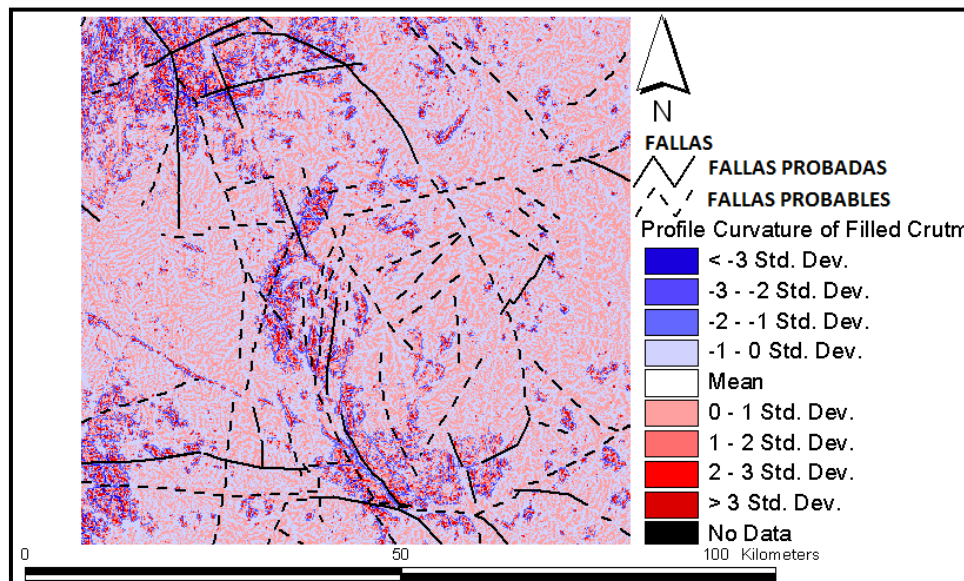
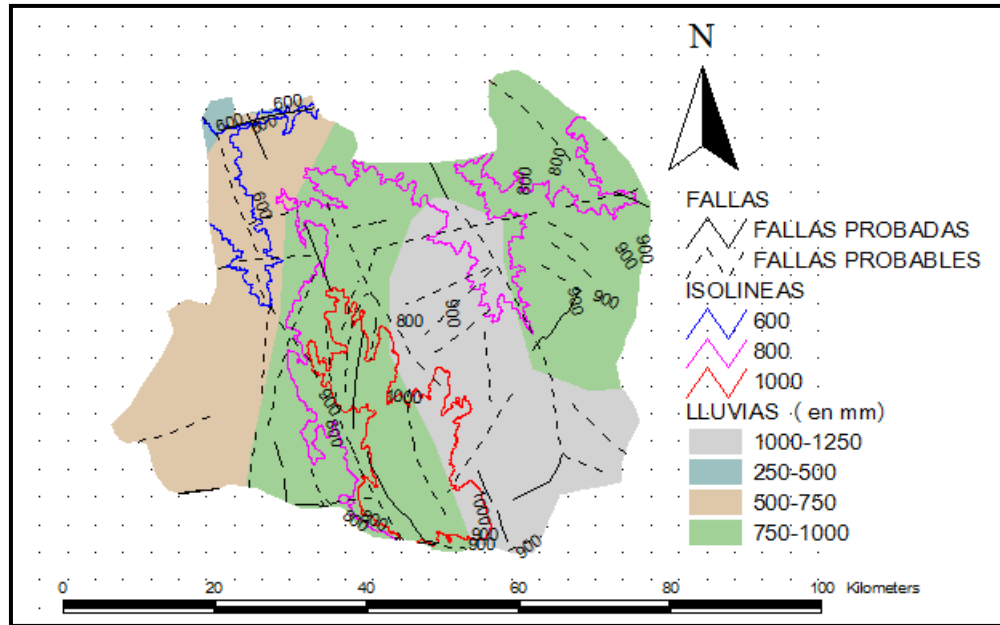


Figura 7. Mapa de curvatura del área de Caimbambo

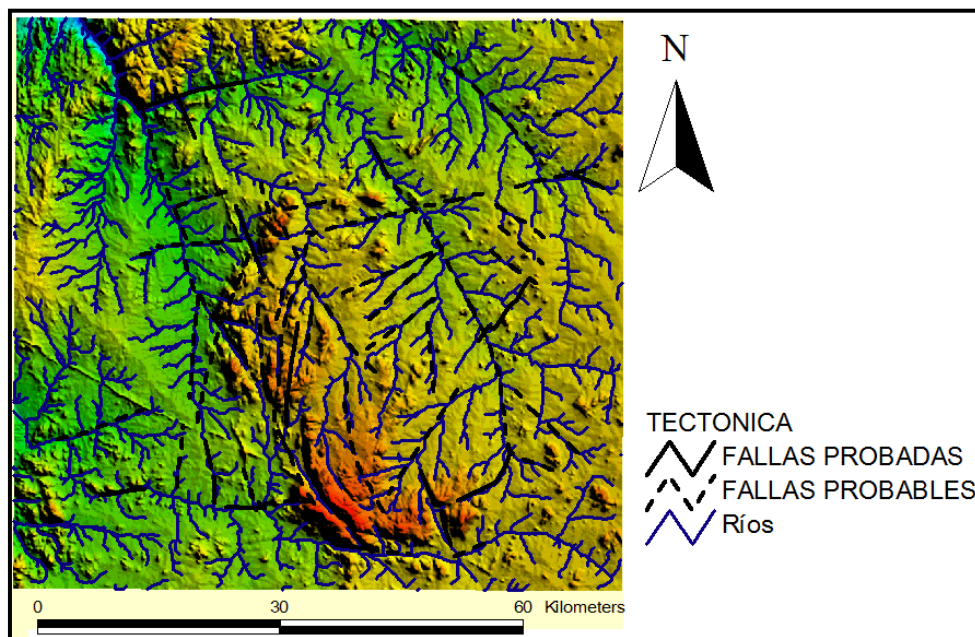
## INTERPRETACIÓN COMBINADA DE LA INFORMACIÓN

Una segunda etapa tuvo como base la integración e interpretación de resultados parciales que permiten identificar factores del terreno que pudiesen estar relacionados con la acumulación de agua por debajo de la superficie (Catanha 2006) como el mostrado en la figura 8 y otros mapas que más adelante se presentan.



**Figura 8. Mapa con la superposición de las curvas de nivel, lineamientos tectónicos y lluvias anuales del área de Caibambo**

Hay una correspondencia muy grande entre la red de drenaje y la tectónica, de forma tal que puede utilizarse como una herramienta la distribución de la red de drenaje para el trazado de fallas principales y secundarias así como todas las fracturas en general (figura 9).



**Figura 9. Correspondencia entre la red de drenaje y lineamientos tectónicos**

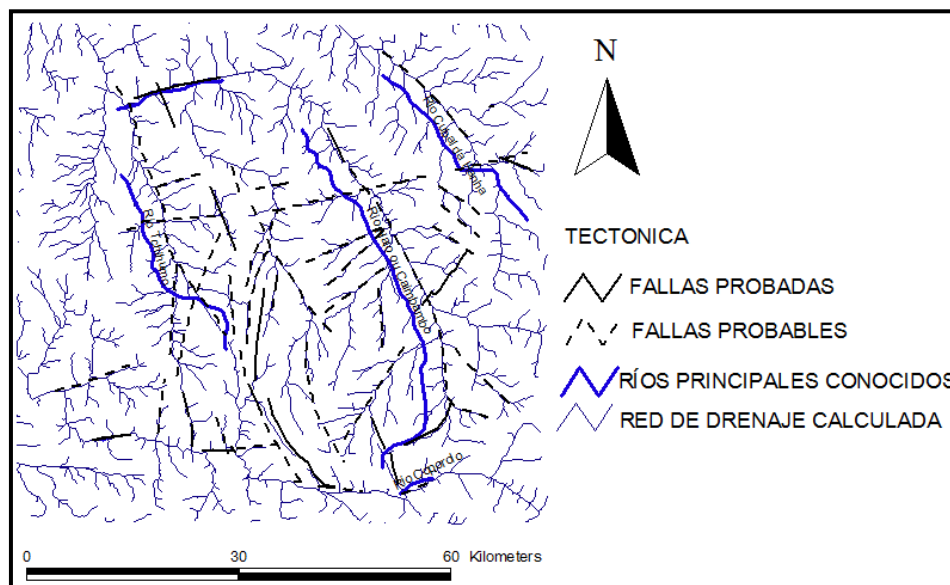


Tomando en consideración que en los territorios compuestos por rocas cristalinas la aparición de las aguas subterráneas se encuentra asociada a todas las fracturas presentes que posibilitan la infiltración de las aguas superficiales provenientes de la red hidrográfica y en sentido general de la escorrentía superficial, se le prestó especial atención a su determinación con el mayor detalle que los datos de partida posibilitan. Para ello se realizaron algunos procesamientos y análisis propios de los estudios hidrológicos con vistas a obtener la red de drenaje de mayor detalle y se realizaron los procesamientos de imágenes satelitales con similares fines.

En este caso interesa estudiar la densidad de fracturas, localizándose los sectores del territorio con mayor densidad y asociarlos con características físico-geográficas que posibilitan la infiltración de las aguas y su conducción en el sustrato geológico a diferentes profundidades. Las zonas en que el aumento anómalo de la densidad de fracturas esté en contacto con sectores de rocas que sirvan de sello o frontera impermeable, se cumplen las condiciones que posibilitan la acumulación del agua subterránea.

Para estas valoraciones es aconsejable analizar la curvatura del relieve atendiendo a las posibilidades de acumular aguas superficiales en las zonas cóncavas y horizontales y donde se observa una coincidencia espacial entre esas áreas con las mayores densidades de la red de drenaje, se pueden considerar esos sectores como prospectivos.

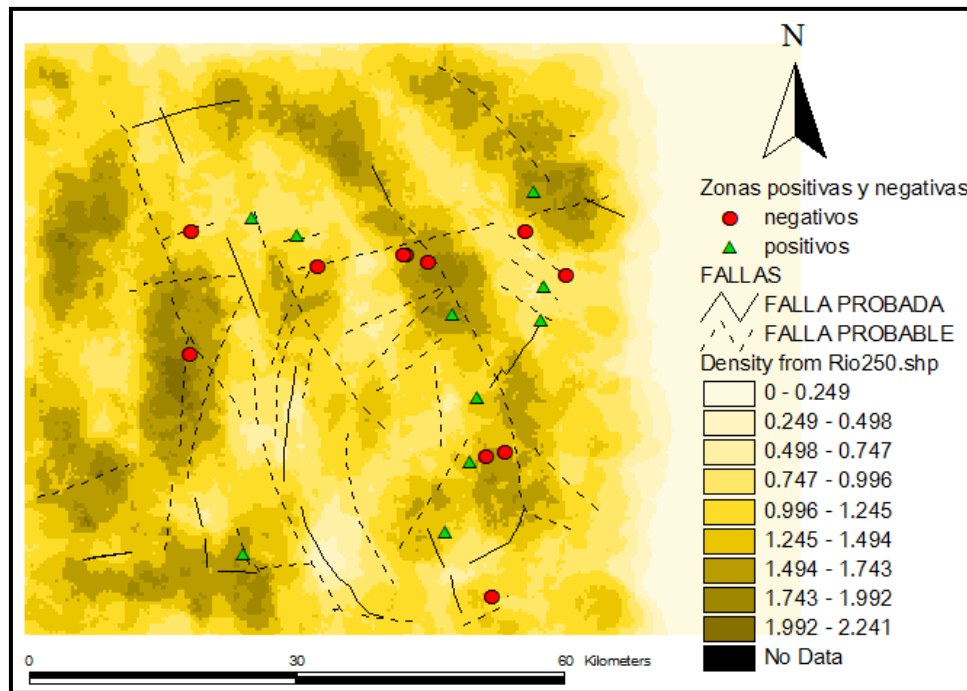
Mediante la extensión GEO-HMS se puede obtener la red de drenaje tomando en consideración una combinación en el procesamiento que evalúa las pequeñas cuencas de aporte. De la observación de la red de drenaje así obtenida (figura 10) se puede apreciar un comportamiento rectilíneo en la aparición de afluentes con ángulos casi perpendiculares. Lo anterior indica que estas corrientes de menos importancia están regidas también por los efectos tectónicos.



**Figura 10. Comparación de ríos principales con la red de drenaje calculada**

En la figura 10 se puede apreciar que los ríos principales tienen el mismo comportamiento de toda la red de drenaje. El comportamiento paralelo y no superpuesto de los ríos principales mostrados con la red de drenaje calculada se debe simplemente a un problema dado por la escala de la información cartográfica existente, ya que en el caso de los ríos principales se tomó de la digitalización desde el mapa geológico escala 1:1000000 y la red de drenaje por el procesamiento tomando como base el MDE a escala 1:100000. En sentido general se puede apreciar que la red de drenaje se rige por los lineamientos que posiblemente son de origen tectónico lo cual, como se dijo anteriormente, se deduce de la geometría de la red.

En la figura 11 se presentan zonas de curvatura cercanas a cero y alta densidad de fracturas. Aquí se puede observar que en los estudios de campo anteriores realizados por otros investigadores, las propuestas de perforación coinciden casi siempre con las presentadas en este trabajo.



**Figura 11. Zonas favorables para la infiltración de aguas de escurrimiento**

Por otro lado, la observación de los mapas de pendientes y del aspecto de la pendiente hacen posible pronosticar si el posible curso de las aguas infiltradas puede estar en el sentido de posibles zonas de acumulación de aguas que puedan tener el papel de reservorios locales.

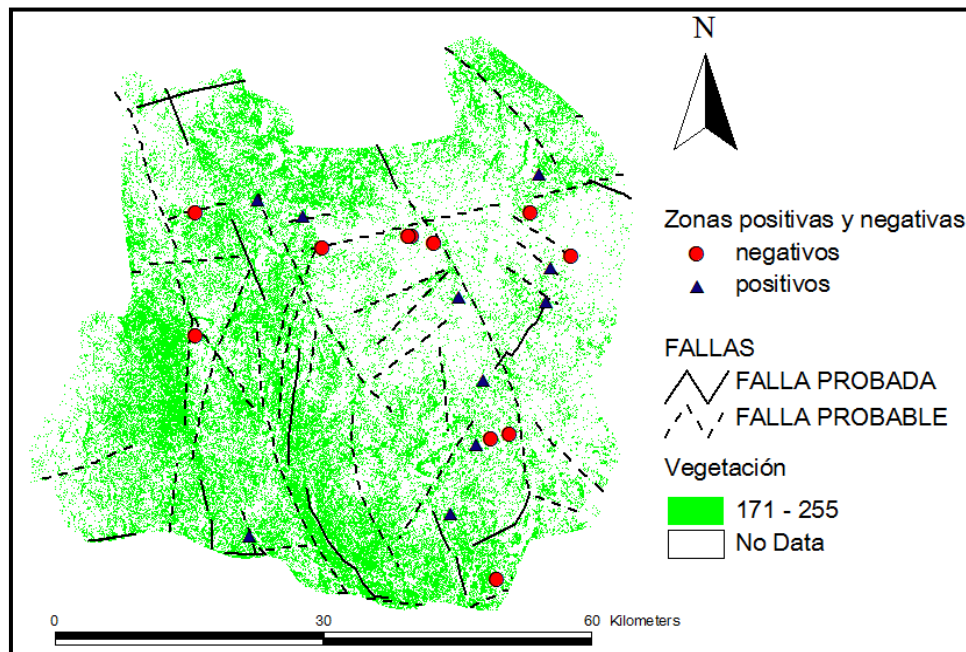
Otro aspecto indirecto de interés lo constituye el análisis de la densidad y vigor de la vegetación la cual puede ser obtenida en una primera fase en estudios de carácter regional, mediante el estudio de imágenes satelitales espectrales. Estas características pueden ser calculadas mediante el índice NDVI utilizado en la ecuación (1):

$$NDVI = (IR_{cercano} - R) / (IR_{cercano} + R) \quad (1)$$

donde:  $IR_{cercano}$  es la banda espectral correspondiente al infrarrojo cercano.  
 $R$  es la banda rojo.

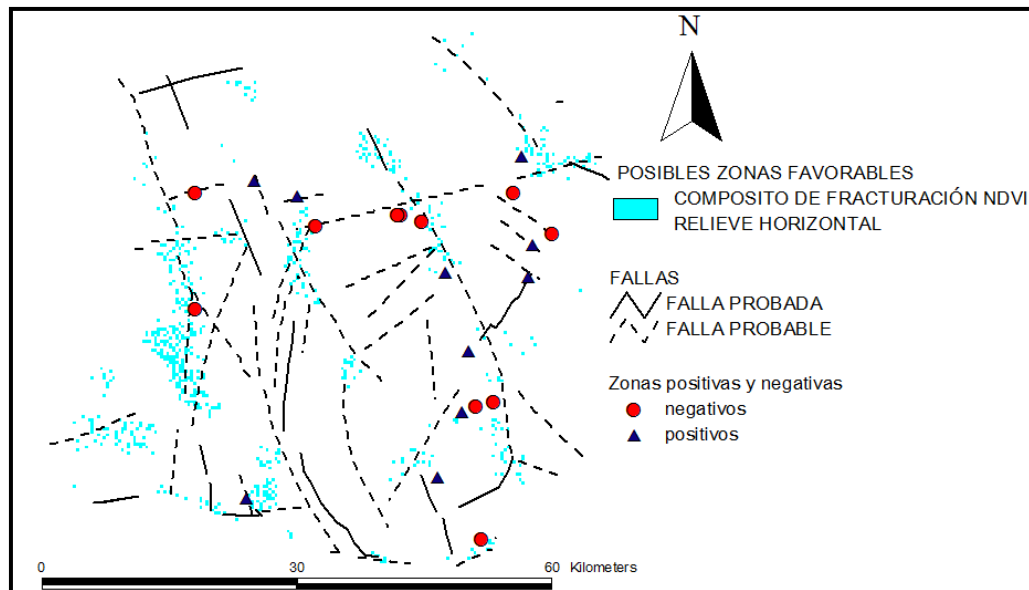
Las imágenes espectrales utilizadas corresponden al satélite LANDSAT 7 ETM+ y para el procesamiento se utilizó el software MultiSpec v3.1. Se obtuvieron las imágenes de falso color RGB tomándose en este caso el valor calculado del NDVI en lugar de la banda G correspondiente al color verde según el procedimiento mostrado en Hernán (2005).

Las imágenes obtenidas fueron exportadas al SIG y manipuladas con el auxilio de la extensión Grid Analyst del ArcView para convertir las imágenes de cada una de las bandas al formato grid. Se trabajó fundamentalmente con la grid correspondiente al valor de NDVI. Los valores más altos corresponden a las zonas con mayor vigor y/o densidad de vegetación lo cual puede ser de interés para el cumplimiento de los objetivos perseguidos en este trabajo, si se asocian estas zonas con una acumulación de mayor humedad en el suelo, figura12.



**Figura 12. Zonas de mayor vigor de la vegetación**

Como resultado del procesamiento de los datos disponibles fueron establecidos los mapas base con el objetivo de delimitar las áreas favorables para la prospección de las aguas subterráneas. De acuerdo con los criterios de integración de la información procesada se presenta en la figura 13 un mapa pronóstico que integra toda la información tratada.



**Figura 13. Mapa pronóstico**

## CONCLUSIONES

- Con los procedimientos propios de los estudios hidrológicos se logra definir la posición de los lineamientos tectónicos y la ubicación de las áreas con mayores posibilidades de acumulación de aguas de escorrentía y por tanto de mayores posibilidades de infiltración.
- El procesamiento de las imágenes satelitales posibilita la determinación de las áreas con mayor densidad de vegetación silvestre lo cual generalmente ocurre en zonas de mayor acumulación de agua en el suelo.
- Una adecuada conceptualización y el uso de los Sistemas de Información Geográfica como manipulador cartográfico de diversas fuentes independientes con sus posibilidades para el geoprocésamiento y gerencia de la información permiten, mediante el análisis combinado de la información, resolver la tarea de determinar las zonas de mayor probabilidad de ocurrencia de las aguas subterráneas en rocas cristalinas fracturadas.

## RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio cuantitativo mediante el método de reconocimiento de patrones supervisado para seleccionar con mayor confiabilidad las áreas más perspectivas.
- Realizar trabajos geofísicos en áreas recomendadas para la validación del procedimiento propuesto mediante la utilización del Campo Eléctrico Natural Circular y Sondeo Eléctrico Vertical.

## REFERENCIAS

- Alaminos C., Luis Miguel G., Gallardo J., Sousa H. de A. y Fiel P. F.** (2008). “Primer Relatorio Hidrológico sobre el área de Caimbambo”, Depto. de Geofísica, Facultad de Ciencias, Universidad Agostinho Neto, Luanda, Angola.
- Araújo A. G. y Guimaraes F.** (1992). “Geología de Angola. Noticia explicativa de la carta geológica a escala 1:1 000 000”, Instituto Geológico de Angola, Luanda, Angola. (1999). “Manual ArcView 3.3”, Enviromental System Research Institute Inc., Redlands, EUA.
- Catanha M.** (2006). “Caracterización de los peligros naturales en la cuenca del río Kwanza, bajo la influencia de la presa de Capanda en Angola”. Tesis de Máster en Geofísica Aplicada. Dpto. de Geociencias, Fac. Ing. Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.
- Hernán M.** (2005). “Cálculo de NDVI con MultiSpec”. Cátedra Técnicas Espaciales de Análisis. Universidad CAECE, Argentina. Extraído de: <http://www.caece.edu.ar/tea> en septiembre de 2011.
- Martín Loeches M.** (2008). “Fortalecimiento de las estructuras de agua y saneamiento en el municipio de Caimbambo, provincia de Benguela”. Informe visita del 21 de Nov. al 6 de Dic. de 2008 al área de proyecto de CRE. Universidad de Alcalá, España.