



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO

“Dr. Antonio Núñez Jiménez”

FACULTAD GEOLOGÍA MINAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

**TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO
GEÓLOGO**

**Influencia de la pluviometría sobre la humedad
natural de los suelos. Caso de estudio: Área de la
Planta Ferroníquel Minera SA. Moa**

Autor: Mandela D. Christian

**Tutores: MSc. Amalia Beatríz Riverón Zaldivar
MSc. Marcos Miguel Medina Arce.**

Moa- 2010

AGRADECIMIENTOS

Primeramente Gracias al **Señor** por su infinito amor, sabiduría, guía y sostén durante mi vida.

A mi familia: Mi mamá **Gloria Christian**, por sus oraciones, constante amor, apoyo y fe en mí durante toda mi vida.

 Mi papá **Clarence Christian** por sus sacrificios y animarme siempre.

 Mi hermana **Roxanne**, tía **Helen** y **abuelita** cuyas oraciones me han sostenido.

Mis tutores: **MSc. Beatriz Riverón** por su excelente tutoría y hacer de un tema actual y complicado algo muy sencillo, práctico y agradable. A su familia por “prestármela” por tanto tiempo.

MSc. Marcos Medina por su amplia experiencia al convertir la estadística en un tema agradable para mí. Por hacerme correr detrás de él día y noche y mantenerme en buena forma física.

Los profesores del departamento de Geología por sus magníficas clases.

Para mis amigos: Extranjeros, especialmente **Broderick** quien ha sido mi hermano desde la preparatoria.

 Cubanos: **Daubel, Rayner, Pedro, Karina** y **sus familias** por aceptarme como parte de ellas.

El grupo de Geología 2005-2010. ¡Los mejores compañeros que pude tener y que extrañaré mucho!

A la **Revolución Cubana** por darme la oportunidad de perfeccionar mi educación y pulir mi intelecto.

A todos los que no he nombrado y que compartieron algún momento bueno o malo de mi vida cubana.

¡Muchas Gracias!

DEDICATORIA

A mi familia,

Mamá, papá, hermana, tía y abuelita

“Como resultado de su gran amor y sostén,

pude lograr el fin de este capítulo en el libro de mi vida”.

-Mandela-



PENSAMIENTO

**“Anything worth doing,
Is worth doing well”.**

**“Todo lo que vayas a hacer,
Vale la pena que lo hagas bien”.**

~ Sixth Form Siscerou Singers ~

ÍNDICE

Agradecimientos.....	i
Dedicatoria.....	ii
Pensamiento.....	iii
Índice.....	iv
Resumen.....	v
Abstract.....	vi
Introducción.....	1

CAPITULO I: CARACTERIZACIÓN DEL AREA DE LA PLANTA FERRONIQUEL MINERA SA.

1.1 Generalidades.....	23
1.2 Características Geológicas.....	28
1.3 Geología del área de estudio.....	29
1.4 Características Tectónicas del sector de estudio.....	31
1.5 Características Hidrogeológicas.....	36
1.6 Procesos Geodinámicos y Antrópicos.....	37

CAPITULO II: METODOLOGÍA Y VOLUMEN DE LA INVESTIGACIÓN DESARROLLADA EN EL ÁREA DE ESTUDIO

2.1 Introducción.....	45
2.2 Etapa preliminar: Recopilación y revisión de la información existente.....	46
2.3 Segunda etapa: Procesamiento de la información.....	47
2.3.1 Análisis de datos pluviométricos.....	49
2.3.2 Análisis de Varianza.....	52
2.3.3 Comportamiento espacio-temporal de la humedad natural en los suelos del área de la Planta Ferroníquel Minera SA.....	53
2.4 Tercera etapa: Interpretación de los resultados.....	54

CAPITULO III. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS. INFLUENCIA DE LA PLUVIOMETRÍA EN EL COMPORTAMIENTO DE LA HUMEDAD NATURAL DE LOS SUELOS DE LA PLANTA FERRONÍQUEL MINERA SA.

3.1 Introducción.....	55
3.2 Análisis de la pluviometría en el área de estudio. Interpretación de los resultados estadísticos.....	58
3.3 Análisis del comportamiento espacio temporal de la humedad natural de los suelos	62
3.4 Valoración de la relación de la pluviometría con la humedad natural de los suelos en el área de la planta Ferroníquel Minera SA en periodos húmedos y secos	69
Conclusiones.....	71
Recomendaciones.....	72
Bibliografías.....	73

RESUMEN

El estudio de las precipitaciones y su distribución espacio-temporal constituye una de las líneas de investigación en los estudios del ciclo hidrológico y de impacto ambiental. Su importancia está marcada por el hecho de que son las lluvias la principal fuente de alimentación de las aguas superficiales y subterráneas; y su distribución espacio-temporal es esencial para explicar hasta que punto ejerce influencia en las propiedades físico mecánicas de los suelos. Por tal motivo surge la presente investigación que tiene como objetivo valorar la influencia de la pluviometría en el comportamiento de la humedad natural de los suelos en el área de la Planta Ferroníquel Minera SA, que permite establecer criterios sobre el método de pre-secado a emplear en el proceso industrial y en una correcta planificación de las operaciones mineras.

Para ello se emplea un estudio estadístico de series temporales que se basa en la determinación de la estacionalidad por el método aditivo que sigue una serie de 21 años de datos pluviométricos registrados por 5 pluviómetros del área del estudio y un análisis de varianza por método de determinación simple; cuya aplicación se traduce en la definición con precisión de los períodos húmedos y secos que se manifiestan a nivel local y que permiten obtener la relación de la pluviometría con la humedad natural de los suelos.

ABSTRACT

The study of precipitation and its time-space distribution constitutes one of the routes of investigation used in studies of the hydraulic cycle and environmental impact. Its importance is marked by the fact that rain is the main source of superficial and ground water and its time-space distribution is essential for explaining the extent of its influence on the physical-mechanical properties of the soil. For this motive arises the present investigation which has as its objective to valorise the influence of pluviometry on the comportment of the natural humidity of the soils in the area of the Ferroníquel Minera SA Plant, which will permits one to establish criteria on the pry-drying method to be used during the industrial process and in the correct planning of mining operations.

In order to accomplish this, a statistical study of time series is carried out base on the determination of stations applying the additive method to a 21 year time series of pluviometric data registered from 5 pluviometers in the study area and an analysis of variance using the simple determination method; whose application is translated leading to a precise definition of the humid and dry periods that manifests on a local scale and permits one to obtain the relation between the pluviometry and the natural humidity of the soil.

INTRODUCCIÓN

Los suelos tienen su origen en los macizos rocosos preexistentes, que constituyen la roca madre, sometida a la acción ambiental disgregadora de la erosión en sus tres facetas: Física, Química y Biológica. Todo ello da lugar a fenómenos de disgregación y transformación de la roca creándose el **perfil de meteorización**. Cuando el suelo permanece in situ sin ser transportado se le conoce como **suelo residual**, y cuando ha sufrido transporte se denomina suelo **transportado** (González de Vallejo, 2002).

Los yacimientos ferroniquelíferos cubanos son genéticamente de tipo residual, formados por una corteza de intemperismo en forma de manto que descansa sobre la roca madre. Estas se encuentran desarrolladas sobre una cadena montañosa compuesta por rocas ultrabásicas serpentinizadas, en menor grado por rocas básicas y efusivas. (Almaguer Y, 2005)

La explotación de estos yacimientos ferroniquelíferos trajo consigo el desarrollo de una amplia infraestructura social y económica en Moa, donde las investigaciones geotécnicas han jugado un rol importante en este aspecto, ya que tanto la construcción de obras ingenieriles como la estabilidad de las mismas dependen de la correcta caracterización y clasificación que se realice a los suelos, por ser estos la base de las cimentaciones de cualquier obra que se realice en la región.

Un problema latente desde los inicios de la minería en la región de estudio, lo constituye la alta humedad natural del mineral en el proceso industrial de tipo carbonato amoniacal, dado por las condiciones climáticas (abundantes lluvias) e ingenieriles (suelos con alto contenido de humedad), aspecto que influye negativamente en las condiciones ambientales de los yacimientos y en el gasto energético que se incurre al secar el mineral que entra al proceso industrial.

En el análisis de esta característica, se le ha prestado poca atención a la influencia de la pluviometría en el comportamiento espacio temporal de la humedad natural de estos suelos. De manera que los resultados de esta investigación profundizan en el conocimiento de esta problemática y constituyen un aporte para la correcta planificación de la minería, con el consiguiente ahorro de recursos en el proceso industrial de la nueva planta de Ferroníquel que se construye en el municipio Moa.

Por ello surge la presente investigación titulada “Influencia de la pluviometría en el comportamiento de la Humedad natural de los suelos del área de la Planta Ferroníquel Minera SA. Moa” a partir del siguiente problema:

Problema.

La necesidad de valorar el comportamiento de la humedad natural de los suelos en el área de la planta Ferroníquel Minera SA, debido a la influencia de la pluviometría en el contenido de humedad de los mismos, que permite establecer criterios sobre el método de pre-secado a emplear en el proceso industrial así como una correcta planificación de las operaciones mineras.

Objeto de estudio.

El objeto de estudio en el que se desarrolla la presente investigación es la humedad natural de los suelos presentes en área de la planta Ferroníquel Minera SA, al SSW del poblado de Moa.

Objetivo general.

Valorar el comportamiento de la humedad natural de los suelos en el área de estudio, a partir de la influencia de la pluviometría en los mismos, que permita establecer criterios sobre el método de pre-secado a emplear en el proceso industrial y realizar una correcta planificación de las operaciones mineras.

Objetivos específicos.

- Determinar la presencia de estacionalidad de una serie temporal de datos pluviométricos entre 1989 – 2009.
- Determinar a través del análisis de varianza de clasificación simple si existen diferencias significativas entre los acumulados de precipitaciones por pluviómetros y meses.
- Determinar la variación espacio-temporal de la humedad natural de los suelos en el área de la planta Ferroníquel Minera SA.
- Valorar la relación de la pluviometría con la humedad natural de los suelos en el área de la planta Ferroníquel Minera SA.

Hipótesis

Si se realiza un correcto análisis pluviométrico a partir de determinar la estacionalidad de una serie temporal de datos pluviométricos entre 1989 – 2009 y las diferencias significativas entre los acumulados de lluvias por pluviómetros y meses, así como determinar la variación espacio-temporal de la humedad natural de los suelos en el área de estudio para los periodos húmedos y secos, entonces es posible valorar la influencia de la pluviometría en el comportamiento de la humedad natural de los suelos en el área de la planta Ferroníquel Minera SA, para establecer criterios sobre el método de pre-secado a emplear en el proceso industrial y una correcta planificación de las operaciones mineras.

Aportes científicos.

- Determinación de la presencia de estacionalidad de una serie temporal de datos pluviométricos entre 1989 - 2009.
- Determinación a través del análisis de varianza de clasificación simple si existen diferencias significativas de los acumulados de precipitaciones por pluviómetros y meses.
- Determinación de la variación espacio-temporal de la humedad natural de los suelos en el área de la planta Ferroníquel Minera SA.
- Valoración de la relación de la pluviometría con la humedad natural de los suelos en el área de la planta Ferroníquel Minera SA en periodos húmedos y secos.

Fundamento metodológico.

La valoración de la influencia de las precipitaciones en la humedad natural del suelo, se basa en la determinación de la estacionalidad que sigue una serie temporal de datos pluviométricos, para precisar los periodos húmedos y secos en que se divide la misma a lo largo del tiempo que se manifiestan a escala local y con ello valorar el comportamiento de la humedad del suelo para cada periodo.

La aplicación de los métodos estadísticos de análisis de series temporales, se traducen en impactos, que se manifiestan tanto a nivel social, ambiental como económico, al realizar mejor planificación de la minería y emplear la mínima cantidad de energía en el proceso de pre-secado del mineral.

Los resultados de esta investigación pueden ser utilizados por Recursos Hidráulicos y por los directivos de la planta Ferroníquel Minera SA responsables estos últimos de aplicar los mismos ya que estos suelos constituyen la materia prima inicial del proceso metalúrgico de la planta.

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL DE LA INVESTIGACIÓN

En el presente siglo XXI, los problemas del desarrollo sostenible, en un frágil equilibrio medioambiental sometido a la inevitable confrontación entre las consecuencias del progreso y los procesos geológicos junto a la construcción de diversas obras ingenieriles en condiciones geológicamente adversas, constituyen prioridades de la ingeniería geológica. La necesidad de estudiar geológicamente el terreno como base de partida para los proyectos constructivos de grandes obras es indiscutible en la actualidad, y constituye una práctica obligatoria para esta ciencia. Establecida la relación entre los factores geológicos y los problemas geotécnicos, interpretando la geología desde la ingeniería geológica se puede determinar y predecir el comportamiento del suelo. (González de Vallejo, 2002)

No es un secreto que la acción del hombre al realizar trabajos constructivos, en un entorno geográfico concreto como el que nos ocupa, altera las condiciones del medio natural al provocar variaciones en la constitución y propiedades físico-mecánicas del suelo, por ser estas las que permiten clasificar y zonificar adecuadamente los suelos a partir de definir las características iniciales del terreno.

Una de las propiedades físicas que identifica la consistencia inicial del suelo lo constituye la definición del contenido de humedad natural (ω) expresada en porcentaje (%) que no es más que la relación entre el peso del agua que contiene la muestra y el peso de sus sólidos. (Gonzalez de Vallejo, 2002)

Actualmente se utilizan técnicas analíticas de determinación de la Humedad natural de los suelos tanto en el campo por el Método del alcohol, del mechero y de Speedy, como en el laboratorio por el Método de secado en la estufa (ASTM, 1993)

Para la base teórica de la investigación se realizan consultas de las bibliografías relacionadas con la temática tratada, los métodos estadísticos empleados en el análisis de series temporales y las aplicaciones de estos. Desde el punto de vista conceptual, se parte de las definiciones que de suelos, humedad natural y análisis de series temporales se han publicado y que a continuación se analizan.

Suelos

Desde diferentes ciencias se abordan definiciones de Suelos; para la presente investigación el concepto que se utiliza es dado por la Ingeniería Geológica, que define **el suelo**, como un agregado de minerales unidos por fuerzas débiles de contacto, separables por medios mecánicos de poca energía o por agitación en agua. Como se observa en la figura 1, el suelo está constituido por la fase sólida, líquida y gaseosa. (González de Vallejo, 2002)

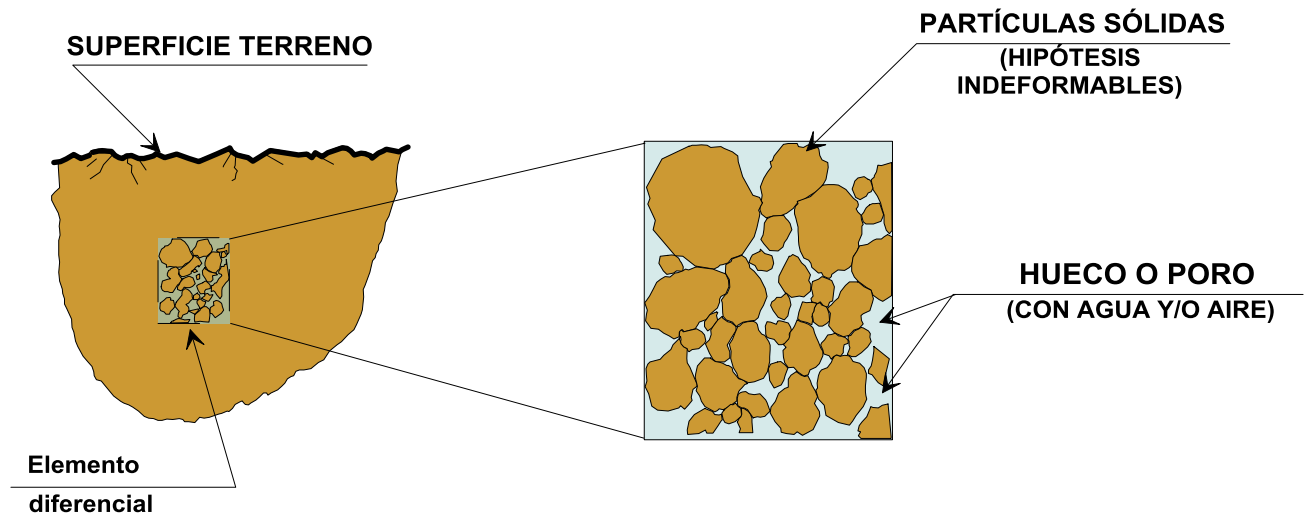


Figura 1. Constitución del suelo. (Modificado de González de Vallejo. 2002)

Precisamente, para estudiar un material tan complejo como el suelo (con diferentes tamaños de partículas y composición química) es necesario seguir una metodología con definiciones y sistema de evaluación de propiedades. Así se han clasificado los suelos en cuatro grandes grupos en función de la granulometría: (ASTM, 1993)

- **Gravas**, con tamaño de grano entre unos 8-10 cm y 2 mm, los granos se observan directamente. No retienen el agua por la inactividad de la superficie y los grandes huecos existentes entre partículas.
- **Arenas**, con partículas comprendidas entre 2 y 0.060mm, todavía son observables a simple vista. Cuando se mezclan con el agua no se forman agregados continuos, sino que se separan de ella con facilidad.
- **Limos**, con partículas comprendidas entre 0.060mm y 0.002mm. Retienen el agua mejor que los tamaños superiores. Si se forma una pasta agua-limo y se coloca sobre la mano, al golpear con la mano se observa como el agua se exhuda con facilidad.

- **Arcillas**, formadas por partículas con tamaños inferiores a los limos (0.002mm). Se trata de partículas tamaño gel y se necesita que existan transformaciones químicas. La capacidad de retención del agua sea muy grande.

La existencia en el área de estudio de un macizo rocoso de composición ultrabásica, un clima cálido y húmedo, un relieve que no permite que el escurrimiento superficial favorezca la erosión y transporte de los productos de meteorización y la presencia de un sistema de grietas y fisuras de diversos orígenes propician el desarrollo de potentes horizontes lateríticos, utilizados como base natural de las construcciones.

La figura 2 representa un perfil laterítico generalizado de la región de Moa en el cual se distinguen 4 zonas que se caracterizan a continuación de arriba hacia abajo (Brand N., Butt C, Elias M. (1998):

1 - *Ferricretas*: presenta un color marrón oscuro, con tonalidades negras. En la parte superficial se observan partículas de forma esférica de hidróxidos de Fe, frecuentemente cementadas entre sí por material ferruginoso, de composición similar al que forman los propios hidróxidos, estos procesos de cementación dan lugar al crecimiento de capas de hidróxidos de hierro de variadas dimensiones, que pueden tener varias toneladas de peso. El proceso de cementación de los hidróxidos de hierro es el resultado de los procesos a los que está expuesto el corte laterítico en condiciones naturales, debido a las variaciones climáticas anuales. La potencia es variable entre 0.2-15 m. Granulométricamente predomina la fracción areno gravosa.

2- *Zona limonítica*: se caracteriza por un color ocre o marrón oscuro. Su potencia es variable 2-6 m. Presenta una humedad mayor que la zona superior. La granulometría es limo-arcillosa, predominando la fracción limo.

3- *Zona de transición*: constituye la zona de transición entre la zona limonítica y la saprolítica. La coloración del corte es pardo-amarilla. Su granulometría es limo-arcillosa, con predominio de la fracción limo. En su interior se pueden encontrar bloques de la zona saprolítica. Esta zona se corresponde con la zona de variación del nivel freático del agua durante las diferentes estaciones del año (ciclos de secado y humedecimiento), aspecto que favorece la hidratación, disolución, transporte y precipitación de los diferentes elementos o compuestos químicos, así como el desarrollo de los procesos de oxidación de los minerales por la entrada de los diferentes gases atmosféricos (principalmente oxígeno) al bajar el nivel freático.

4- *Zona saprolítica*: la coloración verde-amarilla varía en relación con su grado de alteración. Esta zona presenta mayor irregularidad en cuanto a su extensión y potencia. Normalmente el material se encuentra en estado saturado. La granulometría es de tipo limo-arcilloso, predomina la fracción limo en más del 50% de su peso. Está compuesta por peridotitas y harzburgitas serpentinizadas muy meteorizadas.

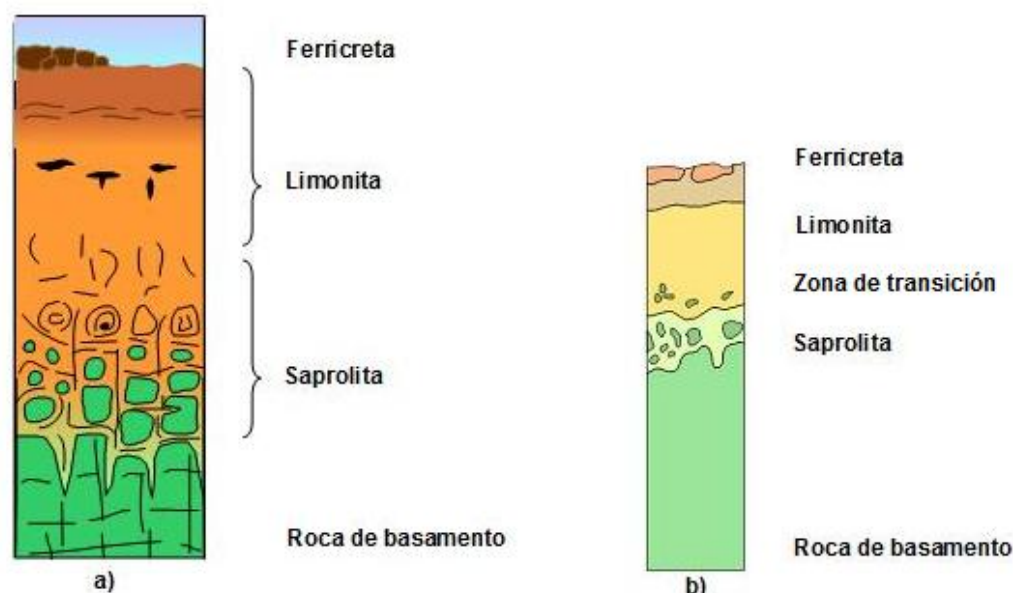


Figura 2.a) Perfil laterítico desarrollado sobre roca ultramáfica en una zona tropical, **b)** Perfil laterítico generalizado de tipo oxido de la región de Moa. (Modificado Brand N.W., Butt C.R.M., Elias M. (1998))

El estudio geotécnico del perfil laterítico del área de estudio tropieza con particularidades muy específicas para cada zona del corte, que hacen clasificar las mismas en diferentes tipos de suelos según el Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (SUCS).

Por ello se realiza la división en dos grandes grupos para cada zona del perfil laterítico (Riverón B, 1996) según su composición granulométrica:

- Suelos gruesos: Gravas y arenas
- Suelos finos: Limos y Arcillas

Humedad Natural

Para identificar el estado inicial del suelo una vez que ya se conoce su tipo, se determina la concentración relativa de sólidos, volumen relativo de huecos y contenido relativo de agua en un volumen elemental representativo de un punto o zona del suelo.

Al definir el contenido de humedad natural del suelo (ω %) y compararlo con las humedades del límite líquido y el límite plástico, se tiene una idea de la consistencia inicial del suelo y si las muestras representan suelos diferentes (González de Vallejo, 2002). Por ello es un parámetro que depende de la porosidad, índice de poros, cantidad de precipitaciones y composición granulométrica y suele variar entre 5-8% en suelos granulares (arenas y gravas) y entre 60 y 70 % en suelos arcillosos, aunque en algunos suelos orgánicos y marisma alcanzan valores de 300-400%.

Para la determinación de la humedad natural en el laboratorio se emplea el Método de la estufa siguiendo el procedimiento según la **NC 67: 2000 Determinación del contenido de humedad natural de los Suelos y Rocas en el Laboratorio**, basada en las ASTM.

Se calcula la humedad (ω) mediante la siguiente expresión:

$$\omega = \frac{W_h \cdot T - W_s \cdot T}{W_s \cdot T - T} \cdot 100$$

donde:

ω : es el contenido de humedad respecto a la masa seca, en tanto por ciento;

$W_h T$: es la masa húmeda más la masa del recipiente (pesafiltro), en gramos;

$W_s T$: es la masa seca más la masa del recipiente (pesafiltro), en gramos;

T : es la masa del recipiente (pesafiltro) (tara), en gramos.

Las Precipitaciones

Anteriormente se menciona en este apartado que uno de los parámetros que influye en la humedad natural de los suelos son las precipitaciones. El estudio de las mismas es necesario por sus múltiples aplicaciones, entre otras, para la estimación de avenidas, para el cálculo y diseño de las estructuras de conservación de suelos y para conocer su influencia en la humedad de los suelos.

En el concepto de **precipitación** se incluye todo tipo de agua que cae o se deposita sobre la superficie terrestre, ya sea en forma líquida o sólida; y su estudio es un tema necesario e imprescindible que requiere cada día un mayor desarrollo y avance en las investigaciones de este campo para conocer realmente la influencia y comportamiento de las mismas. La medida de la precipitación sobre el área del estudio se realiza por medio de los pluviómetros. Se basan en la recogida de la precipitación en un elemento

denominado colector. La precipitación se mide por volumen y su registro se realiza por lectura directa o por registro gráfico o electrónico (Rodríguez, R et al. 2004).

Cuando se analizan series de datos pluviométricos es habitual encontrarse con períodos más o menos largos en los que en alguna de las estaciones falten datos. Para poder rellenar estos datos existen varios criterios, siendo el más extendido el del National Weather Service, basado en una correlación según la fórmula:

$$P = \frac{P_i / r_i^2}{1 / r_i^2}$$

donde P es la precipitación que se extrapola y P_i las precipitaciones de las estaciones existentes en el entorno de la que desconocemos la precipitación, y r_i las distancias desde esta estación a las estaciones próximas.

Es frecuente que existan cambios en la situación de los pluviómetros, o en su instrumentación o bien en los procedimientos de observación. Estos cambios muchas veces no son anotados ni publicados con los datos pluviométricos, por lo que es muy recomendable realizar un análisis de los mismos que permita detectar errores sistemáticos. El sistema habitual es el de las dobles masas. Para ello se dibujan los registros de lluvia acumulados de dos estaciones próximas; un cambio de pendiente indica la existencia de una alteración o de un error en una de las estaciones pluviométricas (Rodríguez, R et al. 2004).

En una cuenca suficientemente extensa pueden existir datos de varias estaciones pluviométricas y se plantea el problema de evaluar una precipitación media. Para ello existen los siguientes métodos de cálculo:

1. Media aritmética de las precipitaciones. Se calcula la precipitación media como la media aritmética de las precipitaciones. Este método sólo es aceptable si existen muchas estaciones y se observa que la precipitación es similar en todas ellas. Además, el valor calculado no incluye ningún tipo de valoración de la distribución espacial de las estaciones.

2. Método de polígonos de Thiessen. Se basa en asignar cada punto de la cuenca a la estación más próxima; se deben unir las estaciones de dos en dos y dibujar las mediatrices de estos segmentos, asignando a cada estación el área limitada por las poligonales que forman las mediatrices. La precipitación media será $P_m = (P \cdot S) / (S)$.

3. Método de las isohietas. En la hipótesis de tener suficientes datos como para poder dibujar las isohietas, se puede utilizar este método que consiste en asignar al área entre cada dos isohietas la precipitación media de ellas. Las **isohietas** son líneas que unen puntos con el mismo valor de precipitación.

Análisis de Series Temporales

El conocimiento futuro o pronóstico es uno de los objetivos fundamentales del análisis de datos y constituye la razón de ser de las series cronológicas o temporales, su esencia consiste en el estudio del comportamiento en el pasado del fenómeno a analizar que para este caso son las precipitaciones. Sin perder de vista que se revelan las características del comportamiento no las causas de este cambio en el tiempo (Cue J, 1987). Cuando se habla de una secuencia de valores observados a lo largo del tiempo, y por tanto ordenados cronológicamente, se denomina, en un sentido amplio, serie temporal.

Si conocidos los valores pasados de la serie, no fuera posible predecir con total certeza el próximo valor de la variable, se dice que la serie es no determinista o aleatoria, y lógicamente es de éstas de las que se ocupa el "**análisis de series temporales**"

Los objetivos del análisis de series temporales son diversos, pudiendo destacar la **predicción, el control de un proceso y la simulación de procesos.**

Se denomina **predicción** a la estimación de valores futuros de la variable en función del comportamiento pasado de la serie.

En la teoría de **control de procesos**, se trata de seguir la evolución de una variable determinada con el fin de regular su resultado.

La **simulación** se emplea en investigación aplicada, cuando el proceso es muy complejo para ser estudiado de forma analítica.

Un concepto importante que se encuentra en este ámbito, es el de procesos estacionarios. Una serie es **estacionaria** cuando se encuentra en equilibrio estadístico, en el sentido de que sus propiedades no varían a lo largo del tiempo, y por lo tanto no pueden existir tendencias.

Un proceso es **no-estacionario** si sus propiedades varían con el tiempo, como el clima, Por tanto como los datos que ocupa a este trabajo si varían con el tiempo entonces se debe partir de su regularización para eliminar los posibles errores introducidos. (Aguirre J.A, 1994)

Con el modelado clásico de una serie temporal, lo que se persigue es:

- Presentar un gráfico de la evolución de la variable a lo largo del tiempo.

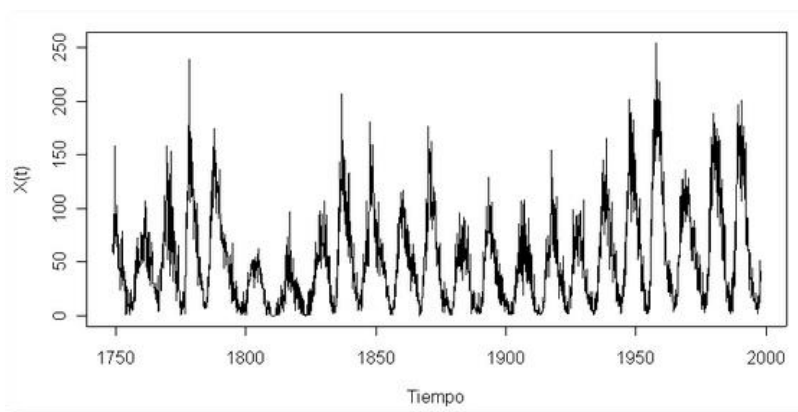


Figura 3. Representación de una serie temporal

- Determinar si la secuencia de valores es completamente aleatoria o si, por el contrario, se puede encontrar algún patrón a lo largo del tiempo, pues sólo en este caso se puede seguir con el análisis.

La metodología tradicional para el estudio de series temporales se basa en descomponer las series en: **tendencia, variación estacional o periódica, el ciclo** y otras **fluctuaciones o perturbaciones aleatorias o error**.

- **Tendencia (Tt).** Es la dirección general de la variable en el periodo de observación, es decir el cambio a largo plazo de la media de la serie.
- **Estacionalidad (St).** Corresponde a fluctuaciones periódicas de la variable, en periodos relativamente cortos de tiempo.

- **Ciclo (Ct).** Es un movimiento oscilatorio u ondulatorio en la serie temporal que se diferencia de la estacionalidad en la periodicidad.
- **Otras fluctuaciones irregulares (Et).** Después de extraer de la serie la tendencia y variaciones cíclicas, quedará una serie de valores residuales, que pueden ser o no totalmente aleatorios. Se vuelve a estar como en el punto de partida, pues ahora también interesa determinar si esa secuencia temporal de valores residuales puede o no ser considerada como aleatoria pura.

En la figura 4 puede observarse un ejemplo de una serie temporal en la que se aprecia la existencia de las distintas componentes comentadas

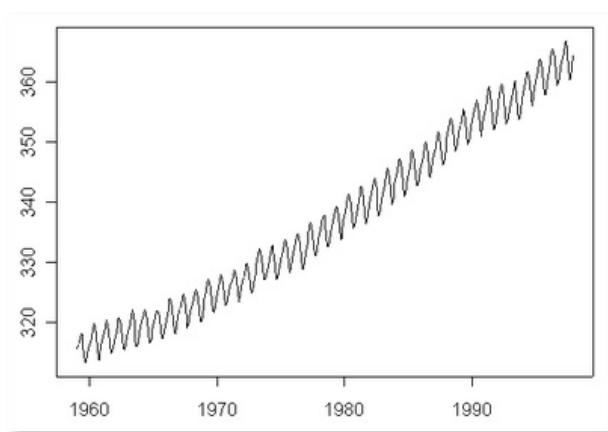


Figura 4. Serie temporal con tendencia

Estas cuatro componentes no son más que cuatro series temporales que se combinan en determinada forma para dar lugar a la serie original. A la forma que se combinan estas componentes se le llama **MODELO**, siendo de vital importancia los modelos aditivos y multiplicativos. El problema central que se presenta en la investigación de una serie temporal es la identificación de las componentes, de forma tal que puedan ser aisladas y estimadas por separado.

Estimación de las componentes de una serie temporal

La estimación de la serie exige primeramente la adopción de un modelo y a partir de él ir estimando componente a componente y eliminando su efecto cada vez que una es estimada. Luego se continúa con la elección del orden de estimación: estacionalidad, tendencia, ciclo y perturbaciones o error. Aunque el valor futuro de una serie temporal no sea predecible con total exactitud, para que tenga interés su estudio, el resultado

tampoco puede ser completamente aleatorio, existiendo alguna regularidad en cuanto a su comportamiento en el tiempo, lo que hará posible su modelado y por ende, en su caso, la predicción.

La búsqueda de regularidades y de patrones ha sido siempre una de las tareas básicas de la ciencia, y muchas veces se descubren simetrías que sirven de fundamento para la predicción del comportamiento de los fenómenos, incluso antes de que se entienda la razón o causa que justifica esa regularidad. Por lo tanto, si se pueden encontrar patrones de regularidad en diferentes secciones de una serie temporal, se pueden también describir mediante modelos basados en distribuciones de probabilidad.

La secuencia ordenada de variables aleatorias $X(t)$ y su distribución de probabilidad asociada, se denomina **proceso estocástico**. Un proceso estocástico es por tanto el modelo matemático para una serie temporal. (Chatfield, C. 2003)

La primera componente que debe ser estimada es la **estacionalidad** pero para ello se debe aislar de la tendencia y el ciclo, lo cual se logra a través de la técnica del filtraje cuyo objetivo es eliminar los movimientos periódicos o estacionales. El filtro que más se emplea son la **media móvil**: que es una transformación lineal que a cada serie se le asocia otra serie temporal con ciertas particularidades. Es decir se obtiene una serie final más alisada que la serie original o sea se amortiguan los picos bruscos y las perturbaciones. (Cue J, 1987; Colectivo de autores, 2004)

Una media móvil se calcula, para cada punto, como un promedio del mismo número de valores a cada lado de ese punto. Así una media móvil de tres puntos se calcula como:

$$m(x_t) = \frac{x_{t-1} + x_t + x_{t+1}}{3}$$

Mientras que una media móvil de cuatro puntos viene dada por

$$m(x_t) = \frac{(x_{t-2} / 2) + x_{t-1} + x_t + x_{t+1} + (x_{t+2} / 2)}{4}$$

Cuando la cantidad de puntos de la media móvil es par, se toma la mitad de los valores extremos.

Una vez que se aplica un proceso clásico de descomposición mediante un procedimiento de medias móviles a los datos, se obtienen las siguientes series como se muestra en la figura 5:

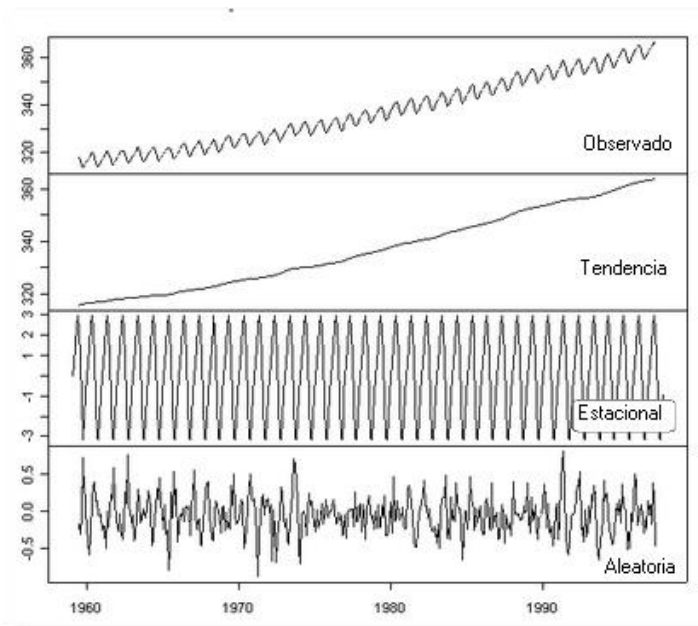


Figura 5. Descomposición de una serie temporal en sus componentes

Para analizar la **estacionalidad** de una serie se introduce un concepto de gran interés en el análisis de series temporales: la **función de autocorrelación**, que mide la correlación entre los valores de la serie distanciados un lapso de tiempo k .

La fórmula del coeficiente de correlación simple, dados N pares de observaciones y, x :

$$r = \frac{\sum (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2 \sum (x_i - \bar{x})^2}}$$

De igual forma, dada una secuencia temporal de N observaciones $x_1 \dots x_N$, se puede formar $(N-1)$ parejas de observaciones contiguas $(x_1, x_2), (x_2, x_3), \dots (x_{N-1}, x_N)$ y calcular el coeficiente de correlación de estas parejas. A este coeficiente se le denomina **coeficiente de autocorrelación** de orden 1 y se denota como r_1 . Análogamente se pueden formar parejas con puntos separados por una distancia 2, es decir $(x_1, x_3), (x_2, x_4)$, etc. y calcular el nuevo coeficiente de autocorrelación de orden 2. De forma general, si se

preparan parejas con puntos separados a una distancia k , se calcula el coeficiente de autocorrelación de orden k .

Al igual que para el coeficiente de correlación lineal simple, se puede calcular un error estándar y por tanto un intervalo de confianza para el coeficiente de autocorrelación.

La **función de autocorrelación** es el conjunto de coeficientes de autocorrelación r_k desde 1 hasta un máximo que no puede exceder la mitad de los valores observados, y es de gran importancia para estudiar la estacionalidad de la serie, ya que si ésta existe, los valores separados entre sí por intervalos iguales al periodo estacional deben estar correlacionados de alguna forma. Es decir que el coeficiente de autocorrelación para un retardo igual al periodo estacional debe ser significativamente diferente de 0. (Aguirre A, 1994)

Estimación de la estacionalidad según el modelo aditivo.

La serie original X_t bajo un modelo aditivo tiene la forma: $X_t = T_t + S_t + C_t + E_t$ y los promedios móviles se plantea que no poseen estacionalidad, es decir, sólo están compuestos por tendencia y ciclo pues incluso las perturbaciones aleatorias se han atenuado (Cué J, 1987) por tanto, es lícito suponer que:

$$M_t^c = T_t + C_t$$

Por lo que

$$X_t - M_t^c = X_t - T_t - C_t = S_t + E_t$$

En consecuencia al restar de la serie original la serie de promedio móviles se obtiene una serie que sólo contiene estacionalidad y error.

La estacionalidad en el modelo aditivo se supone constante de un año a otro y sólo diferenciándose en los tiempos que componen el año, es decir, en los meses, trimestres, etc. En consecuencia la serie $S_t + E_t$ sólo se diferencia de un año a otro en los errores y si se promedian los valores correspondientes al mismo trimestre o mes en todos los años el error por su naturaleza tiende a compensarse y de esta forma se obtiene la magnitud constante que corresponde a la estacionalidad del trimestre o mes que se ha utilizado para el cálculo. Es útil confeccionar una tabla para la estimación de los coeficientes estacionales.

A continuación se explica la forma de calcular las columnas de dicha tabla y los pasos a seguir:

Paso 1: Primero se calculan las diferencias $X_t - M_t$ es decir, serie original menos promedio móvil.

Paso 2: Se calcula la fila total sumando cada columna.

Paso 3: El promedio de cada mes o trimestre está calculado y luego un promedio de los promedios calculados para cada mes o trimestre está obtenido.

Paso 4: El proceso de corrección se realiza con el objetivo de obtener coeficientes estacionales cuya suma sea cero para evitar que la estacionalidad introduzca una desviación sistemática, lo que ocurriría si no son corregidos. La corrección se halla de la forma siguiente.

A los promedios anteriores deben sumarse cantidades de forma tal que estos sumen cero, luego es necesario que suma de estas cantidades sea el recíproco del total de los promedios, el cual se reparte en partes iguales entre todos los promedios (de cada mes o trimestre).

Paso 5: Con este paso culmina la obtención de los coeficientes estacionales. A cada promedio se le introduce la corrección calculada en el paso 4 mediante la suma; en otras palabras la última fila de la tabla es la suma de las dos filas anteriores, la fila de los promedios y la fila de las correcciones coeficientes.

Se ha aislado ya un componente de la serie cronológica la cual se puede eliminar de la serie original restándole a cada valor el coeficiente estacional que le corresponde. Este proceso de obtener una serie sin componente estacional se conoce como desestacionalización y a la serie así obtenida se le llama serie desestacionalizada o estacionalmente ajustada.

Estimación de la estacionalidad en el modelo multiplicativo.

Igual que en el modelo aditivo el primer paso en la estimación de la estacionalidad es el cálculo de los promedios móviles y a continuación se divide la serie original entre la serie de promedios móviles (Cue J, 1987) o sea:

$$\frac{X_t}{M_t} = \frac{T_t * S_t * C_t * E_t}{T_t * C_t} = S_t * E_t$$

Ya que se acepta que los promedios móviles representan la tendencia y el ciclo. La serie así obtenida es una serie más o menos periódica cuyos valores oscilan en torno a 1 pues la serie original y los promedios móviles toman valores próximos. La serie cociente $\frac{X_t}{M_t}$ constituye la base de la estimación de la estacionalidad, pero en este caso

lamentablemente no existen analogías con métodos de inferencia como en el caso aditivo ya que la circunstancia de que el error es multiplicativo no es usual en los restantes campos de la inferencia estadística. Se confecciona una tabla igual que la tabla usado en el modelo aditivo pero en lugar de la columna de $X_t - M_t$ se colocan los valores de $\frac{X_t}{M_t}$.

Pasos 2 y 3 iguales al modelo aditivo.

El método de estimación de los índices estacionales es similar a la estimación de los coeficientes estacionales, salvo en la corrección pues en los índices estacionales se corrigen de modo que la suma sea igual al número de la orden del promedio móvil usado para lo cual equivale a que el promedio de ellos sea 1. No existen razones de peso para proceder a esta corrección como en el caso del modelo aditivo, sólo criterios de índole subjetiva. El nombre de índice en lugar de coeficiente se debe a su naturaleza multiplicativa ya que muestra el cambio relativo de la serie introducida por la estacionalidad.

El proceso siguiente a la estimación de los índices estacionales es la desestacionalización de la serie dividiendo cada valor de la serie original por el índice estacional que le corresponde, de forma que obtenga una serie ajustada estacionalmente, o sea:

$$\frac{X_t}{S_t} = \frac{T_t + S_t + E_t + C_t}{S_t} = T_t + C_t + E_t$$

Siendo ya capaz de estimar la estacionalidad S_t ya de aislarla del resto de las componentes debe abordarse la estimación de otras componentes, la componente que debe estimarse a continuación es la tendencia la cual se estima a partir de la serie estacionalmente ajustada.

Para esta investigación no se determina la tendencia teniendo en cuenta que la componente de aleatoriedad en esta serie es muy alta por tanto los modelos de regresión, para la tendencia, no satisfacen las exigencias estadísticas para su aprobación, como los valores del coeficiente de correlación para los modelos están por debajo de 0.2.

Análisis de varianza (ANVA)

El ANVA como técnica estadística, permite el estudio de las características medidas u observadas cuyos valores dependen de varias clases de efectos que operan simultáneamente y mediante este análisis poder decidir si tales efectos son o no diferentes, es decir, esta técnica se basa en la división de la variabilidad total de una característica medible, es la variabilidad causada por diferentes factores que intervienen en el problema.

El análisis de las características observadas está basado en la modelación matemática de ellos mediante el modelo lineal. De ahí la existencia de diferentes modelos lineales en dependencia de la naturaleza del los efectos que actúan, que dependerá del fenómeno que se está estudiando y las condiciones bajo las cuales se realice.

El Análisis de Varianza se fundamenta en el procedimiento de un conjunto de datos que son la expresión cuantitativa de las características que se midan u observan en el fenómeno y que son considerados aleatorios

Técnica de solución de la ANVA

Sea el modelo lineal

$$Y_{ij} = \mu_j + e_{ij}$$

Y_{ij} : El acumulado de lluvias del año i del mes j o del pluviómetro i del mes j

Tratamientos o niveles $j = 1, \dots, b$ $b = 12$.

Observaciones: $i = 1, 2, \dots, a$ $a = 21$ o $a = 5$

μ_j : Es el valor esperado del acumulado de lluvias según el mes j.

e_{ij} : Error aleatorio debido a los factores no controlados

Como lo que interesa conocer son los efectos provoca la época del año sobre el acumulado esperado de las lluvias, se dice que

$$\mu_{ij} = \mu + \beta_j$$

μ : es la media de los μ_j

β_j : es el efecto del mes j

$$Y_{ij} = \mu + \beta_j + e_{ij}$$

La técnica del ANVA consiste en investigar si todas los μ_j son iguales, es decir,

$$H_o: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_b \quad j = 1, \dots, b \quad H_o: \beta_j = 0$$

H_1 : al menos una difiere $H_1 = \frac{\exists j}{\beta_j} \neq 0$

Que sería investigar si el modelo $Y_{ij} = \mu_j + e_{ij}$ ajusta bien.

Esta técnica se basa en la descomposición de la fuente de variación total en la variación debido a las diferencias dentro de los grupos (error puro) y entre los grupos (falta de ajuste).

$$(Y_{ij} - \bar{Y}) = (Y_{ij} - \bar{Y}_j) + (\bar{Y}_j - \bar{Y})$$

Variabilidad Total = Variabilidad dentro de grupos + Variabilidad entre grupos.

Si todas las μ_j fueran iguales entre sí, serían iguales a μ y la diferencia $(\bar{Y}_j - \bar{Y})$ se debería sólo a factores aleatorios por eso la comparación entre los cuadrados medios de las diferencias entre niveles (CMB) y dentro de niveles (CME) sirve para decidir si los valores esperados de todos los niveles son iguales o no.

CME: mide la dispersión provocada por los errores aleatorios e_{ij}

CMB: refleja la variabilidad provocada por la existencia de valores $\beta_j \neq 0$.

Algunos trabajos de análisis de series temporales con datos pluviométricos a nivel mundial.

Resch (2006) realiza un estudio con el fin de obtener información estadística del régimen pluviométrico de Canals en base a una serie de 71 años que va desde el año 1935 hasta el año 2005, analizando mes a mes la distribución promedio, su probabilidad y comparando con la situación del último año. Concluye que hay un marcado predominio de lluvias en primavera, verano y otoño. Este estudio es de gran valor empírico para el análisis de inversiones en la producción primaria del sector agropecuario y su posterior planificación de mediano y largo plazo de la provincia de Córdoba.

Martínez Cortizas y Castillo Rodríguez (1996) abordan el estudio de la estacionalidad pluviométrica en Galicia, por medio de un índice sencillo, IE, En función de los valores medios que toma el índice se presentan patrones de distribución con estacionalidad moderada a fuerte. El análisis de las series de precipitación para cada estación, revela que en la mayor parte del territorio ha habido años con niveles que van desde la estacionalidad débil a la concentración moderada. En base a la frecuencia de años en cada clase del IE, se han agrupado las estaciones mediante un análisis de asociación,

comprobando la validez de los grupos definidos por medio de un análisis discriminante. En el trabajo se realiza la cartografía de los distintos sectores geográficos de estacionalidad pluviométrica y se describen las relaciones entre las variaciones de la estacionalidad y los valores medios de precipitación anual, de invierno, verano, primavera y otoño. Haciendo referencia a los mecanismos climáticos que pueden estar implicados.

Contreras Riquelme (2000) en su trabajo realiza un análisis pluviométrico a través de datos de agua caída en los últimos cien años (1900-2000), proveniente de once estaciones meteorológicas, distribuidas a lo largo de la Región del Maule. Con los datos recopilados se procedió a hacer diferentes análisis para conocer la tendencia y la estacionalidad de las precipitaciones. La tendencia fue calculada considerando todas las series de datos para cada estación meteorológica y para la estacionalidad se creó un índice estacional decadal. Y a su vez determinar si hay alguna relación entre las precipitaciones con el fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) o con algunos de sus componentes: Temperatura Superficial del Mar (TSM) e Índice de Oscilación del Sur (IOS). La tendencia de precipitaciones mostró un leve descenso en el tiempo que comprende el estudio, y a su vez la estacionalidad de las lluvias presentó cambios en el comportamiento de éstas, con lo cual se concluye la presencia de un cambio climático desde el punto de vista pluviométrico.

Hernández Pardo (2007) aborda la temática sobre el cambio climático y la influencia en las variaciones de las precipitaciones, al realizar un estudio comparativo de dos series temporales una correspondiente a 1953 – 1963 otra de 1993 – 2003. Donde valoran cambios en los periodos húmedos y secos correspondientes a la región de estudio.

Heredia Calderón (2000) presenta una metodología que intenta dar una respuesta al problema por medio del análisis de frecuencia de los extremos hidrológicos en regiones afectadas por "El Niño" basada sobre una distribución de probabilidad de doble componente. El trabajo se basa en la metodología desarrollada en Italia por Gabriele y Arnell (1991) y a las aplicaciones desarrolladas para el noroccidente de Italia por Heredia-Calderón (1997). Para ello se emplea el uso de una distribución de probabilidad compuesta y a la utilización de técnicas de tipo regional para suplir la escasez de datos suficientes para la zona de Quito. Ecuador.

Seguinot Barbosa, J., Batista, J. L. y Sánchez Celada, M. (2008): abordan las causas que originan las inundaciones en Puerto Rico las cuales están asociadas a problemas tales como las modificaciones del terreno producidas por prácticas inadecuadas, la tala de árboles, los incendios, la urbanización y otras intervenciones adversas para el medio ambiente. También se realiza la evaluación espacio-temporal del peligro y la vulnerabilidad, por lo tanto del riesgo, ante inundaciones costeras en los municipios de Loíza y Carolina e identifica las áreas prioritarias de intervención especial tanto en las actividades anterior y posterior a un desastre, así como las áreas donde la inversión de capitales será más segura.

Estudios pluviométricos realizados en Cuba en la región Oriental.

El estudio del volumen, composición química del agua y su distribución espacio-temporal constituyen líneas de investigación en los estudios del ciclo hidrológico y los estudios de impacto ambiental (ejemplo: inundaciones, lluvias ácidas, corrosión, etc). Su importancia está marcada por el hecho de que son las precipitaciones atmosféricas la principal fuente de alimentación de las corrientes de agua superficial, la recarga de las aguas subterráneas, el aporte de sales solubles al suelo e influencia en el comportamiento de las propiedades de este.

El estudio de las precipitaciones en Cuba ha centrado la atención de un gran número de investigadores. Arellano et al (1992), Lecha et al (1994), Téllez (1995), Rodríguez y Téllez (1995), López et al (2000) y Batista et al (2002) han estudiado la distribución geográfica. Como principal conclusión de sus trabajos se extrae la elaboración de bases de datos y mapas de distribución espacial de las precipitaciones en las diferentes regiones del territorio nacional.

La influencia del factor topográfico sobre el volumen de las precipitaciones ha sido analizada por Díaz et al (1983) y González y Lora (1987) en la región oriental.

En el trabajo de Rodríguez y Sosa (1993) se evalúa la composición química de las precipitaciones asociadas a ondas tropicales en cuatro estaciones: una ubicada al sur de la región oriental, en la ciudad de Santiago de Cuba y tres en la región occidental.

El efecto del viento sobre las precipitaciones y el aporte de sales disueltas o contaminantes han sido tratados en limitados trabajos. Álvarez (1983) concluye que el

arrastre de las sales y elementos contaminantes se desarrolla en la dirección real del viento y no en la dirección del viento medio y comprueban que la dirección del viento condiciona el desarrollo y distribución de precipitaciones en Cuba. Cuesta et al (1998) evalúan la deposición de nitrógeno en Cuba.

El efecto de las precipitaciones sobre la recarga de los acuíferos es uno de los problemas menos estudiados y se limita a acuíferos concretos. Los trabajos de Terrero (1986), Rodríguez y Candela (1998) y Rodríguez (2002), determinan la recarga en rocas ultrabásicas y acuíferos ubicados al norte de Holguín, estiman la recarga entre 400 y 500 mm para Moa y entre 300 y 400 mm para Mayarí y Nicaro

El análisis estadístico y la estimación de los diferentes parámetros de las precipitaciones han centrado los objetivos de un gran número de trabajos (Fernández y Maxinova, 1990; Rodríguez y Sosa, 1993). Como conclusión se puede señalar que las precipitaciones muestran una gran diversidad en el ajuste de la distribución de frecuencias, siendo diferentes para el oriente, centro y occidente de Cuba.

En la presente investigación se realiza un análisis de la distribución de las precipitaciones para una serie de 21 años comprendida entre 1989 y 2009 en cinco pluviómetros ubicados en el área de la planta Ferroníquel Minera SA, con énfasis en el estudio de su influencia en el comportamiento de la humedad natural en los suelos.

CAPÍTULO I.

CARACTERIZACIÓN DEL AREA DE LA PLANTA FERRONIQUEL MINERA SA.

- Generalidades.
 - Características Geológicas.
 - Geología del área de estudio.
 - Características Tectónicas del sector de estudio.
 - Características Hidrogeológicas.
 - Procesos Geodinámicos y Antrópicos.
-

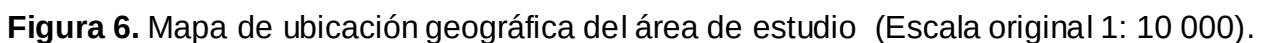
1.1 Generalidades.

El municipio de Moa tiene una extensión territorial de 732.6 kilómetros cuadrados. Se encuentra ubicado en la provincia Holguín, al noroeste de Cuba oriental. Limita al Este con el municipio Baracoa, separados por los ríos Jiguaní y Jaguaní; por el Sur limita con el municipio Guantanamero de Yateras; por el Oeste con los municipios de Frank País y Sagua de Tánamo y por el Norte con el estrecho de Bahamas en el Océano Atlántico. Próximos a sus costas se encuentran los cayos Moa Chico y Moa Grande situados frente a la Ciudad de Moa y Cayo del Medio en la Bahía de Yamanigüey.

El área de estudio se encuentra entre los sistemas montañosos Sierras de Nipe-Cristal y las Cuchillas de Moa, este sector se encuentra al SW de las instalaciones de la Empresa Mixta Moa Nickel S. A y al SSW de la ciudad de Moa; ocupando un área aproximadamente de 22,43 km² perteneciente a la concesión minera Moa Occidental II, que se localiza en la margen occidental del río Moa, (Figura 6), limitado por las coordenadas Lambert:

X: 692000-697000

Y: 216000-219000.



Orográficamente el territorio se caracteriza por una alta complejidad, predominando el relieve de montaña, hacia la parte este, con cota máxima de 1139 m sobre el nivel del mar (El Toldo) y ondulado hacia el norte, zona correspondiente a la región costera. La

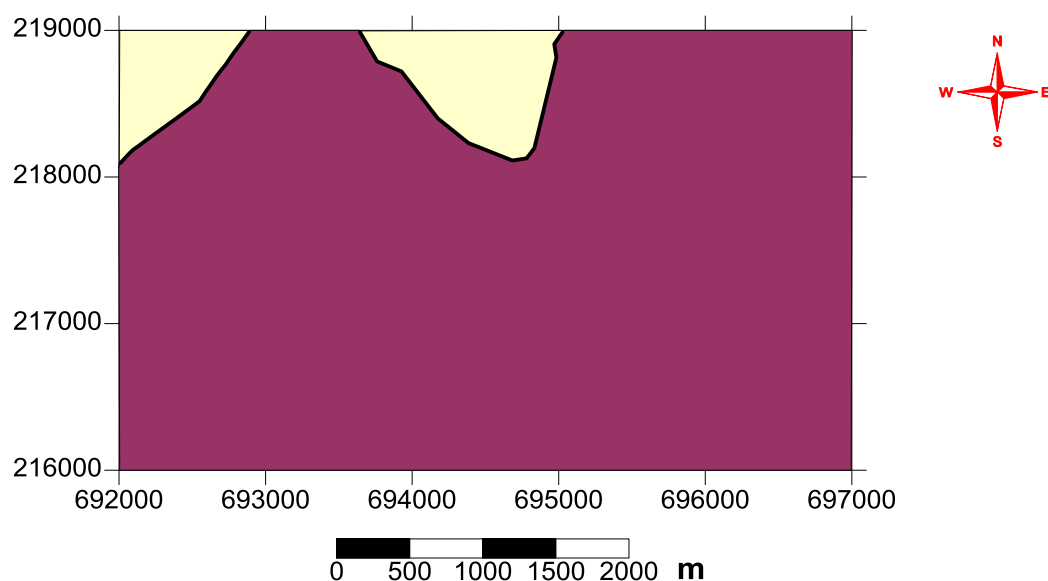
zona montañosa se caracteriza por presentar valores de pendientes que pueden sobrepasar los 45 grados y valores máximos de isobasitas de 900 m en el segundo orden y 800 m en el tercero. (Rodríguez, 1998).

Como se observa en la figura 7, el relieve predominante en el área de estudio es montañoso, correspondientes a premontañas aplanadas ligeramente diseccionadas, que son elevaciones de poca altura que llegan en el área a valores máximos de 182 m y cimas aplanadas por los propios procesos denudativos, dentro de los cuales predominan la erosión por arrastre de las aguas superficiales y la meteorización que se hace intensa debido al dinamismo de las aguas subterráneas; y montañas bajas aplanadas que adquiere mayor importancia en el estudio de la región por el área que abarca y por estar a ella asociados los mayores yacimientos ferroniquelíferos.

Los procesos de intemperismo son predominantes y están condicionados no sólo por la litología y el grado de agrietamiento de las rocas sobre las cuales se desarrolla, sino también, por la posición hipsométrica que estas ocupan. Al mismo tiempo, al ser las pendientes de bajo ángulo - de cero a seis grados - existe una excelente conservación del producto meteorizado, siendo erosionado sólo en los barrancos y escarpes asociados al sistema fluvial que se encuentra controlado por dislocaciones tectónicas. Actualmente y desde el inicio de la actividad minera en la región, se ha intensificado el arrastre de suelos y la degradación en general debido a las áreas que han quedado descubiertas por la extracción del mineral.

Aparecen otras formas del relieve dentro de las cuales se encuentran fuertes escarpes como elementos naturales y áreas minadas con relieve antropizado donde se encontraban lateritas y saprofitas, que fueron minados casi en su totalidad y que han modificado grandemente el relieve natural.

MAPA GEOMORFOLÓGICO Escala original 1: 50 000



LEYENDA

- Premontañas aplanadas ligeramente disecionadas.
- Montañas bajas aplanadas
- Límite de zonas geomorfológicas

Figura 7. Mapa geomorfológico Escala original 1: 50 000 (Modificado de Rodríguez A. 1998)

El municipio Moa presenta características climáticas muy propias, debido a su ubicación geográfica, relieve y dirección e intensidad predominante de los vientos. Estas se distinguen con claridad por las condiciones pluviométricas exclusivas del lugar, e incluso dentro del mismo territorio donde existen variaciones en los acumulados de precipitaciones debido a la diferencia de altitudes y la existencia de zonas a barlovento y sotavento. El clima de la zona es subtropical húmedo, distinguiéndose de acuerdo a la distribución de las precipitaciones períodos secos y húmedos. La temperatura media anual oscila entre 22.26 – 30.5 °C, siendo los meses más calurosos desde julio hasta septiembre y los más fríos enero y febrero.

La principal cantidad de precipitaciones cae en forma de lluvias torrenciales, predominantemente originadas por tormentas y por efecto convectivo, estas últimas

ocurren debido a la elevación del aire húmedo proveniente del mar sobre el macizo montañoso Cuchillas de Moa.

En el período comprendido entre los meses de diciembre a abril caen lluvias provocadas por la llegada de frentes fríos del norte. Los mismos pueden durar de dos a tres días, caracterizándose por tener poca intensidad y cantidad de lluvias.

El total de precipitaciones anuales es entre 767 - 3560 mm, siendo los meses más lluviosos octubre, noviembre y diciembre y los meses más secos abril, julio y agosto; la evaporación media anual varía entre los 1880 y 7134 mm.

La acción de los Alisios que predominan del nordeste en invierno y del este en el verano y las características orográficas del macizo montañoso Nipe-Sagua-Baracoa produce una serie de brisas locales de considerable magnitud que son capaces de modificar o perturbar el curso normal de los Alisios (Montesinos A 2007). Los vientos locales más importantes son las brisas marinas que durante el día refuerza a los alisios en la vertiente norte y el Terral que durante la noche los debilita. También se manifiestan con las brisas de valles durante el día y las brisas de montaña que en el horario nocturno descienden hacia las partes bajas. Otro aspecto del viento que tiene gran incidencia en el comportamiento de las precipitaciones, es la confluencia o convergencia obligada a la que se someten las corrientes de aire en el interior de la cuenca debido a su forma y orientación.

Las velocidades mínimas del viento se registran en los meses del período húmedo, principalmente en junio, septiembre y octubre. Los valores de velocidad media mensual y anual del viento (Tabla I) fueron tomados de la estación meteorológica “El Sitio”, con coordenadas **N**= 216 600 **E**= 671 600 perteneciente a la red del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (I.N.R.H).

Meses	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AÑO
Velocidad (m/s)	7,8	9,4	11,2	11,6	9,4	7,6	11,4	9,6	7,2	6,4	7,9	7,9	9,0

Tabla 1 Valores de velocidad media mensual y anual del viento (m/s).

Como se puede observar el valor máximo de velocidad del viento es 11,6 m/s (41,76 km/h), siendo inferiores a los vientos que clasifican dentro de la categoría de Depresión

Tropical (62,0 km/h) que es la mínima, por lo que la acción de fuertes vientos (no asociados a organismos ciclónicos) sobre el área de estudio se evalúa como peligro de categoría baja.

En cuanto a la flora y fauna del área, aparecen bosques de pinos, vegetación arbórea y malezas en los cuales se alojan insectos, aves y algunos vertebrados. Existen algunos sectores donde la vegetación es prácticamente nula producto de la actividad antropogénica del hombre.

La abundancia de precipitaciones en casi todo el año, conjugado con las características del relieve y del clima favorece la existencia de una red hidrográfica que corre de sur a norte de tipo dendrítica, representada por numerosos ríos y arroyos entre los que se destacan en el sector de estudio: el río Moa y sus afluentes.

El río Moa, nace en la cota 950 m y desemboca en la bahía de Moa formando deltas cubiertos de sedimentos palustres y vegetación típica de manglar, tiene 21 km de extensión y corre en dirección noroeste–noreste, se alimenta de los ríos Calentura, Los Guineos, Arroyón y de arroyos y cañadas que bajan desde regiones montañosas. Su cauce presenta numerosos meandros, aunque su principal fuente de alimentación son las precipitaciones atmosféricas (Rodríguez, 1998). Presenta un caudal en seca de 0.4 m³/s y en época de lluvias alcanza 20 m³/S. Actualmente su flujo está regulado por la Presa Nuevo Mundo y la presa Derivadora de Planta de Agua perteneciente a la Empresa Comandante Ché Guevara.

Este río en épocas de lluvias aporta gran cantidad de escurrimiento líquido y sólido formado desde su nacimiento en las alturas al sur de Moa.

El cauce del río está bien definido, posee la forma de un trapecio regular con un ancho de estiaje (niveles bajos) entre 30 y 60 m. Está formado por sedimentos del Cuaternario representados por formaciones aluviales marinas y aluviales-deluviales, las cuales están compuestas por grava y guijarros con rellenos areno - limosos.

1.2 Características Geológicas.

El Bloque Oriental Cubano presenta características geológicas muy particulares dentro del marco de la estructura geológica cubana. De ahí el gran interés que ha despertado en diversos investigadores (Adamovich y Chejovich, 1964; Cobiella, 1978; Quintas, 1989; Blanco y Proenza, 1993; Iturralde-Vinent, 1996), llevando a cabo estudios encaminados a profundizar en la estructura geológica cubana en general.

Según Iturralde-Vinent, (1996) en la constitución geológica del archipiélago cubano se reconocen dos elementos estructurales principales: el cinturón plegado y el neoa autóctono.

El cinturón plegado según el autor, está constituido por terrenos oceánicos y continentales deformados y metamorfizados de edad pre-Eoceno Medio, que ocupan en la actualidad una posición muy diferente a la original, representando las unidades geológicas que lo integran grandes entidades paleogeográficas que marcaron la evolución del Caribe Noroccidental. El autor divide al cinturón plegado en unidades continentales y unidades oceánicas.

Las unidades oceánicas están constituidas por las ofiolitas septentrionales, las rocas del arco de islas volcánicas del Cretácico (Paleoarco), las secuencias de las cuencas de *piggy back* del Campaniense Tardío-Daniense, el arco de islas volcánico del Paleógeno y las rocas de las cuencas de *piggy back* del Eoceno Medio-Oligoceno. El neoa autóctono está constituido por materiales terrígenos carbonatados poco deformados del Eoceno Superior Tardío al Cuaternario que cubren discordantemente las rocas del cinturón plegado.

1.3 Geología del área de estudio

En el sector afloran litologías pertenecientes al cinturón plegado cubano (Iturralde-Vinent, 1996, 1998; Proenza, 1997; Proenza et al., 1999) específicamente a las ofiolitas septentrionales.

A continuación se describen los rasgos más importantes de las litologías existentes:

Ofiolitas septentrionales

Las rocas típicas de la secuencia ofiolítica están ampliamente representadas en el área de estudio (Figura 8) presentando un desarrollo considerable de los complejos ultramáficos y de gabros (Proenza, 1997; Proenza et al., 1999). Según Fonseca et al. (1985) el espesor aproximado del complejo ultramáfico es de 1000 m y el de gabros de 500 m. Quintas (1989) estima un espesor de 1200 metros para el complejo volcano-sedimentario.

El complejo ultramáfico ocupa la mayor porción del área de investigada, ubicadas al este, sur y sur-oeste., donde predomina como roca del basamento la peridotita serpentizada en mayor o menor grado. De acuerdo a estudios anteriores y a las observaciones de campo, las peridotitas presentes son harzburgitas de color azul verdoso oscuro, con contenido variable de piroxenos rómbicos y olivino. En menor grado aparecen piroxenos monoclínicos. Tanto los piroxenos como el olivino han sido transformados a minerales del

grupo de la serpentina, siendo ocasional la presencia de relictos de los minerales primarios (Almaguer et al, 2005).

En el cauce del río Moa, las peridotitas están cortadas por grietas rellenas, probablemente generadas durante el proceso de serpentización, observándose en algunas zonas numerosas vetas de serpentinita (Adamovich y Chejovich, 1964).

Los cumulos de gabros ocupan un área pequeña hacia el noroeste del área de estudio en forma de cuerpos. El contacto entre los gabros y el complejo ultramáfico generalmente es tectónico. Los principales tipos petrológicos descritos son: gabros olivínicos, gabronorita, gabros, anortositas y noritas (Fonseca et al., 1985; Proenza, 1997; Proenza et al., 1999; Rodríguez, R. 2000). Los gabros afloran generalmente asociados a las serpentinitas (Adamovich y Chejovich, 1964).

Aparece en el área de estudio cortezas de meteorización que se desarrollan una sobre gabroides y otra sobre ultramafitas serpentinizadas

- Sobre gabroides

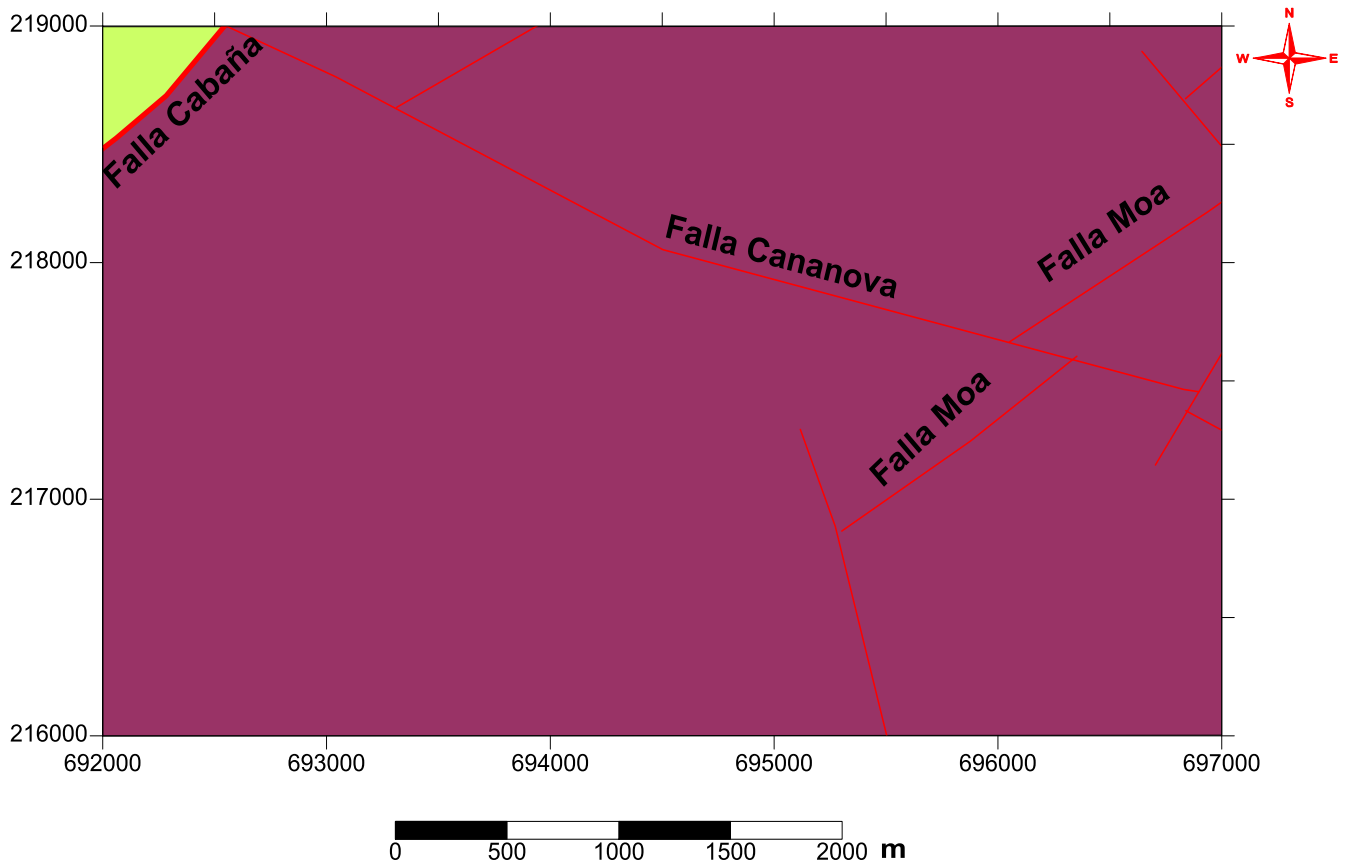
Lateritas más “arenosas” que las desarrolladas sobre ultramafitas serpentinizadas. La arcilla predominante es la caolinita. Presenta horizontes semejantes a capas normalmente de gruesas a medias

- Sobre ultramafitas serpentinizadas

Lateritas con arcilla montmorillonítica e hidróxidos y óxidos de hierro como componentes fundamentales. Los taludes desarrollados sobre gabroides tienden a ser más inestables que los desarrollados sobre ultramafitas. Es la que más se distribuye en el área y está desarrollada principalmente sobre peridotitas de tipo harzburgitas serpentinizadas en distinto grado y por serpentinitas, las cuales ocupan la mayor parte del área y en menor grado por material friable producto del intemperismo químico de gabro olivínico, plagioclasita y anfibolita. La roca madre de la corteza de meteorización son las serpentinitas que de acuerdo a las fábricas secundarias presentan las siguientes clases: serpentinitas esquistosas, serpentinitas brechosas finas, serpentinitas brechosas medias, serpentinitas brechosas gruesas y serpentinitas macizas. En esta zona quedan restos de la corteza de meteorización constituidos por saprolitas, conocidas en Cuba como ocre estructurales y la capa de ocre inestructurales, conocida como laterita s.s (Casañas X., 2009).

MAPA GEOLÓGICO DEL ÁREA

Escala original 1: 50 000



LEYENDA

-  Gabro.
-  Serpentinás
-  Fallas comprobadas

Figura 8. Mapa geológico del área (Escala original 1: 50000) (Modificado de Rodríguez 1998)

Las serpentinitas presentan diferente grado de deformación, las más deformadas, como las esquistosas y brechosas finas y medias, se caracterizan por estar completamente serpentínizadas, mientras que las macizas y brechosas gruesas pueden presentar un menor grado de serpentización.

1.4 Características Tectónicas del sector de estudio.

El Bloque Oriental Cubano comprendido desde la falla Cauto-Nipe hasta el extremo oriental de la isla, presenta una tectónica caracterizada por su alta complejidad, dado por

la ocurrencia de eventos de diferentes índoles que se han superpuesto en el tiempo y que han generado estructuras que se manifiestan con variada intensidad e indicios en la superficie (Rodríguez, 1998a, 1998b).

Campos, (1983). Plantea que este bloque se caracteriza por el amplio desarrollo de la tectónica de cabalgamiento que afecta las secuencias más antiguas. Localmente esta complejidad en la región de estudio se pone de manifiesto a través de estructuras fundamentalmente de tipo disyuntivas con dirección noreste y noroeste (Figura 9), que se cortan y desplazan entre sí, formando un enrejado de bloques y microbloques con movimientos verticales diferenciales, que se desplazan también en la componente horizontal y en ocasiones llegan a rotar por acción de las fuerzas tangenciales que los afecta como resultado de la compresión (Campos, 1983; Rodríguez, 1998a, 1998b). También se observan dislocaciones de plegamientos complejos, sobre todo en la cercanía de los contactos tectónicos (Campos, 1983).

Rodríguez, (1998b) plantea que desde el punto de vista tectónico la región de Moa en general y el área de estudio en particular es muy compleja, perteneciendo a los sub-bloques morfotectónicos “Caimanes, Aeropuerto” que pertenece al Bloque “Moa”, extremo noreste del sub-bloques “Sur” perteneciente al Bloque Cabañas, donde predominan los desplazamientos hacia el noreste, con predominio de los planos de fractura con rumbo N 20° E y un extremo del bloque El Toldo, (ver Figura 9).

Bloque Cabaña.

Situado al norte del bloque Moa y al noroeste del área de estudio, con orientación noreste desde la localidad de Zambumbia hasta Cayo Moa Grande, y en la parte meridional mantiene una dirección noroeste en la zona Cayo Grande-Caimanes Abajo. Es cortado por la falla Cananova, con valores morfométricos diferenciados entre el sub-bloque norte y sur desplazándose el norte en dirección noroccidental.

Este bloque se caracteriza por el carácter oscilante de los movimientos, comportándose como una ventana tectónica, donde las formaciones terciarias y cuaternarias han tenido muy poco desarrollo o fueron erosionadas, lo que sólo se justifica por una tendencia predominante al levantamiento, aun cuando en la actualidad muestre los valores geodésicos y morfométricos más deprimidos.

Bloque Moa.

Ubicado en la parte central del área, al oeste del bloque El Toldo con el cual contacta a través de la falla Moa, extendiéndose de norte a sur en forma de franja cóncava hacia el este. Está subdividido en dos sub-bloques: Caimanes y Aeropuerto. La componente fundamental de los desplazamientos horizontales está orientada al nordeste.

En este bloque afloran las rocas del complejo ofiolítico en el mayor porcentaje de su superficie. Geomorfológicamente para el bloque es predominante el relieve de montañas bajas de cimas aplanadas ligeramente diseccionadas lo que junto a las condiciones litológica permite, que en el sector exista un intenso desarrollo y conservación de las cortezas de meteorización lateríticas, que a su vez condicionan la densidad del drenaje que sólo aumenta en las laderas abruptas, coincidiendo con las alineaciones tectónicas. Los cursos de agua permanentes van a presentar cauces en forma de barrancos profundos y estrechos.

Bloque El Toldo.

Ocupa una porción menor del área de estudio y le corresponde los máximos valores del levantamiento relativo de la región. Litológicamente está conformado en superficie por las rocas del complejo ultramáfico de la secuencia ofiolítica, sobre las cuales se ha desarrollado un relieve de montañas bajas de cimas aplanadas ligeramente diseccionadas.

Los análisis microtectónicos realizados para el bloque indican la existencia de una dirección máxima de agrietamiento de rumbo N85°W, apareciendo otras dos direcciones importantes, una sublongitudinal y una de dirección noreste.

Del análisis de la evolución geológica de la zona de Moa se aprecia la complejidad lito-estructural de los distintos macizos rocosos presentes. Según Rodríguez A., 1998b, es común el alto nivel de agrietamiento y la presencia de fallas de carácter regional. Como se observa en la figura 9, el área de estudio se encuentra afectada por tres estructuras de carácter regional, las cuales se detallan a continuación:

Falla Moa: Dentro del territorio es la estructura de mayor extensión y su trazo corresponde con una línea cóncava hacia el este con el arco mayor en la zona de Calentura, haciéndose más recta hacia el norte con una dirección de N48°E, mientras que en su parte meridional tiene un rumbo N25°W.

En la parte norte esta estructura se bifurca en dos tramos, uno de rumbo N35°E denominado La Vigía y el otro de rumbo N74°E nombrado La Veguita, el que atraviesa la zona marina perilitoral, hasta cortar la barrera arrecifal a la cual limita y afecta, pues en el bloque oriental de la falla la barrera como tal desaparece, quedando reflejada sólo como un banco de arenas, lo que constituye un indicador del sentido de los desplazamientos. En su conjunto forma la estructura más compleja, pero a su vez, de más fácil reconocimiento por su expresión nítida en la topografía.

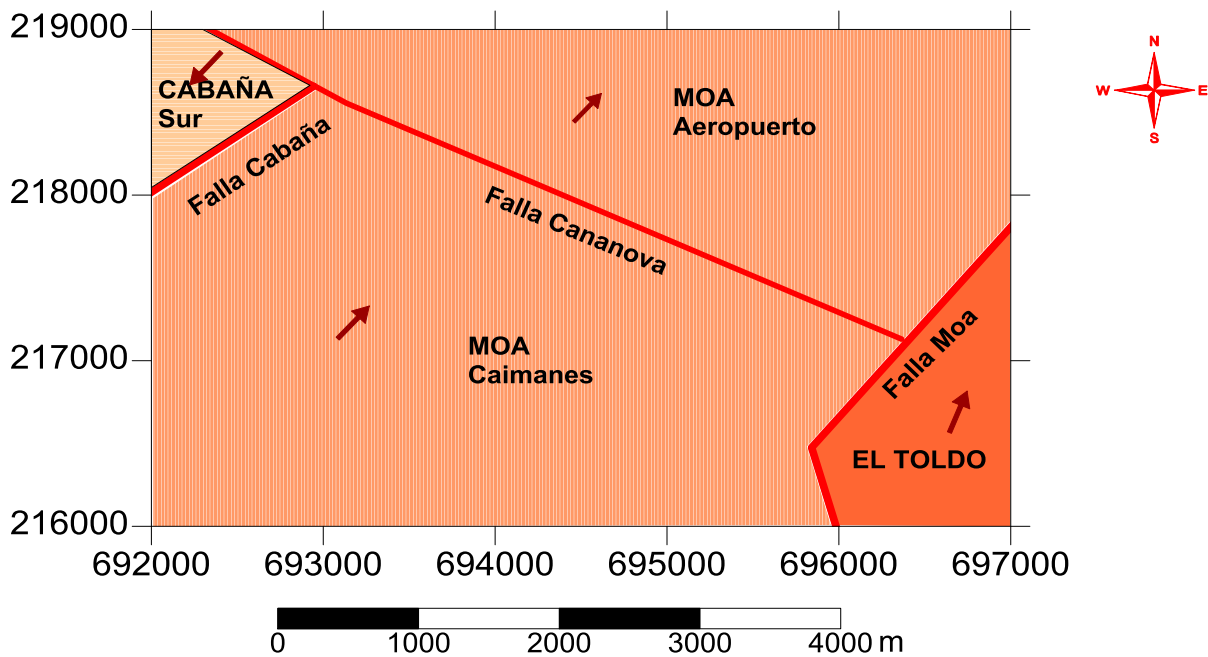
Falla Cananova: presenta un rumbo NW – SE. cartografiada a escala 1: 25 000 desde la Bahía de Yaguaneque hasta el poblado de Jucaral, presentando un rumbo predominante N 53° W. Es cortada en diferentes puntos por estructuras submeridionales, caracterizándose toda la zona de falla por el grado de cizallamiento de las rocas que corta. Según el análisis de los métodos aplicados se pudo determinar que a través de la falla Cananova ocurre un desplazamiento horizontal máximo de 1500 m hacia el noroeste del bloque norte respecto al sur y un movimiento rotacional izquierdo - antihorario - calculado en un valor medio de cuarenta grados de ese bloque norte. Hacia el sudeste los criterios de falla en superficie se pierden bruscamente al penetrar esta la meseta serpentinítica de potentes espesores de corteza que constituye el yacimiento Moa.

Falla Cabaña. Se extiende desde el extremo centro occidental del área, al noroeste del poblado de Peña y Ramírez hasta el norte de la ciudad de Moa, cortando la barrera arrecifal y limitando el extremo oriental de Cayo Moa Grande.

En su parte meridional presenta una orientación N70°E hasta la zona de Zambumbia donde es truncada por un sistema de fallas submeridionales, aflorando nuevamente con nitidez al nordeste del poblado de Conrado donde inicia su control estructural sobre el río Cabaña.

MAPA DE BLOQUES MORFOTECTÓNICOS

Escala original 1: 100 000



LEYENDA

MOA	Nombre del bloque
Caimanes	Nombre del sub bloque
	Falla
	Dirección del movimiento del bloque

Figura 9. Mapa de Bloques Morfotectónicos del área (Escala original 1: 100 000).
(Modificado de Rodríguez A. 1998)

En el mapa de anomalías magnéticas se observa que en el extremo suroccidental del bloque, entre las fallas Moa y Arroyón se desarrolla una zona de valores negativos anómalos (Batista, 1998), indicando la información geológica que en todo el sector afloran las rocas ultrabásicas del complejo ofiolítico.

A partir de estos elementos Batista (1998), consideró que en ese sector las rocas ultrabásicas constituyen una delgada capa en la superficie, mientras que en profundidad se encuentran los gabros. Si realmente esto ocurre, hay que entrar a considerar la existencia de un sub bloque o incluso de un nuevo bloque para ese sector ya que ese

fenómeno sólo sería justificable a partir del ascenso de ese sector respecto al resto del bloque El Toldo.

1.5 Características Hidrogeológicas.

Las condiciones hidrogeológicas de este sector están influenciadas por tres factores, las características del relieve, la litología y las precipitaciones. Estas condiciones rigen la geodinámica de las aguas subterráneas (Pérez y Santana, 1977).

Las rocas acuíferas (serpentinitas agrietadas), presentan un importante flujo por la zona del contacto con la corteza impermeable, donde se produce el movimiento lateral del agua, mientras que en las lateritas, con algunas excepciones (ferricretas y redepósitos), el movimiento del agua es fundamentalmente de ascenso capilar, el cual varía entre 0.0 m a 25.5 m. La profundidad de las aguas subterráneas se encuentra entre 0 y > 20 m, correspondiendo el nivel 0 a los cursos de aguas corrientes superficiales y a las excavaciones mineras que han descubierto las aguas subterráneas (De Miguel, 2004).

Los valores de la potencia acuífera se manifiestan entre 0 y 27.6 m. Los más bajos corresponden a los drenes naturales y a la zona explotada y los altos corresponden a las áreas más elevadas del yacimiento.

Según estudios realizados por De Miguel FC (2004) en el área de estudio predomina un complejo acuífero formado por un acuitardo o pseudo acuífero poroso en las lateritas donde existe un micro flujo, y un estrato acuífero de grietas en las brechas serpentiniticas, que pueden tener presiones locales (no determinadas) debido a la potencia de las lateritas y saprolitas que yacen sobre ellas y que en partes superan los 10 m.

En las lateritas en sentido general, la permeabilidad está entre 0.006 y 0.21 m/días, correspondiendo los valores más altos a los horizontes de ferricretas y los más bajos a la limonita. Por la granulometría presente en las lateritas, en las que el diámetro efectivo oscila entre 0,0018 y 0,0022 mm, se producen ascensos capilares superiores a los 30 m.

Las serpentinitas, bajo este concepto se consideran a todas las ultramafitas serpentinizadas, serpentinitas e incluso pequeños cuerpos de gabbro y/o diabasas presentes de forma subordinada en el área, incluyendo además las rocas lixiviadas. En sentido general la permeabilidad en estas secuencias está entre 0.004 y 0.430 m/días,

aunque en zonas de intensa trituración, se pueden encontrar valores anómalos mayores de 2.00 m/días.

En algunas partes, la profundidad de las aguas se subordina al relieve del terreno, mientras que en otras partes la subordinación no es tanto por el relieve como por subpresiones y nivel de ascenso capilar de las lateritas, lo que se puede apreciar en el mapa de profundidades del nivel de las aguas subterráneas (De Miguel, 2004)..

La superficie del nivel de las aguas subterráneas en general repite el relieve del terreno, con oscilaciones anuales e hiperanuales, según la temporada del año (periodo seco o húmedo) y años secos o húmedos. La dirección del flujo subterráneo está subordinada al relieve del terreno, lo que hace que el volumen de agua almacenada en el complejo acuífero en su mayor parte no sea drenada por los sistemas de grietas existentes, participando en el drenaje subterráneo sólo las grietas con direcciones coincidentes con las pendientes del relieve. Estas condiciones en las brechas serpentiniticas, saprofitas y lateritas, hacen que el área, a pesar de las altas cotas existentes, mantenga una saturación permanente, con un drenaje subterráneo a través de las rocas agrietadas y lateritas con microporosidad, incrementada esta saturación por los altos valores de ascensos capilares en las lateritas.

En el extremo Suroeste y Este del área de estudio existe un parteaguas subterráneo y a partir del mismo las direcciones principales del flujo subterráneo es Noroeste y Sureste, con desviaciones locales influenciadas por el relieve del terreno.

1.6 Procesos Geodinámicos y Antrópicos.

Meteorización.

Es el fenómeno físico-geológico más importante en el área de estudio (ver foto 1). Está vinculado con la formación de potentes cortezas lateríticas sobre rocas ultrabásicas y básicas. Las condiciones climáticas, geomorfológicas, tectónicas y características mineralógicas de las rocas existentes favorecieron los procesos de meteorización química del medio.



Foto 1. Corteza de meteorización desarrollada en el área de estudio.

Movimientos de masas.

Este proceso está vinculado a los movimientos de laderas naturales y taludes; generados por el proceso minero extractivo (ver foto 2). Los mecanismos de rotura y las tipologías de los movimientos de masas desarrollados en las cortezas residuales, están condicionados por las características estructurales del macizo rocoso, aunque en las zonas de desarrollo de cortezas redepositadas, las condiciones geotécnicas de los materiales inciden con más fuerza sobre el tipo de movimiento. Las propias condiciones naturales de las cortezas lateríticas como: alta humedad, granulometría muy fina, altos contenidos de minerales arcillosos, baja permeabilidad, así como la intensa actividad sismo-tectónica en la región y elevados índices pluviométricos, hacen que este fenómeno sea muy común y se convierta en un peligro latente, capaz de generar grandes riesgos no solo en la actividad minera sino en otros sectores del territorio. Un catalizador de este fenómeno es la propia actividad minera, que deja descubierta grandes áreas, sin cobertura vegetal, y genera taludes con grandes pendientes.



Foto 2: Deslizamientos en taludes provocados por la actividad minera

Erosión.

Es un fenómeno muy difundido en el área (ver foto 3). Es un proceso, que aunque se produce de forma natural en la potente corteza laterítica, se ha visto incrementado por la actividad antrópica, vinculada a la minería a cielo abierto y a la deforestación. La erosión laminar, que se desarrolla sobre la superficie de la corteza laterítica, arrastra las partículas fundamentalmente hacia la zona norte del yacimiento, donde el relieve es menos elevado, además de dirigirse hacia los cauces de los drenes naturales representados por el río Moa. Se observa además, un amplio desarrollo del acarreamiento, que aumenta sus dimensiones rápidamente en el tiempo. La dirección de las cárcavas está condicionada fundamentalmente por las condiciones estructurales de los suelos residuales.



Foto 3. Desarrollo de la erosión en cárcavas en el área de estudio.

Agrietamiento.

En la figura 10 se muestran las máximas direcciones del agrietamiento en el área, NE y NW como es común en la tectónica cubana, con un máximo en la frecuencia hacia los 85° (E-NE).

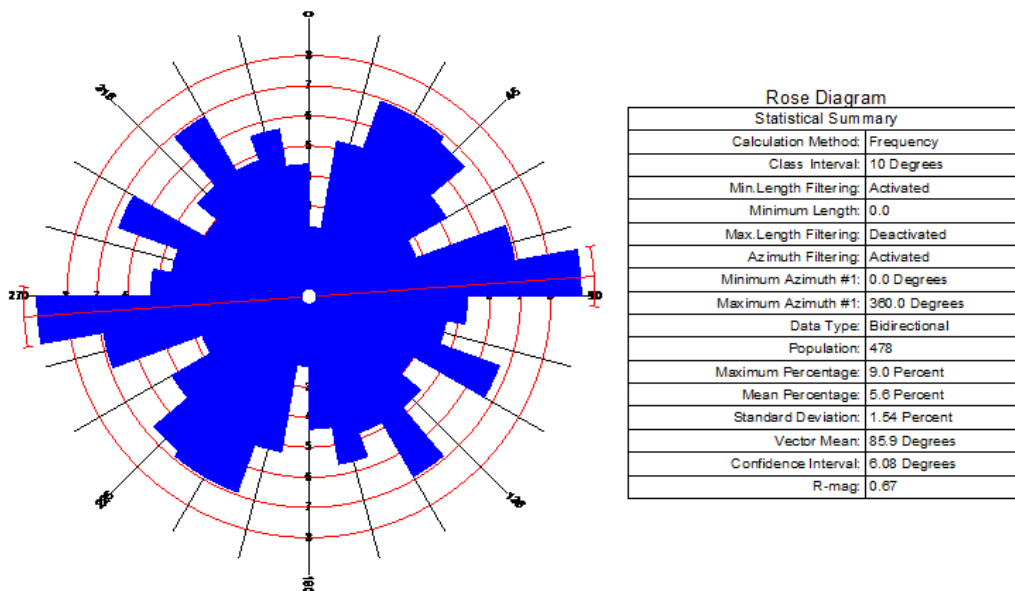


Figura 10. Diagrama de roseta que muestra los sistemas principales obtenidos en el campo. (Cortesía Quality Cuba SA)

En el área se observa una gran dispersión de la fracturación de la roca madre (ver foto 4), con marcada presencia del agrietamiento de carácter tectónico y del originado por el proceso de laboreo o al aumento de volumen de las ultrabasitas durante el proceso de serpentinización.



Foto 4. Intenso agrietamiento de las rocas serpentinitas en el área de estudio

Sismicidad.

Aunque no existen reportes históricos de la ocurrencia de un terremoto fuerte con epicentro en Moa, no se niega la posibilidad de su ocurrencia en épocas anteriores, ya que esto puede deberse a la ausencia de una infraestructura socioeconómica y cultural que permitiera el archivo de estos datos.

Posterior a las series de terremotos de los años 1998 - 1999 continúa la actividad sísmica de manera significativa al NE de la provincia Holguín. Los datos estadísticos de los sismos ocurridos en la zona de monitoreo Moa – Purial desde el año 2000 hasta el año 2007 reflejan que esta se mantiene activa, destacándose significativamente el año 2007 donde han ocurrido mayor cantidad de terremotos en esta región en los últimos ocho años, aunque los mismos fueron de baja energía.

Por la posición geólogo-estructural que tiene el municipio de Moa, se ubica dentro del contexto sismotectónico de Cuba Oriental (CENAI, 1982), bordeado por tres zonas sismogeneradoras coincidentes con fallas profundas que constituyen límites entre o interplacas, (ver Figura 11).

Estas tres zonas son:

- Zona sismogeneradora Oriente: Está asociada a la falla transcurrente Bartlett-Caimán de dirección este-oeste. Constituye el límite entre la placa Norteamericana y Caribeña. A esta zona corresponde la más alta sismicidad de toda Cuba y con ella se encuentran asociados los terremotos de mayor intensidad con epicentros en el archipiélago cubano. La intensidad máxima pronóstico promedio para la zona es de VIII grados en la escala MSK, llegando hasta IX en el sector Santiago-Guantánamo. La magnitud máxima es de 8 grados en la escala Richter.
- Zona sismogeneradora Cauto-Nipe: Está asociada a la zona de fractura de igual nombre, con dirección suroeste-noreste desde las inmediaciones de Niquero hasta la bahía de Nipe. Constituye un límite ínter placa, que separa al Bloque Oriental Cubano del resto de la isla. La potencialidad sísmica de esta zona alcanza los 7 grados en la escala Richter, mientras que la intensidad sísmica, según el mapa complejo de la Región Oriental de Cuba señala valores entre VI y VII grados MSK.
- Zona sismogeneradora Sabana: Se encuentra asociada a la falla Sabana (falla Norte Cubana) o zona de sutura entre el Bloque Oriental Cubano y la Placa Norteamericana. La potencialidad sísmica es variable en el rango de VI a VII grados MSK, alcanzando sus máximos valores hacia su extremo oriental. Los principales focos sísmicos de la zona se localizan en los puntos de intersección de ésta con las fallas de dirección noreste y noroeste que la cortan.

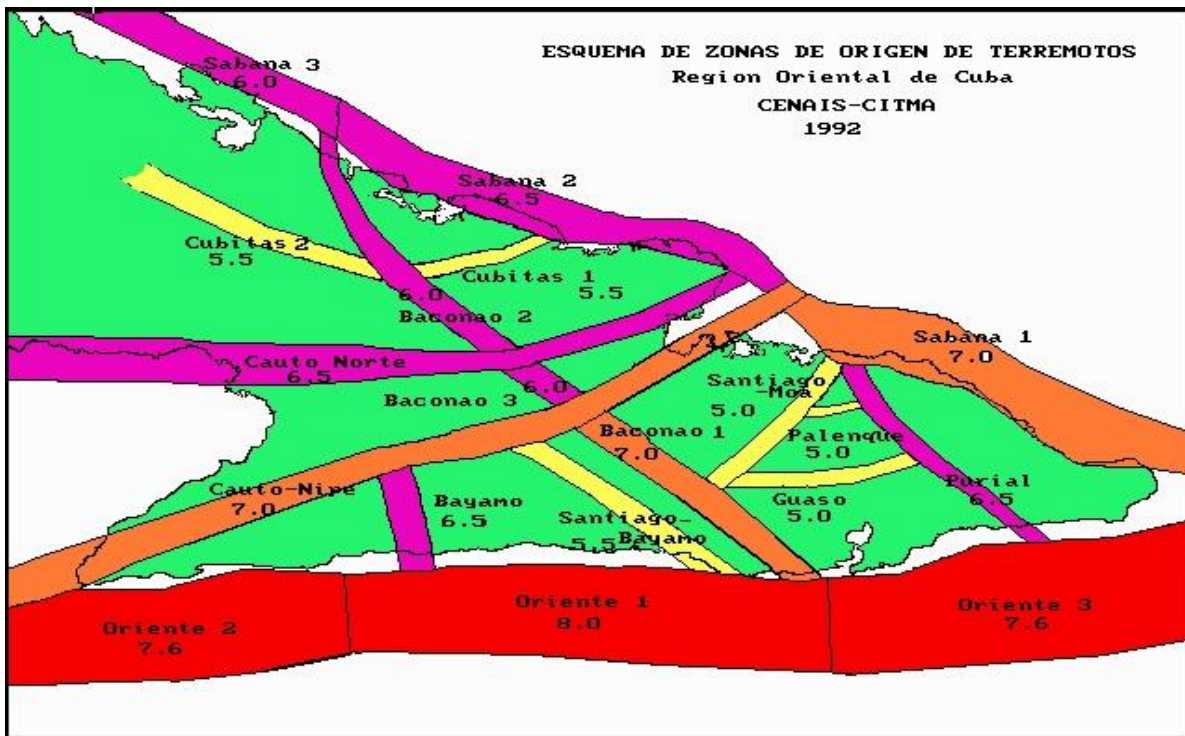


Figura 11. Zonas sismogeneradoras principales que afectan al territorio oriental de Cuba, dentro de ellas se observan subzonas que afectan a Moa de manera directa. (Cortesía del CENAIIS, 1982)

Actividad antrópica.

La actividad antrópica desarrollada en la zona está representada por la actividad minera (ver foto 5), la minería se desarrolló en varias etapas que afectan en mayor o menor grado el entorno. Primeramente se hicieron actividades de destape de las menas lateríticas, eliminando la cobertura vegetal. En esta etapa, y producto a las grandes precipitaciones, se generaron arrastres de grandes volúmenes de sedimentos hacia los cauces de los ríos y arroyos.

Luego continuó la actividad extractiva, que generó una cantidad considerable de taludes con pendientes elevadas, relacionados con los frentes de explotación y la construcción de caminos mineros. Además, otro de los elementos negativos es la formación de embalses de aguas, en áreas internas del yacimiento, debido a la extracción. Como actividad paralela, se realizó la formación de escombreras, con los materiales estériles donde se desarrolla el proceso de reforestación y restauración. Sin embargo, en ocasiones estos sitios no se construyen con parámetros de altura.

No obstante, como política ambiental, se le ha prestado mayor atención en los últimos años, mejorando los parámetros de construcción y aumentando las áreas reforestadas,

disminuyendo de esta forma la exposición de las áreas a los agentes erosivos.



Foto 5. Afectaciones al medio provocadas por las operaciones mineras.

CAPITULO II.

METODOLOGÍA Y VOLUMEN DE LA INVESTIGACIÓN DESARROLLADA EN EL ÁREA DE ESTUDIO

- **Introducción**
 - **Etapla preliminar: Recopilación y revisión de la información existente.**
 - **Segunda etapa: Procesamiento de la información.**
 - **Análisis de datos pluviométricos.**
 - **Análisis de Varianza**
 - **Comportamiento espacio-temporal de la humedad natural en los suelos del área de la planta Ferroníquel Minera SA.**
 - **Tercera etapa: Interpretación de los resultados.**
-

2.1 Introducción

En el presente capítulo se describe la metodología aplicada en la investigación para la valoración de la influencia de las precipitaciones en el comportamiento de la humedad natural de los suelos del área de la planta Ferroníquel Minera SA, a partir del análisis de una serie temporal de datos pluviométricos, según las tres etapas principales. Se parte de la revisión de la información de los trabajos precedentes donde se adquiere la información base. Se describe el método y procedimiento utilizado en el análisis de la serie temporal que permite determinar la estacionalidad de la misma y realizar el análisis de varianza para conocer si existen o no diferencias significativas entre las lluvias acumuladas por los pluviómetros y entre los meses; y así valorar la influencia de las precipitaciones en el comportamiento de la humedad natural de los suelos para periodos húmedos y secos.

La investigación en el área de la planta Ferroníquel Minera SA, se realizó en tres etapas fundamentales (ver Figura 12):

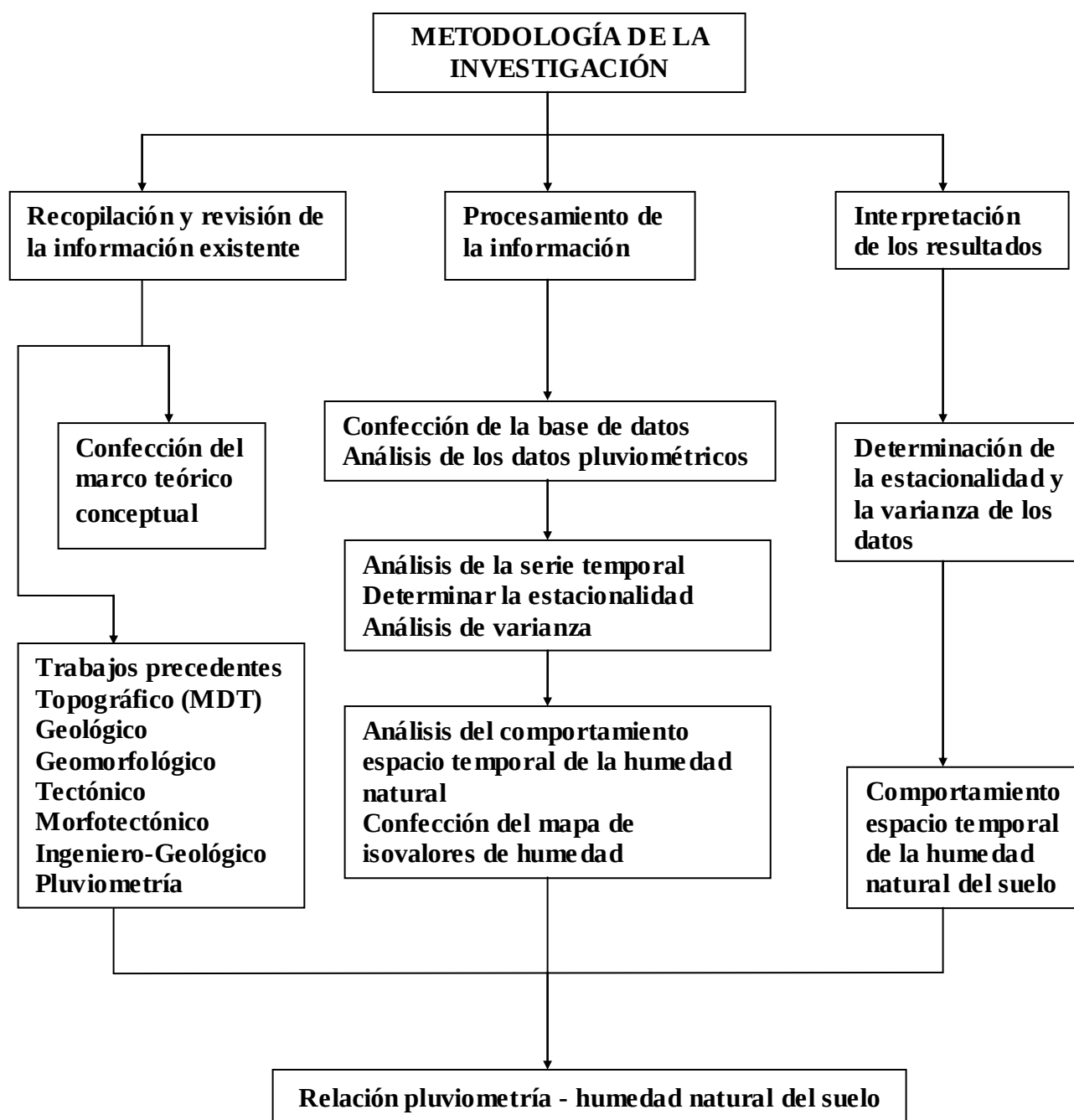


Figura 12. Metodología de las investigaciones desarrolladas.

2.2 Etapa preliminar: Recopilación y revisión de la información existente.

En esta etapa se realiza el análisis de la bibliografía existente de la región y área de estudio, de la cual se revisa y recopila la información útil para la investigación. Se hacen búsquedas en el centro de información del ISMM, donde se tuvo acceso a libros, revistas, trabajos de diploma, tesis de maestría y doctorales, además de búsquedas en Internet. Como resultados se obtuvo información referente a la descripción regional desde el punto de vista geológico, ingeniero geológico, de bloques Morfotectónicos, tectónico,

geomorfológico y el Modelo Digital del Terreno (MDT) 1:10000. En esta etapa se confecciona el marco teórico conceptual de la investigación.

De igual manera se adquiere en los archivos de Recursos Hidráulicos, los datos pluviométricos de 21 años (1989-2009) para realizar el análisis de serie temporal, correspondiente a cinco pluviómetros de la región (Figura 13) y los resultados de los ensayos de determinación de humedad natural de los suelos correspondiente a 35 muestras tomadas en el área de estudio.

MAPA DE UBICACIÓN DE LOS PLUVIÓMETROS Escala original 1: 10 000

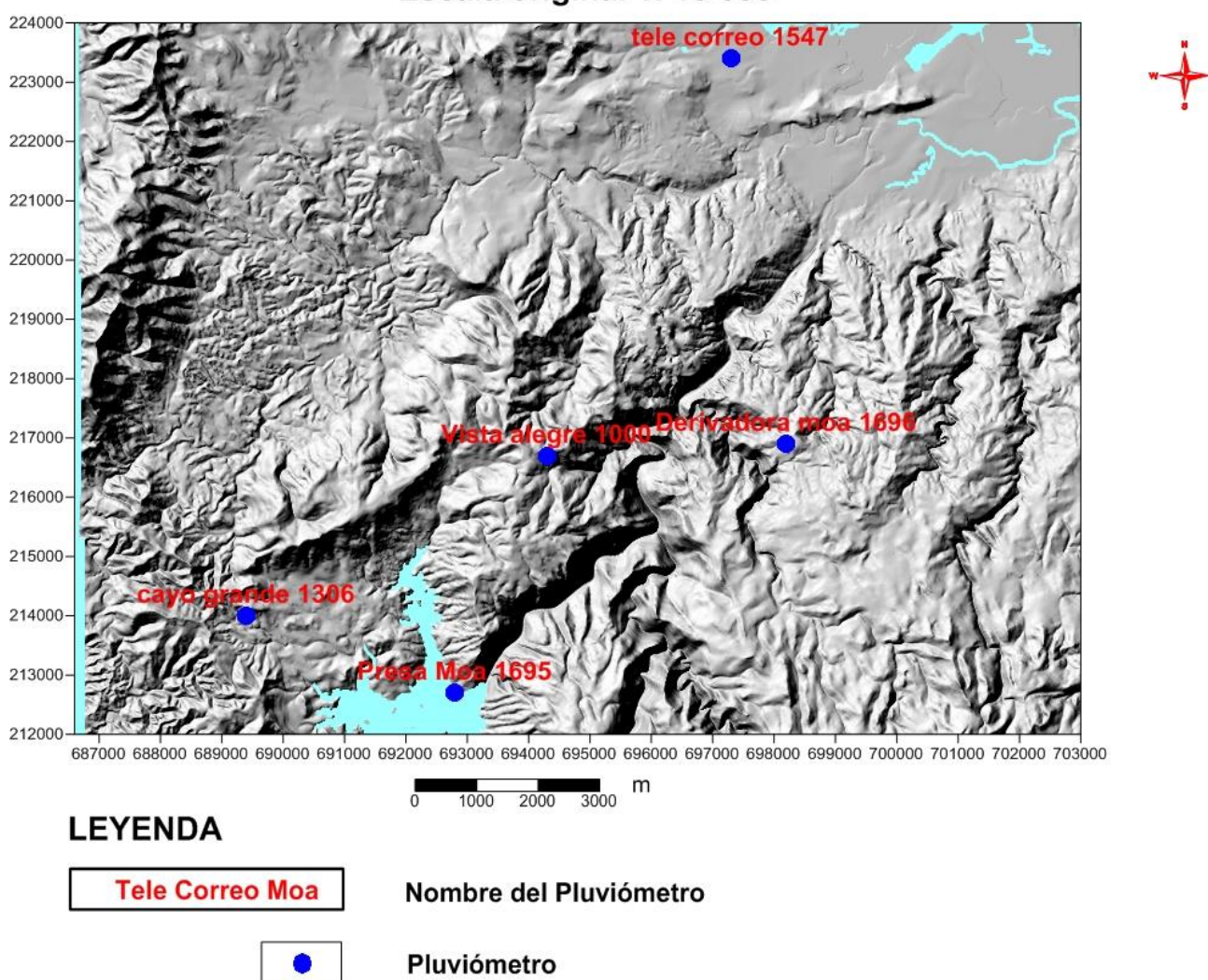


Figura 13. Ubicación de los pluviómetros.

2.3 Segunda etapa: Procesamiento de la información.

El MDT constituye la información inicial para los estudios geomorfológicos y topográficos; y es una herramienta fundamental en la interpretación ingeniero - geológica.

Para obtener las informaciones necesarias de campo y laboratorio que garanticen el cumplimiento del objetivo de la investigación se realizan visitas a la zona de estudio con el objetivo de precisar los puntos de muestreo y la metodología a seguir en la toma de muestras para el ensayo de humedad natural en el laboratorio.

Los puntos de muestreo escogidos corresponden a 35 calas (Figura 14) que permiten la descripción del corte en profundidad y la toma de muestras inalteradas o semialteradas de suelos. Estas perforaciones fueron realizadas a escala 1: 5 000, por tres dotaciones pertenecientes a las Empresas Raudal y EMPI con dos máquinas perforadoras MC80C de fabricación italiana y una máquina URB 150 de fabricación rusa. Se efectuaron perforaciones rotarias a columna con selección de testigos y diámetro de HQ 90 exterior y 65 exterior mm, con sistema work line, teniendo como requisito imprescindible que fueran perforadas las rocas del basamento entre 5 y 10 metros.

La documentación de los testigos de las calas se realizó siguiendo la norma cubana vigente NC 61:2000 Geotecnia. Identificación y descripción de suelos y rocas, según ASTM (1993).

Para la toma de muestras se escogió el material de suelo que es representativo de la zona saprolítica y que reúne todas las condiciones para el ensayo de humedad natural de acuerdo a las normas cubanas vigentes. Los ensayos fueron realizados por el Laboratorio de Geotecnia de la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Holguín. Se previó el control externo en un laboratorio certificado. Para la realización del ensayo y en cumplimiento de los requisitos de calidad se empleó la norma (ASTM (1993):

- NC 67:00 Geotecnia. Determinación del contenido de humedad de los suelos y rocas.

MAPA DE UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS

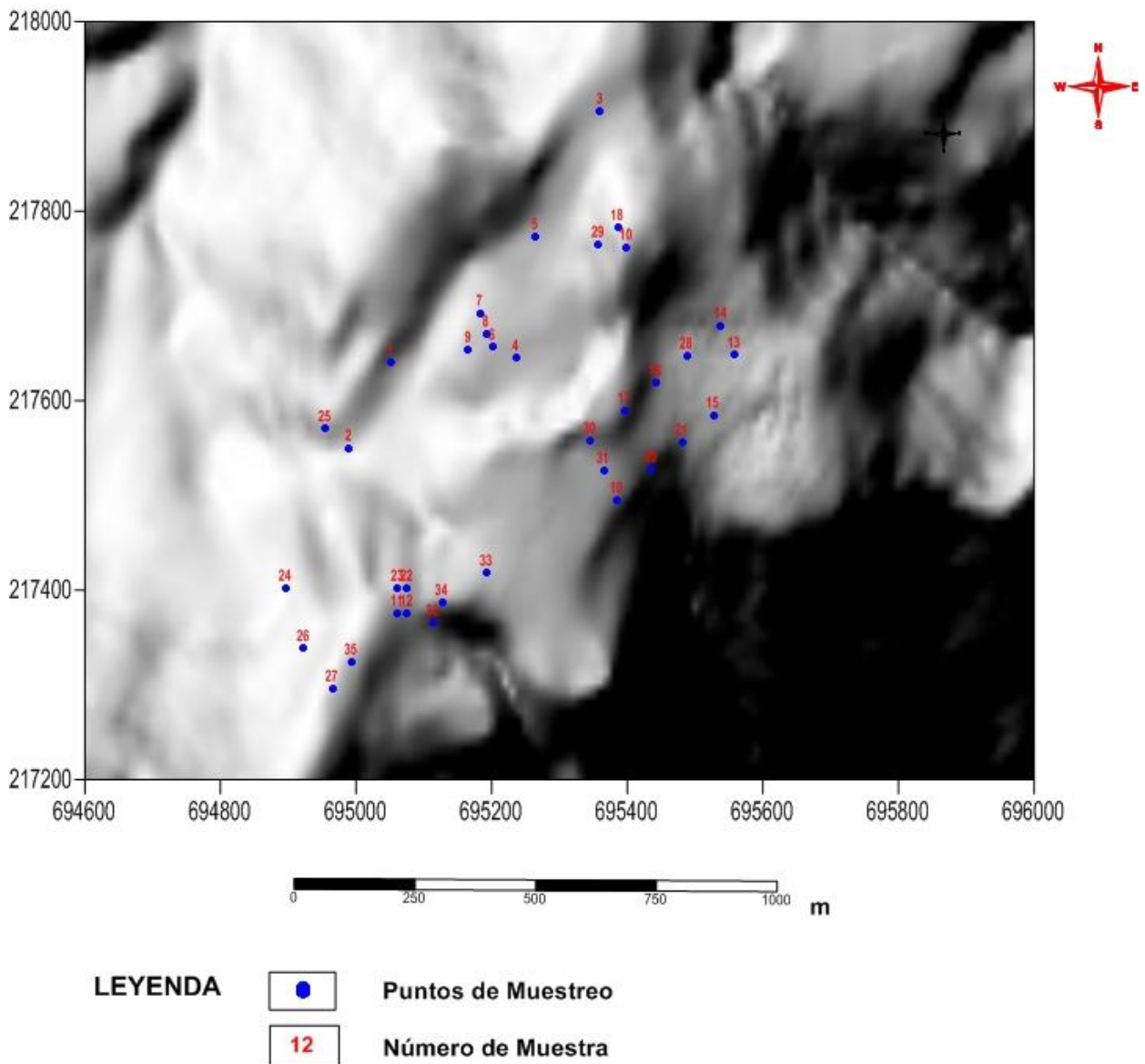


Figura 14. Mapa de datos reales

2.3.1 Análisis de Datos pluviométricos.

Para el procesamiento y análisis de los datos pluviométricos, se parte de la confección de la base de datos primarios de las precipitaciones de cada pluviómetro del área, la cual se crea en formato digital mediante la utilización del Excel. Como se observa en la Figura 15, aparecen los datos de lluvias recogidos diariamente para cada pluviómetro en cuestión, durante los 21 años de análisis.

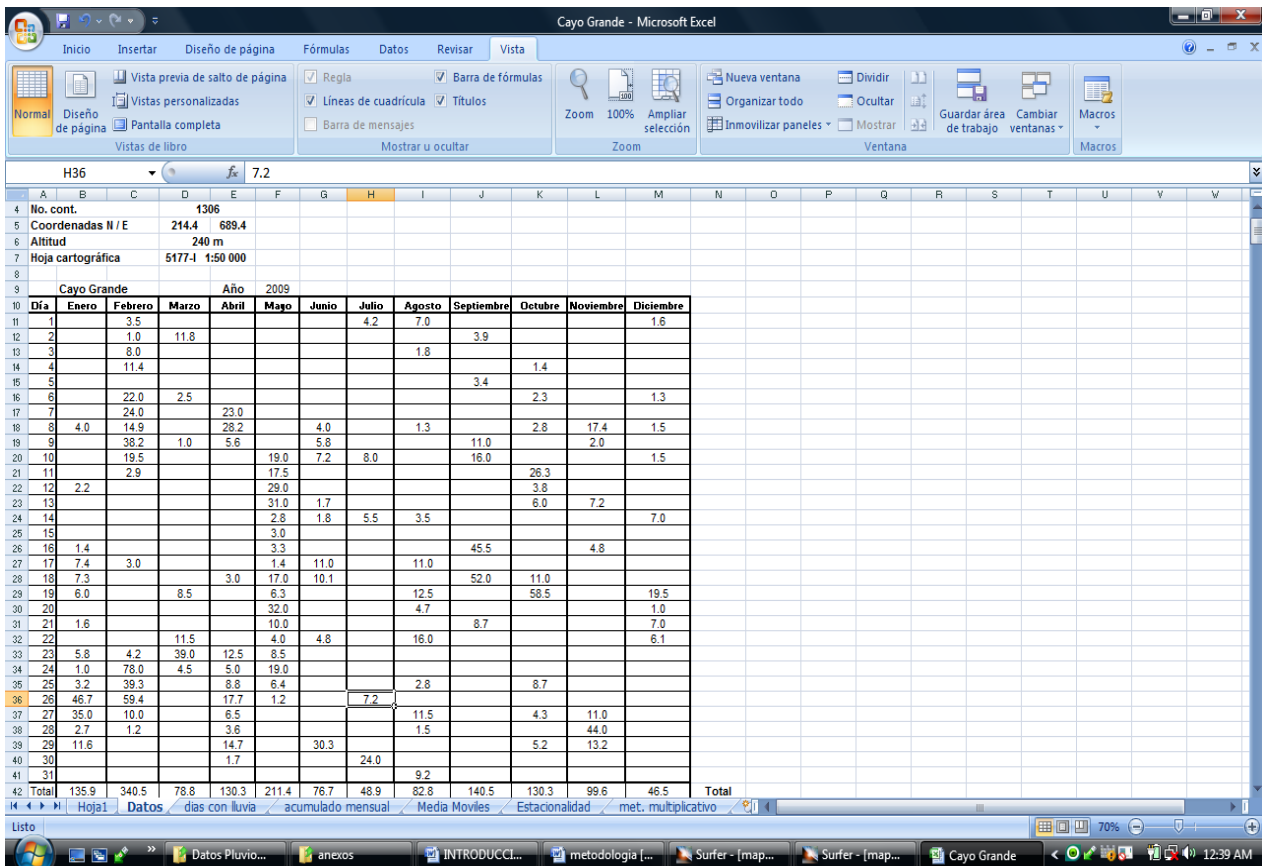


Figura 15. Visualización de la Base de datos primarios de precipitaciones.

A partir de la base de datos primarios de cada pluviómetro, se calcula para cada año y cada mes, el acumulado total de lluvias, las precipitaciones promedios anuales y mensuales así como la cantidad de días que llovió en cada mes y cada año lo cual permite realizar un estudio local del comportamiento pluviométrico para la zona de estudio desde 1989 hasta 2009.

Para determinar los períodos húmedos y secos para el área de estudio y pronosticar el comportamiento de la serie en el tiempo, se realiza el Análisis de series Temporales de datos pluviométricos, a través de la determinación de la Estacionalidad.

Estimación de la estacionalidad en el modelo aditivo.

La serie original X_t bajo un modelo aditivo tiene la forma: $X_t = T_t + S_t + C_t + E_t$

La estacionalidad en el modelo aditivo se supone constante de un año a otro y solo diferenciándose en los tiempos que componen el año, es decir, en los meses, trimestres. A continuación se explica la forma de calcular las columnas de dicha tabla (Figura 16) y los pasos a seguir:

Primero se calculan las medias o promedios móviles:

Sea X_t una serie cronológica de longitud n , entonces la serie M_t será un promedio móvil de orden k de la serie X_t si

$$M_t = \frac{1}{k} \sum_{i=-\frac{k-1}{2}}^{\frac{k-1}{2}} X_{t+i} \quad \text{si } k \text{ es impar,}$$

$$t = \frac{k+1}{2}, \dots, n - \frac{k-1}{2}$$

$$M_t = \frac{1}{k} \sum_{i=-\frac{k}{2}}^{\frac{k}{2}} X_{t+i} \quad \text{si } k \text{ es par}$$

$$t = -\frac{k}{2}, \dots, n - \frac{k}{2}$$

Luego se calculan las diferencias $X_t - M_t$ es decir, serie original menos promedio móvil.

Paso 2: Se calcula la fila total sumando cada columna.

Paso 3: El promedio de cada mes o trimestre está calculado y luego un promedio de los promedios calculados para cada mes o trimestre está obtenido.

Paso 4: El proceso de corrección se realiza con el objetivo de obtener coeficientes estacionales cuya suma sea cero para evitar que la estacionalidad introduzca una desviación sistemática, lo que ocurriría si no son corregidos. La corrección se halla de la forma siguiente.

A los promedios anteriores deben sumarse cantidades de forma tal que estos sumen cero, luego es necesario que la suma de estas cantidades sea el recíproco del total de los promedios, el cual se reparte en partes iguales entre todos los promedios (de cada mes o trimestre).

Paso 5: Con este paso culmina la obtención de los coeficientes estacionales. A cada promedio se le adiciona la corrección calculada en el paso 4 mediante la suma; en otras palabras la última fila de la tabla es la suma de las dos filas anteriores, la fila de los promedios y la fila de las correcciones coeficientes.

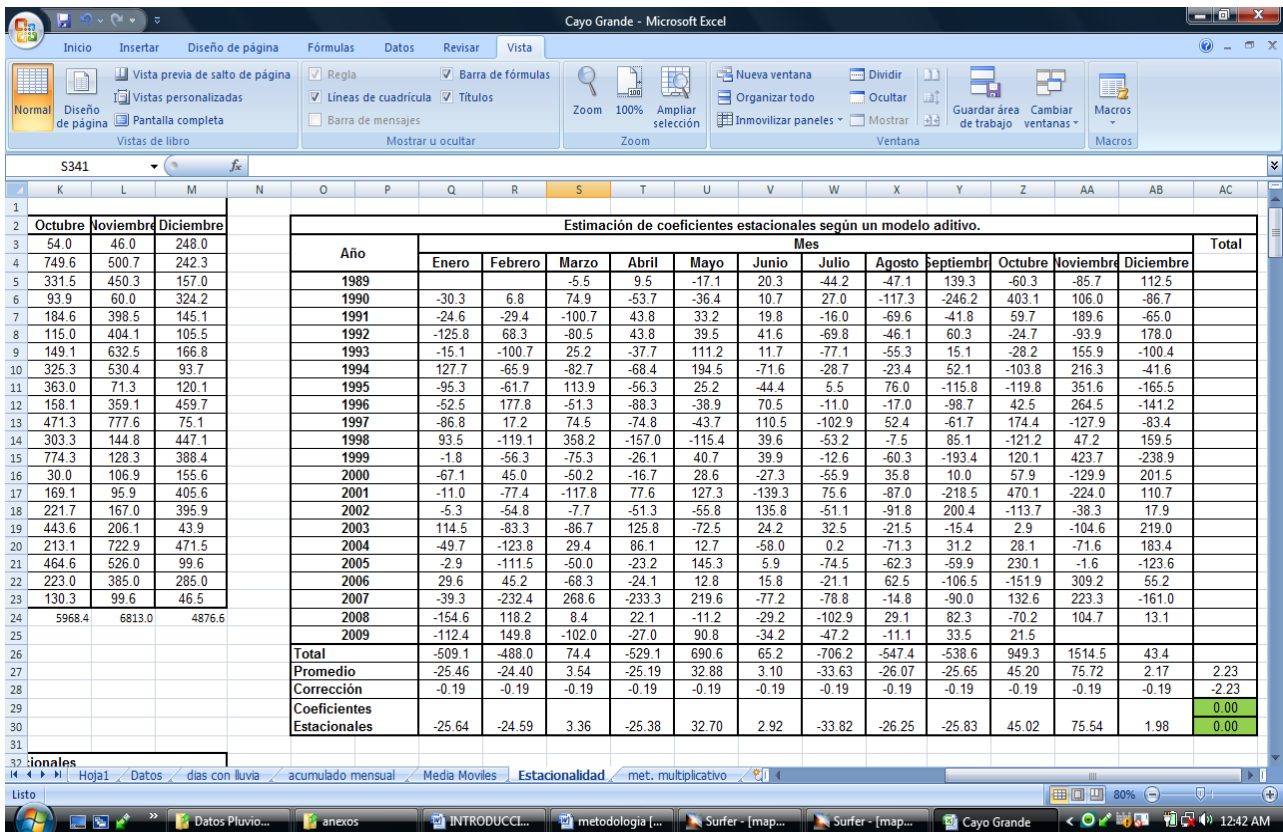


Figura 16. Visualización de los coeficientes de estacionalidad

Se ha aislado ya un componente de la serie cronológica la cual se puede eliminar de la serie original restándole a cada valor el coeficiente estacional que le corresponde. Este proceso de obtener una serie sin componente estacional se conoce como desestacionalización y a la serie así obtenida se le llama serie desestacionalizada o estacionalmente ajustada.

2.3.2 Análisis de Varianza

Se realiza el análisis de varianza por el modelo de clasificación simple para conocer la existencia o no de diferencias significativas para cada pluviómetro del área de estudio (ver Figura 17 B) y para los meses (ver Figura 17 A).

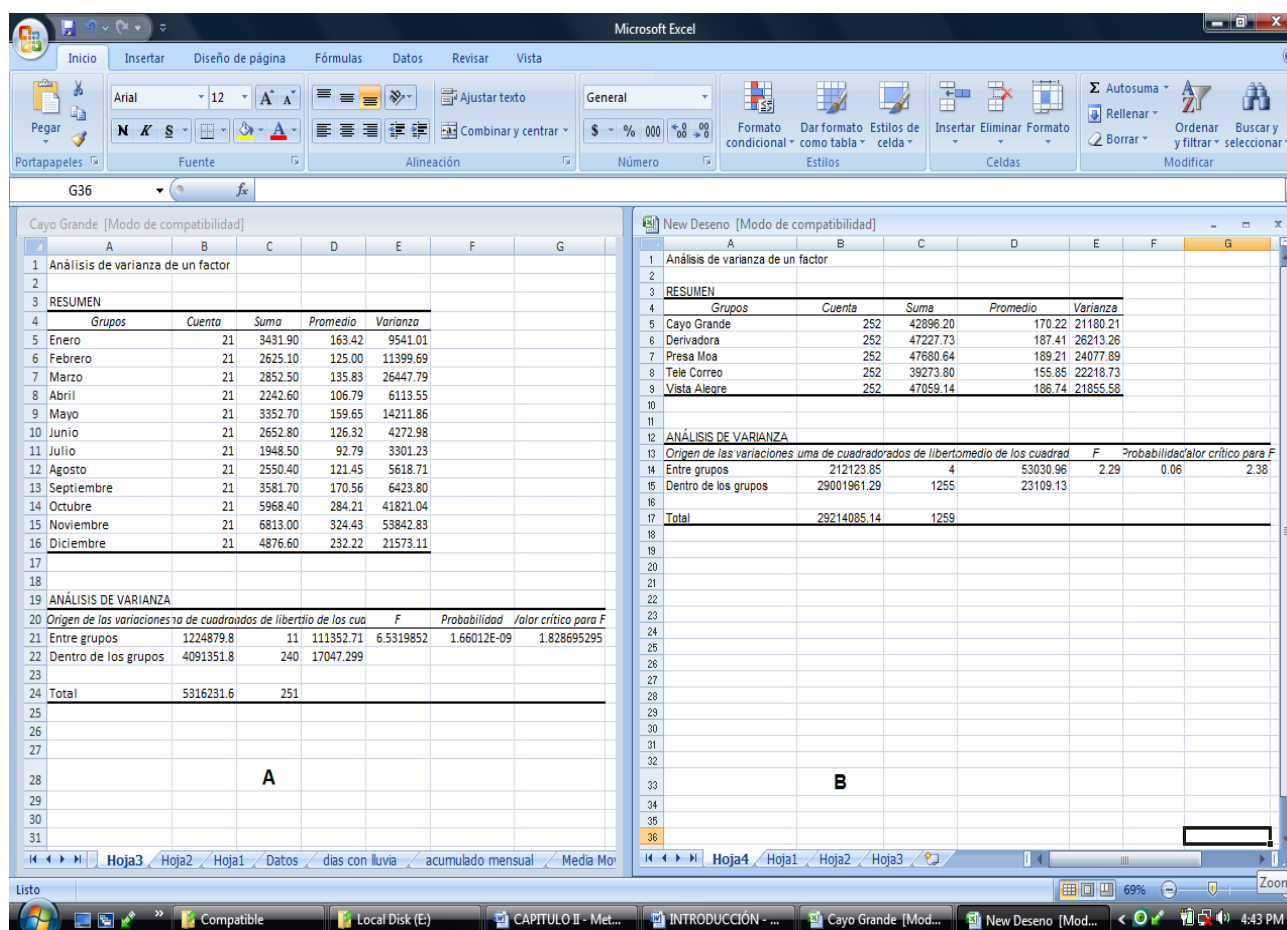


Figura 17. Visualización de análisis de varianza: **A:** Meses **B:** Pluviómetros

2.3.3 Comportamiento espacio-temporal de la humedad natural en los suelos del área de la planta Ferroníquel Minera SA.

De acuerdo al tamaño del área de estudio, el grado de estudio, las características de la información de base y del sistema Hardware-Software, se utilizó como escala de trabajo 1:5000.

La metodología se inicia con la clasificación de los suelos para definir el tipo que existe en esta zona empleando el SUCS, clasificados en Limos arcillosos, con el objetivo de analizar la variación de la humedad natural en ellos tanto en el espacio como en el tiempo.

En la valoración de la distribución de la humedad natural en el espacio, utilizando el MDT del área de estudio, se confecciona un mapa de isocontenido de este índice, mediante la utilización del SURFER. Para interpretar esta propiedad se incluye en el análisis una serie de mapas temáticos, comenzando con la tectónica, específicamente la densidad de

fracturas, las cuales actúan como conductores de agua subterránea. Para su análisis se emplearon los principales sistemas de fallas y el agrietamiento del área así como el accionar de los bloques morfotectónicos. También se emplearon elementos geomorfológicos como la pendiente del terreno que permite valorar el movimiento de las aguas pluviométricas; los espesores de la corteza de intemperismo, la influencia de las principales redes hidrográficas, de la profundidad del manto freático y el espesor de la capa de suelos con sus propiedades.

Para el análisis de la humedad natural del suelo en profundidad se tiene en consideración los tipos de suelos que existen en el área, para ello se determina el valor medio de este contenido para la capa y se realiza un gráfico de humedad contra profundidad y se valora su comportamiento creciente o decreciente considerando su composición granulométrica y sus índices de poros.

2.4 Tercera etapa: Interpretación de los resultados.

A partir de la determinación de la estacionalidad de la serie original, se logra una serie de datos pluviométricos históricos estacionalmente ajustada, lo cual permite definir con claridad y mayor exactitud los periodos húmedos y secos en el área de estudio. Luego se analiza la distribución espacio temporal de la humedad natural de los suelos en el área de estudio y se compara con la distribución de las precipitaciones. Se determina el comportamiento creciente o decreciente de la humedad con la profundidad.

Posteriormente se determina la relación de las precipitaciones con la humedad natural para cada periodos determinados: húmedos y secos y se valora su comportamiento.

CAPITULO III.

INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS.

INFLUENCIA DE LA PLUVIOMETRIA EN EL COMPORTAMIENTO DE LA HUMEDAD NATURAL DE LOS SUELOS DE LA PLANTA FERRONIQUEL MINERA SA.

- Introducción
 - Análisis de la pluviometría en el área de estudio. Interpretación de los resultados estadísticos.
 - Análisis del comportamiento espacio temporal de la humedad natural de los suelos.
 - Valoración de la relación de la pluviometría con la humedad natural de los suelos en el área de la planta Ferroníquel Minera SA en periodos húmedos y secos.
-

3.1 Introducción

El volumen de precipitaciones registrada en la región de Moa es clave para la formación de los yacimientos ferroniquelíferos, ya que estos son el resultado de un proceso de intemperismo intenso donde el agua juega un papel trascendental. Estas condiciones de abundantes precipitaciones, intensa evaporación, altas temperaturas y continuas fluctuaciones del nivel freático de las aguas subterráneas debido a la recarga local o regional que experimentan las mismas, someten a estos suelos a diferentes ciclos de secado y humedecimiento en el año.

Los suelos del área de estudio constituyen todo el material a extraer donde se construye la planta Ferroníquel Minera SA, los cuales tienen un espesor variable aproximadamente de 30 metros (Informe Ferroníquel). Pertenecen a los materiales de la corteza de meteorización laterítica, específicamente a la zona saprolítica del perfil laterítico; según sus principales propiedades físico mecánicas, estos se clasifican en: Limos arcillosos plásticos (MH), Arenas limosas (SM) y Gravas arcillosas (GM). (Tabla 2).

Arenas limosas con gravas (SM) y Gravas limosas con arenas (GM)

En general estos tipos de suelos se distinguen por el predominio indistintamente de la grava o la arena, pues sus otras características son similares como la matriz con alta plasticidad, los pesos específicos altos, entre otras. El contenido de algunas gravas y las arenas son relictos de las serpentinitas, así en ocasiones, están representados por perdigones de hidróxido de hierro y en menor medida por cuarzo.

Limo arcilloso plástico (MH)

En partes son simplemente limos plásticos (arcillosos), en otras, son con arena o arenosos. Pero, como promedio son limos arcillosos plásticos con arena.

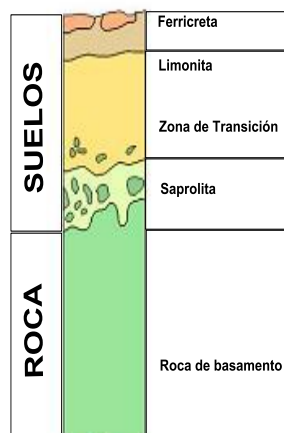
[illegible]

Tabla 2. Clasificación y propiedades de los suelos

Los valores promedios de su granulometría son Grava 3 %, Arena 15 %, Limo 51 %, Arcilla 32 %, Coloide 18 %, . La plasticidad es alta con Límite Líquido 70 %, Límite Plástico 41 % e Índice de Plasticidad 29 %.

Poseen un peso específico de los suelos muy alto con valor de 3.51. En sus condiciones naturales poseen: humedad 54.8 %, los Pesos Específicos Húmedo y Seco son 17.0 kN/m^3 y 11.3 kN/m^3 . En general son de baja resistencia al esfuerzo cortante, aunque como es lógico para los diferentes esquemas de ensayos sus parámetros mejoran, aunque muy ligeramente, desde el estado saturado al Húmedo (natural o con humedad óptima) y desde el rápido al lento. Estos suelos por su composición arcillosa son hinchables, pero por la gran humedad que comúnmente presentan, así como, por su contenido de limos y arenas determinan que en sus condiciones naturales su Hinchamiento tanto Libre como Controlado, estén algo compensados. Puede apreciarse que en su condición compactada según la humedad óptima, son un poco hinchables con valor promedio de 0.097 MPa.

Por su consolidación son suelos deformables con módulo de deformación menor que 20 MPa, para todo el diapasón de cargas ensayadas.

Estos materiales compactados según el Próctor estándar mejoran sus pesos específicos, para lo que habría que secarlos un 13.0 % aproximadamente. Así con humedad óptima de 42.2 %, los Pesos específicos húmedo y Seco son de 18.1 kN/m^3 y 12.8 kN/m^3 respectivamente. De igual manera mejoran las características resistentes y de la consolidación, no ocurriendo así con el hinchamiento el cual se hace más desfavorable.

Aunque no es de interés para la presente investigación, si se debe mencionar que las rocas existentes corresponden a serpentinitas, de color verde oscuro o parduzco, que aparecen agrietadas, fisuradas. Estas serpentinitas son distinguidas como brechosas medias, brechosas finas y como esquistosas. El predominio de distribución en el área de estudio está en correspondencia con el orden mencionado.

Para analizar el comportamiento de la humedad natural de los suelos descritos, a partir de la influencia que sobre este índice tienen las precipitaciones, se dan a continuación los principales resultados aportados por la investigación en el área de la planta Ferroníquel Minera SA.

3.2 Análisis de la pluviometría en el área de estudio. Interpretación de los resultados estadísticos.

Para el análisis de las precipitaciones se cuenta con los datos correspondientes a cinco pluviómetros distribuidos de forma irregular que tienen influencia en el área de estudio.

Al realizar el análisis de varianza para comprobar si existen diferencias significativas en la cantidad de precipitaciones por pluviómetros se obtiene al observar la tabla 3 que $F_{calculada}$ (Fisher) es menor que el valor crítico de F , lo que manifiesta que no hay diferencias significativas entre los acumulados promedios de los pluviómetros pues su comportamiento es similar para toda la serie (Figura 18).

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Cayo Grande	252	42896.20	170.22	21180.21
Derivadora	252	47227.73	187.41	26213.26
Presa Moa	252	47680.64	189.21	24077.89
Tele Correo	252	39273.80	155.85	22218.73
Vista Alegre	252	47059.14	186.74	21855.58

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	212123.85	4	53030.96	2.29	0.06	2.38
Dentro de los grupos	29001961.29	1255	23109.13			
Total	29214085.14	1259				

Tabla 3. Análisis de varianza para los pluviómetros.

La figura 18 muestra la distribución promedio de la lluvia anual de la serie temporal donde se observa, que el año en que más precipitaciones se produjeron es el 2007 y el que menos acumuló es el 1989.

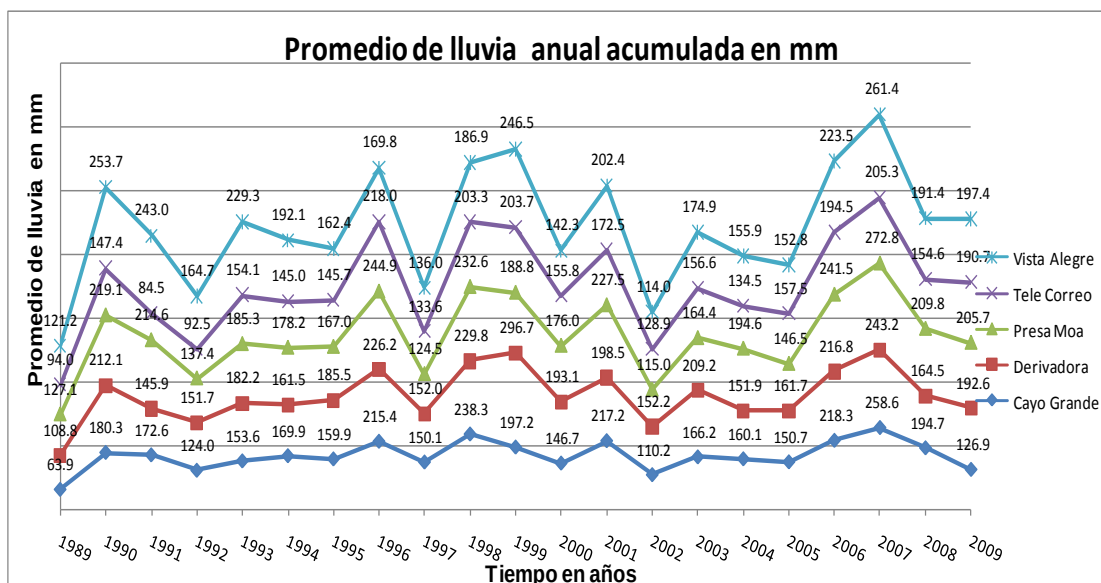


Figura 18. Distribución de las precipitaciones promedio de la serie 1989-2009 por cada pluviómetro.

Cada pluviómetro presenta coeficientes de estacionalidad (Tabla 4) lo cual significa que la serie ya se encuentra estacionalmente ajustada por lo que se definen diferentes periodos húmedos y secos que estarán en dependencia de la época del año en que se encuentren y por tanto existirá mayor o menor precipitación.

Coeficientes estacionales según un modelo aditivo.												
Pluviómetros	Mes											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Cayo Grande	-25.64	-24.59	3.36	-25.38	32.70	2.92	-33.82	-26.25	-25.83	45.02	75.54	1.98
Derivadora Moa	-19.39	-33.17	2.03	-27.44	32.12	-11.52	3.69	-39.53	-50.91	51.65	69.83	22.62
Presa Moa	-36.87	-28.27	27.88	-40.36	22.49	11.96	-31.30	-18.39	-41.47	16.16	94.31	23.87
Tele Correo Moa	-18.50	-37.02	-13.77	-2.48	41.42	-24.40	-7.36	-21.61	-46.76	46.36	66.10	18.03
Vista Alegre	-30.53	-28.95	18.04	-39.88	49.39	-26.09	-13.86	-20.18	-33.52	31.80	79.81	13.97

Tabla 4. Coeficientes de estacionalidad para cada pluviómetro.

Sin embargo al realizar el análisis de varianza para los acumulados mensuales como $F_{calculada}$ es mayor que el valor crítico de F (tabla 5) se rechaza la hipótesis, es decir la cantidad de agua acumulada por meses durante los 21 años no es la misma como promedio. En este caso se hace necesario detectar que meses son los que provocan estas diferencias.

Estadísticamente es imposible detectar los meses causantes de estas diferencias por no aparecer valores para el grado de libertad de 240 recogidos en la tabla que aparece en el libro Análisis de Varianza.

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Enero	21	3431.90	163.42	9541.01
Febrero	21	2625.10	125.00	11399.69
Marzo	21	2852.50	135.83	26447.79
Abril	21	2242.60	106.79	6113.55
Mayo	21	3352.70	159.65	14211.86
Junio	21	2652.80	126.32	4272.98
Julio	21	1948.50	92.79	3301.23
Agosto	21	2550.40	121.45	5618.71
Septiembre	21	3581.70	170.56	6423.80
Octubre	21	5968.40	284.21	41821.04
Noviembre	21	6813.00	324.43	53842.83
Diciembre	21	4876.60	232.22	21573.11

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1224879.76	11	111352.71	6.53	1.66012E-09	1.83
Dentro de los grupos	4091351.81	240	17047.30			
Total	5316231.57	251				

Tabla 5. Análisis de varianza para los meses

Al analizar la lluvia acumulada en el periodo 1989-2009 se observa en la figura 19 que los meses de mayor acumulados corresponden a noviembre, octubre y diciembre y con menos acumulados de lluvias los meses de abril y julio.

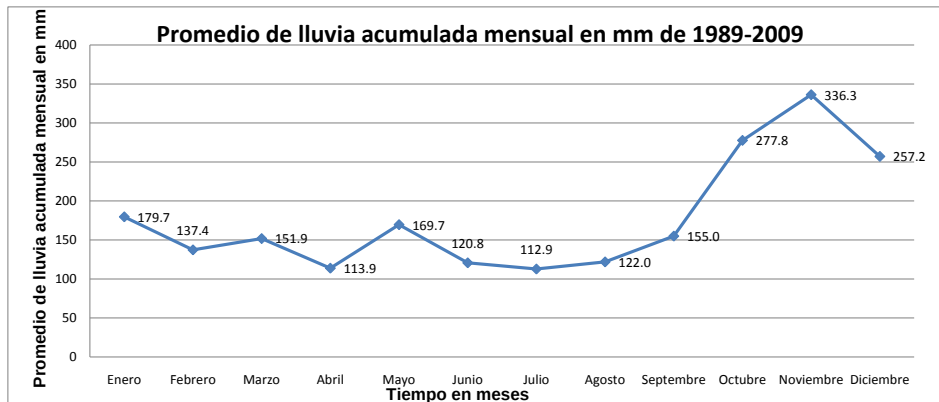


Figura 19. Distribución de las precipitaciones promedio mensuales de la serie 1989-2009.

La figura 20 refleja el comportamiento similar de la cantidad de días con lluvias anuales que se registran en la serie analizada para cada pluviómetro del área de estudio, manifestando una regularidad de cuatro o cinco años en que existe un ascenso en la cantidad de días lluviosos. Los meses con más días lluviosos son noviembre, octubre y diciembre y los días con menor cantidad de lluvia abril y julio. Este comportamiento corrobora la existencia de dos periodos húmedos: uno intenso y largo que comprende septiembre, octubre, noviembre, diciembre, enero y el otro con menos acumulado de lluvia y más corto que comprende el mes de mayo. Los dos periodos secos comprenden los meses febrero, marzo, abril y el otro los meses junio, julio y agosto.

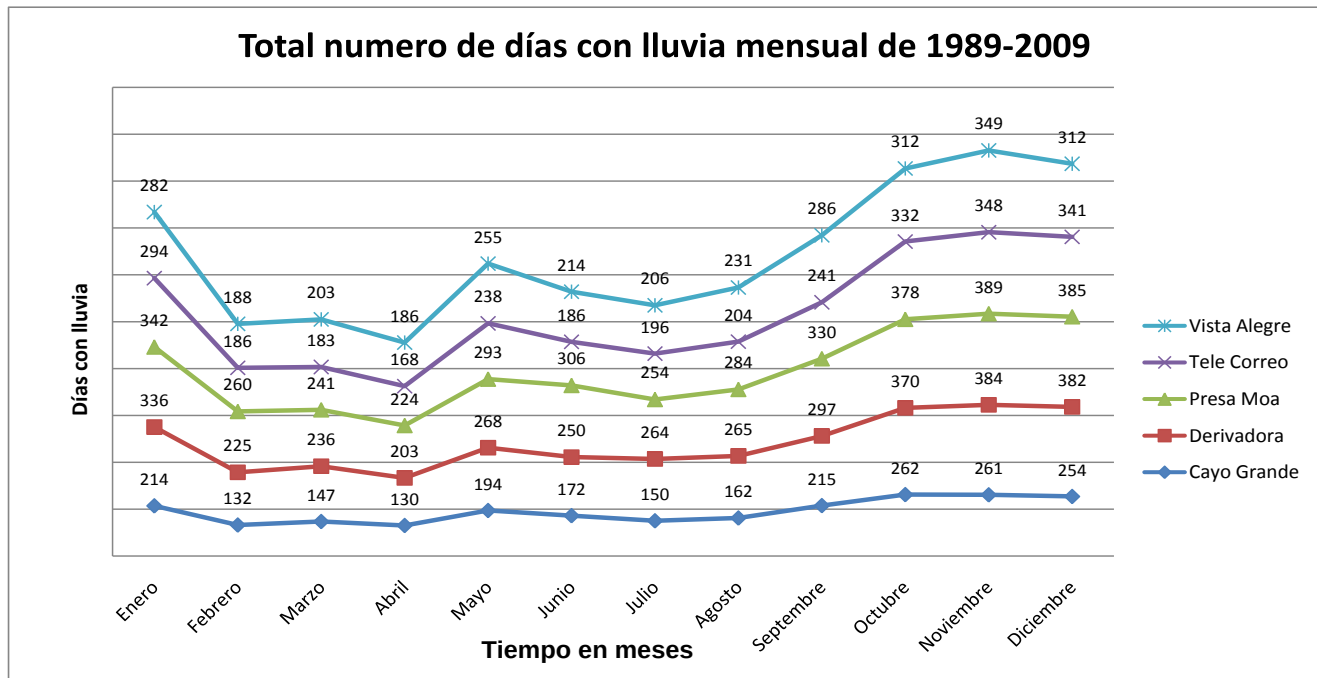


Figura 20. Distribución del total de días con lluvias desde 1989-2009

3.3 Análisis del comportamiento espacio temporal de la humedad natural de los suelos.

La Humedad natural es un parámetro que es variable en el tiempo. Su comportamiento espacio temporal depende entre otros factores de la composición granulométrica, los índices de poros, agrietamiento, espesores de la capa de suelos, profundidad del manto freático.

Una característica de los suelos naturales es que los poros entre partículas sólidas están ocupados por cantidades variables de agua y aire, sobre todo en la parte superior y en el caso específico de la minería a cielo abierto por los cortes que facilitan la extracción del mineral. La variabilidad espacio temporal de la humedad natural se debe además de la composición granulométrica y el valor del índice de poros, a los ciclos de secados y humedecimiento que experimentan los suelos por las condiciones climáticas (lluvia y evaporación).

Si el clima determina condiciones propicias para el secado, el agua se evaporará de los poros haciendo que la succión aumente respecto a la distribución hidrostática, más rápido en

la superficie que en profundidad. El gradiente de succión hará que el vapor extraído de los meniscos sea transportado por difusión molecular hacia la superficie, lo cual completa el mecanismo de secado, estableciéndose un flujo capilar desde el nivel freático hacia la capa superficial donde ocurre la evaporación (Carmenate 2006).

En el trabajo de Rodríguez (2002) se realiza un estudio hidrogeológico de la región de Moa donde se llega a la conclusión de que el nivel freático, contenido de humedad y el grado de saturación de la corteza laterítica y las rocas ultrabásicas es variable en el espacio y en el tiempo. En la zona de Moa de forma interanual se establecen dos ciclos de variación del nivel freático del agua en las rocas ultrabásicas y el corte laterítico.

Estas fluctuaciones son más suaves en el corte laterítico debido a su alta porosidad, que para el tipo de suelo limo arcilloso que aparece en el área de estudio oscila entre 1.04 y 3.05, para un valor medio de 2.15; lo que confiere un mayor coeficiente de almacenamiento de agua. La subida del nivel freático en profundidad permite el ascenso capilar del agua y con ello el humedecimiento del corte laterítico (capa saprolítica).

De forma general una reducción del volumen de poros implica un aumento importante del valor de entrada de aire en el suelo. El valor de entrada de agua se encuentra en torno a los 8 MPa y la humedad residual entre el 2 y el 6%.

Como muestra la figura 21, los valores de humedad de los suelos son altos, en el área de estudio los mayores contenido (50, 60,70 %) se localizan hacia el NNE y NNW y hacia el extremo más SE y los valores más bajos (35, 40 %) hacia el centro de la región.

MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE HUMEDAD

Escala original 1: 10 000

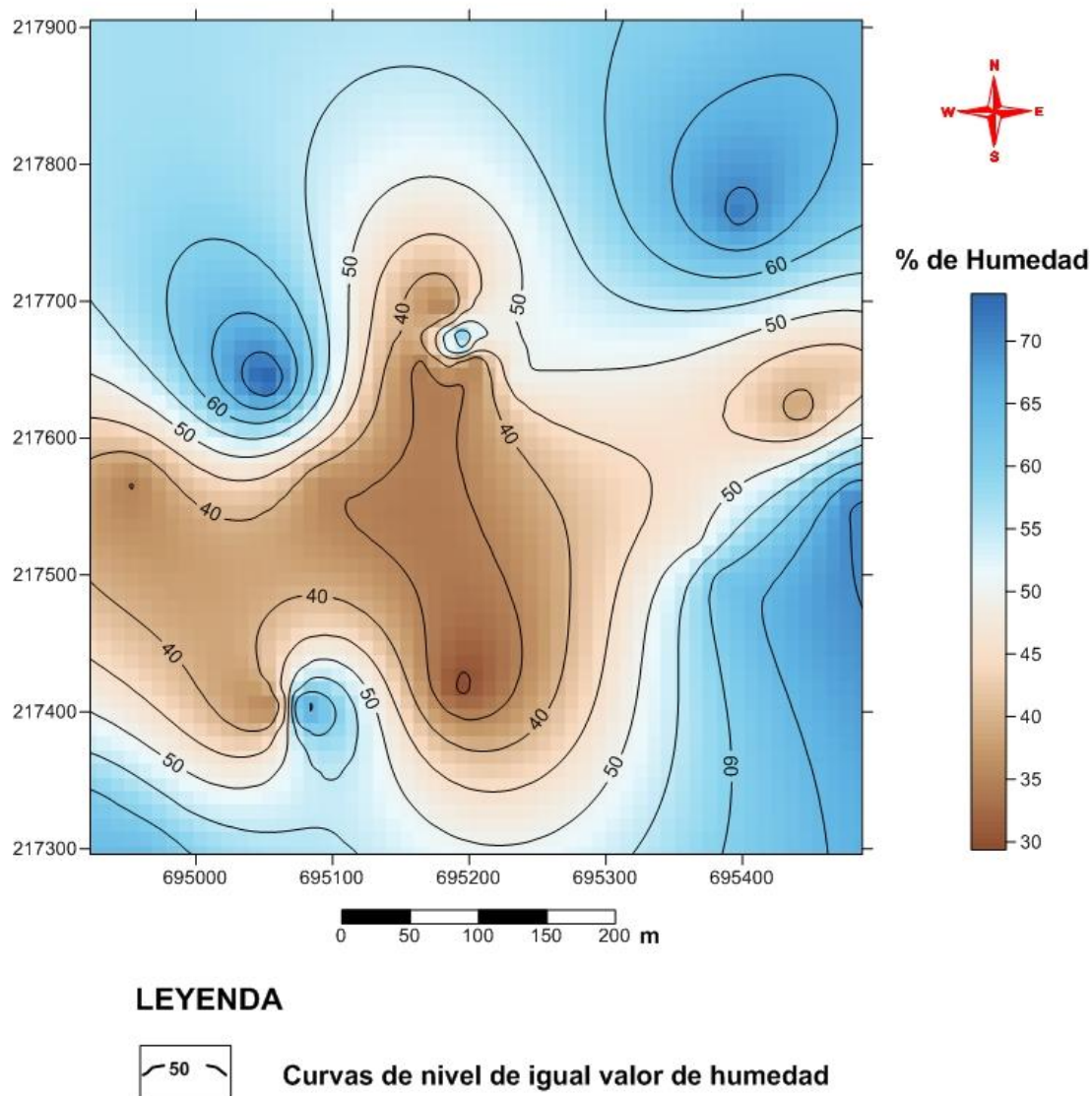


Figura 21. Mapa de distribución de humedad

Esta distribución espacial de las humedades está condicionada por la tectónica hacia las zonas de mayor porcentaje de humedad se concentra la mayor densidad de fracturas (Figura 22), donde la dirección del agrietamiento es predominantemente NE y NW con un ángulo de buzamiento de 85° aproximadamente; siendo estas discontinuidades la vía de circulación de las aguas hacia la roca donde se encuentra el acuífero.

MAPA DE DENSIDAD DE FRACTURAS

Escala original 1: 10 000

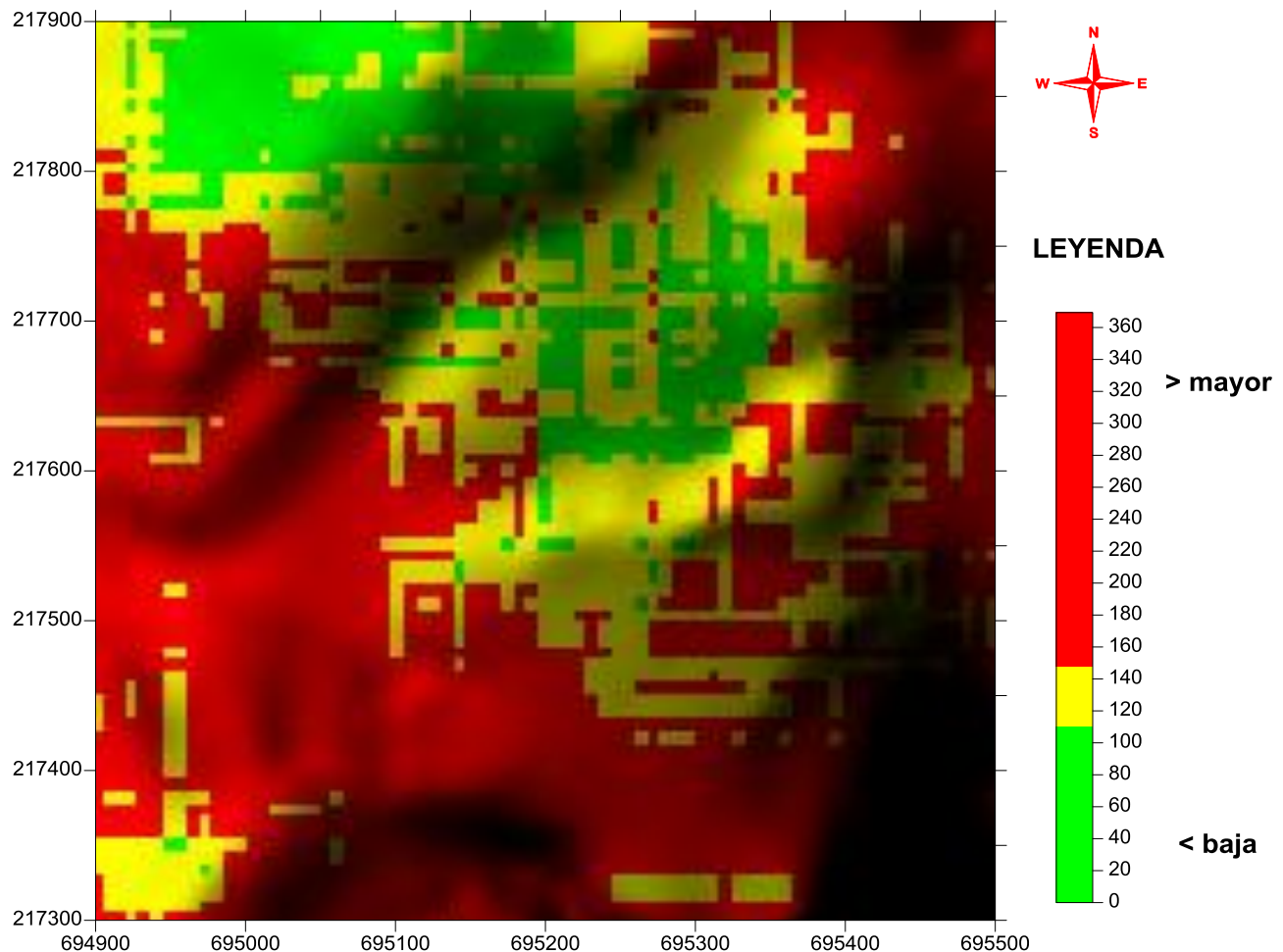


Figura 22. Mapa de densidad de fracturas (*Cortesía de Quality Cuba S.A*)

Estas zonas también se caracterizan por presentar un intenso desarrollo de la red fluvial de diversos ordenes (Figura 23) que suministran el agua que mantiene un elevado valor de humedad en la zona debido a la granulometría fina que caracterizan al suelo y a sus valores de índice de poros. Otro factor que incide en esta distribución de humedad es la profundidad a la que se encuentra el manto freático (Figura 24) localizado a pocos metros (aproximadamente a los 10 m) en las zonas de humedad alta y a 18 m en las zonas de valores bajos de humedad.

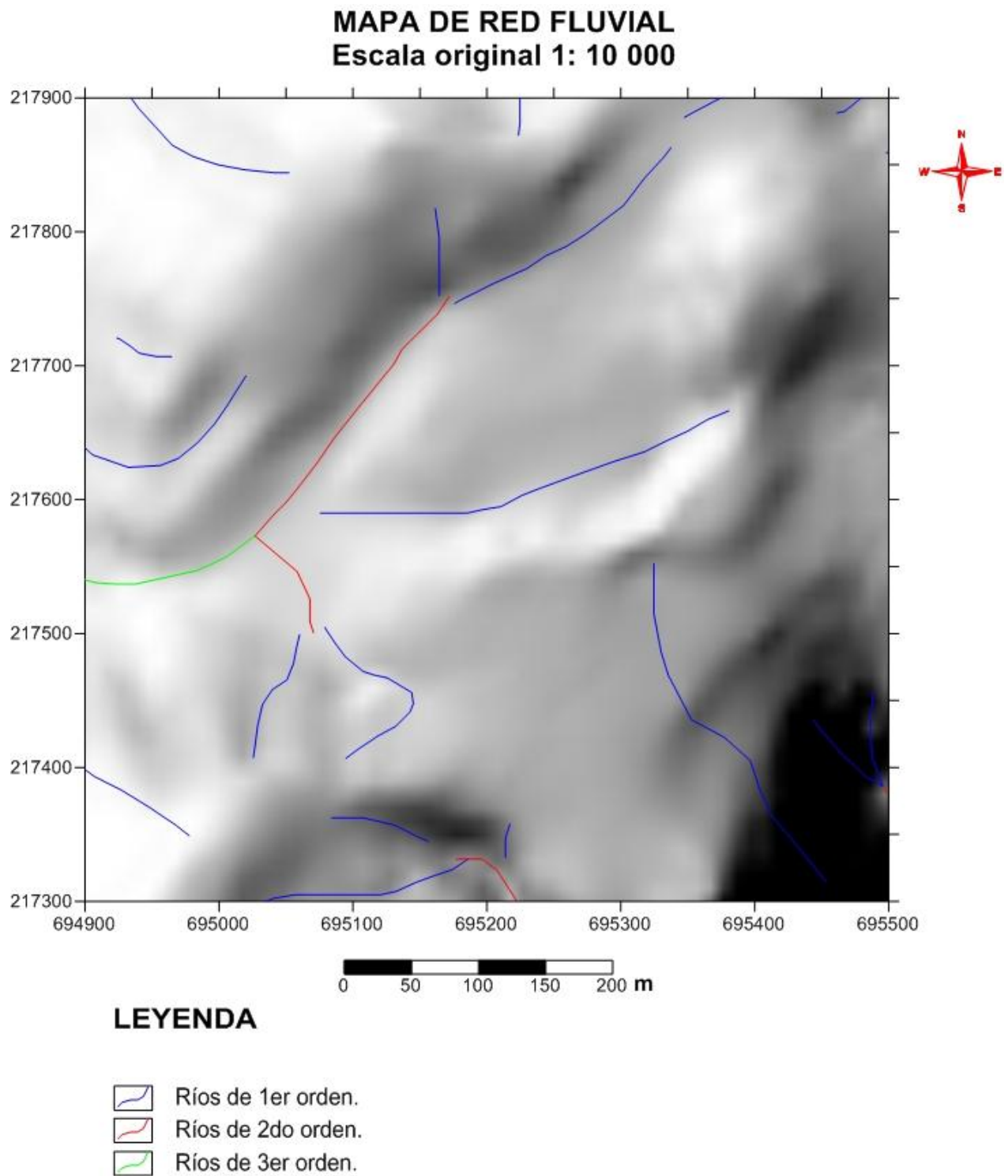
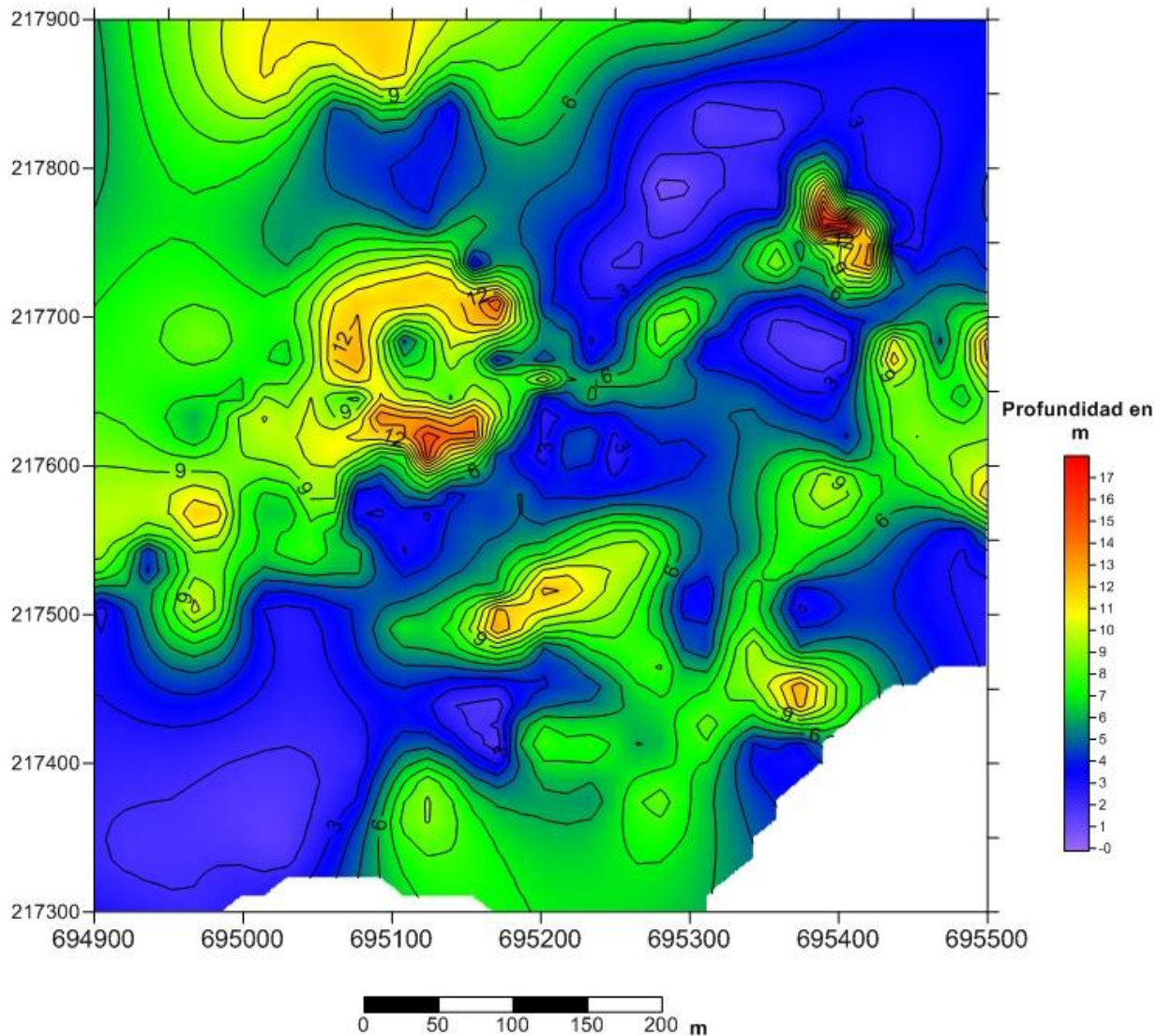
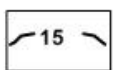


Figura 23. Mapa de Red Fluvial. (Cortesía de Quality Cuba S.A)

MAPA DE PMF DEL ÁREA DE ESTUDIO.
Escala original 1: 10 000



LEYENDA

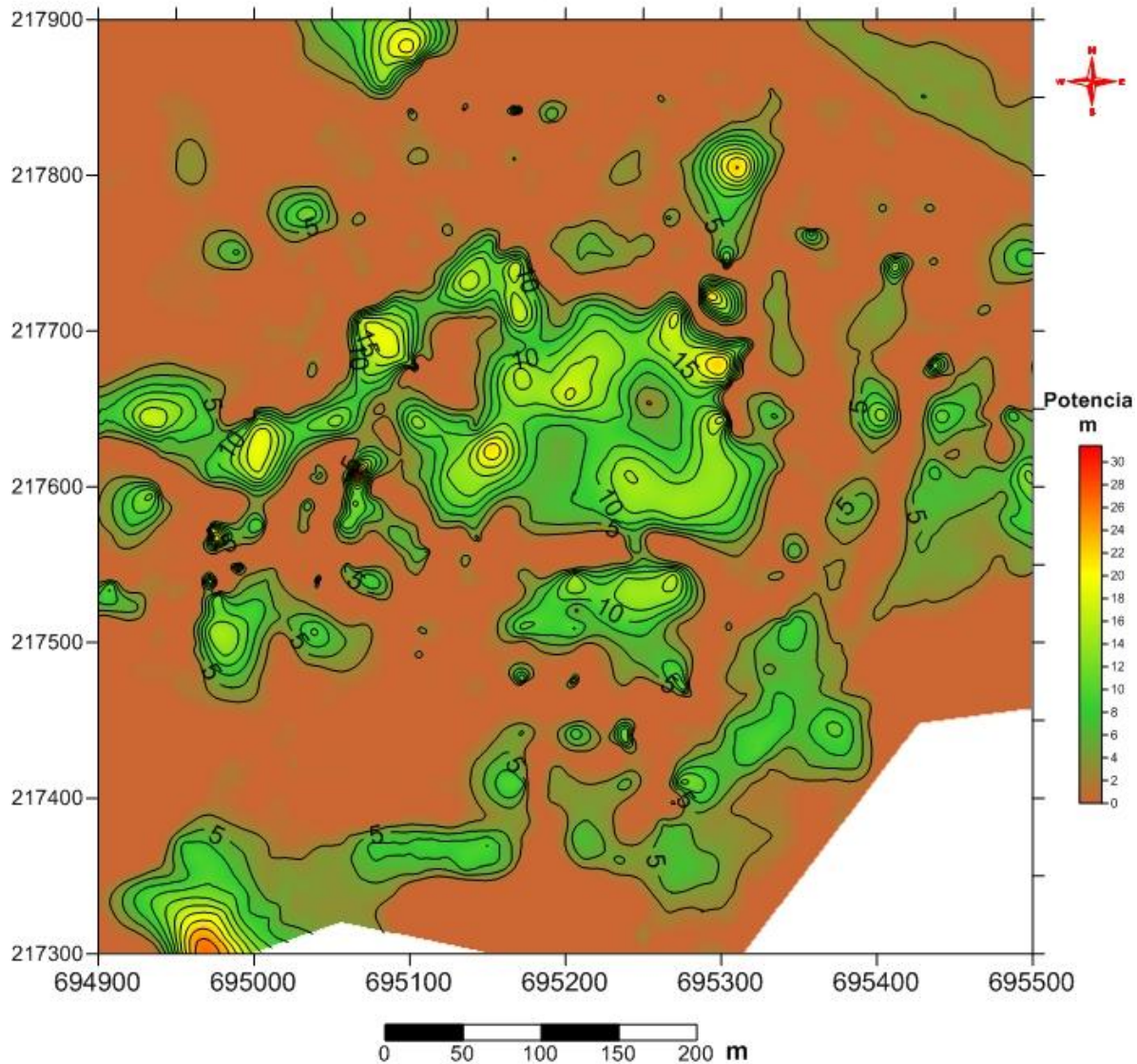


Curvas de nivel de igual valor de potencia

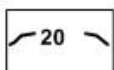
Figura 24. Mapa de Profundidad del Manto Freático (*Cortesía de Quality Cuba S.A*)

Los mayores valores de humedad natural están asociados a los menores espesores de suelos (10-12 m), y los valores menores de humedad natural a los mayores valores de espesores de suelos (30-32 m) (Figura 25).

MAPA DE POTENCIA FINAL DE SUELOS Escala original 1: 10 000



LEYENDA



Curvas de nivel de igual valor de potencia.

Figura 25. Mapa de Potencia Final de Suelos (Cortesía de Quality Cuba S.A.)

De acuerdo con la figura 26 se observa el incremento de la humedad natural del suelo con la profundidad. Los mayores valores los encontramos asociado a mayor profundidad dentro de la capa saprolítica, mientras que los menores a la parte superior de la misma.

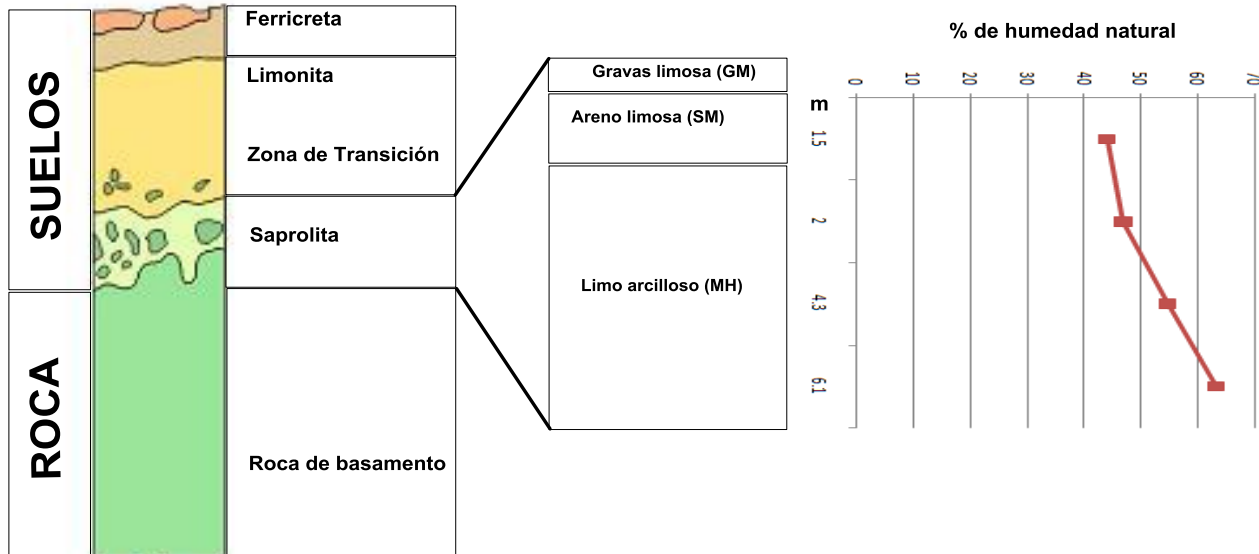


Figura 26. Gráfico de variación de la humedad natural con la profundidad.

3.4 Valoración de la relación de la pluviometría con la humedad natural de los suelos en el área de la planta Ferroníquel Minera SA en periodos húmedos y secos.

Durante una lluvia o inundación, la succión en superficie se hace nula y la capa superficial seca absorbe el agua líquida debido al gradiente de succión. Se establece entonces un frente mojado que avanza hacia abajo y es una de las causas que provoca el alto índice de humedad de los suelos en el área de estudio (Carmenate 2006). Esta característica reafirma que la humedad natural del suelo es un índice que varía con el tiempo, a lo largo del mismo ella no se mantiene igual, disminuye o aumenta, de ahí que se consideren los suelos húmedos o secos en dependencia del porcentaje de humedad, sin perder de vista de que los suelos nunca serán totalmente secos, es imposible eliminar todo su contenido de agua, es por eso que el término más empleado es suelos parcialmente saturados o no saturados. Este comportamiento en el tiempo de la humedad natural depende de la intensidad y duración de los procesos de meteorización y erosión, de la composición granulométrica, de la porosidad y de la superficie específica de los granos.

En el área de estudio se valora este índice de humedad dentro del periodo lluvioso y se observan cambios en el índice en correspondencia con el tiempo y la cantidad de precipitaciones ocurridas.

De manera general al valorar la influencia de la humedad natural de los suelos con la pluviometría se infiere que existe una relación directa entre los altos porcentos de humedad que presentan los mismos en el área de estudio y los altos acumulados de lluvias (Figura 27), influencia que viene dada por la composición granulométrica, que se caracteriza por el predominio de las partículas finas y por los altos índices de poros que le confiere una alta porosidad al material y por tanto la existencia de porcentos considerables de humedad residual (6%).

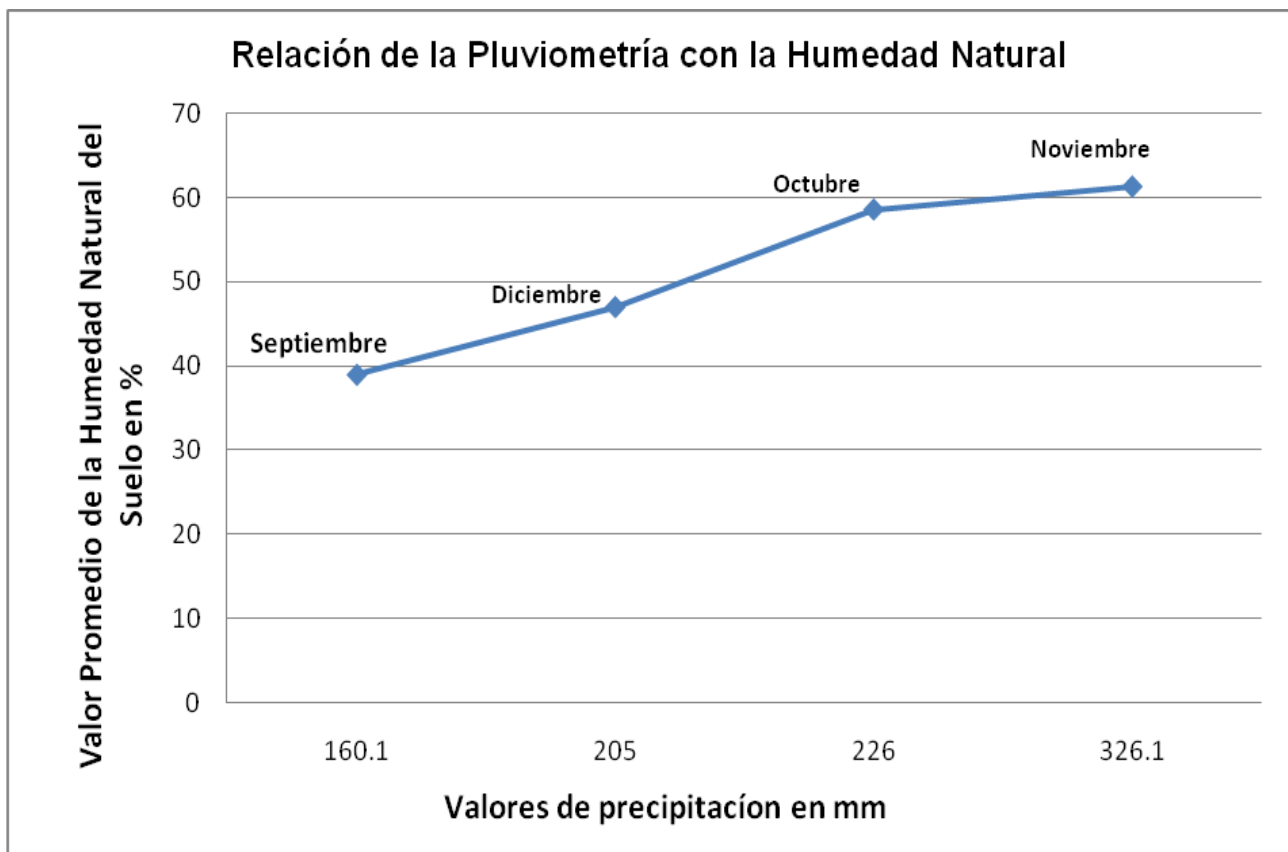


Figura 27. Relación de la pluviometría con la humedad natural.

CONCLUSIONES

- ✓ A partir de la determinación de los coeficientes de estacionalidad para cada pluviómetro se logra una serie temporal de datos pluviométricos ajustada, que define la existencia de períodos húmedos comprendidos entre los meses septiembre - enero con un promedio de lluvia que oscila entre 155-336 mm y el mes de mayo con un promedio de 169.7 mm; y períodos secos que se dividen entre los meses febrero, marzo, abril con un promedio de lluvia entre 113-151 mm y el que abarca los meses junio, julio, agosto con un acumulado promedio entre 120-122 mm de precipitaciones.
- ✓ Los resultados del análisis de varianza demuestran que los acumulados promedios de precipitaciones en cada pluviómetro del área de estudio no presentan diferencias significativas, sin embargo si existen diferencias marcadas entre los acumulados promedios mensuales, que permiten definir los meses más lluviosos y menos lluviosos.
- ✓ Los suelos del área de estudio constituyen todo el material a extraer donde se construye la planta Ferroníquel Minera SA, los cuales tienen un espesor variable aproximadamente de 30 metros. Pertenecen a la zona saprolítica del perfil laterítico y según sus principales propiedades físico mecánicas, estos se clasifican en: Limos arcillosos plásticos (MH), Arenas limosas (SM) y Gravas arcillosas (GM)
- ✓ Los mayores espesores de suelos que se desarrollan en la zona corresponden a los limos arcillosos con un alto valor promedio de humedad (54.8%) que los clasifica como suelos muy húmedos; aumentando esta con la profundidad.
- ✓ Existe una relación directa con tendencia lineal entre la pluviometría y el valor de humedad natural de los suelos. A mayor acumulado de precipitación mayor valor de humedad natural en el área de estudio.
- ✓ La variabilidad espacio temporal de la humedad natural se debe además de la composición granulométrica, al alto índice de poros ($e = 2.15$) lo que confiere un mayor coeficiente de almacenamiento de agua y a los ciclos de secados y humedecimiento que experimentan los suelos por las condiciones climáticas (lluvia y evaporación).

RECOMENDACIONES

- Emplear programas profesionales de estadística que permitan determinar la tendencia de la serie temporal para cada pluviómetro.
- Realizar estudios de la interfase agua-aire y de permeabilidad saturada de los suelos del área de estudio por presentar una composición granulométrica fina y alta porosidad que pueden hacer que la altura capilar sea significativa.
- Realizar determinaciones de los valores de humedad natural de los suelos del área de estudio durante los periodos secos en el laboratorio para conocer el comportamiento de la misma, ya que los resultados que se tienen de estos periodos son empíricos.
- Recomendar a los directivos de la Planta Ferroníquel Minera SA la utilización de los resultados de esta investigación para la mejor planificación de las operaciones mineras y del método de pre-secado.

BIBLIOGRAFÍAS

- Adamovich A. y V. Chejovich. 1964. Principales características de la geología y minerales útiles de la región norte de la provincia de oriente. *Revista Tecnológica*. 2:14-20.
- Adamovich y Chejovich, 1964; Cobiella, 1978; Quintas, 1989; Blanco y Proenza, 1993; Iturralde-Vinent, 1996),
- Aguirre Jaime, Armando 1994. Introducción al tratamiento de series temporales. Aplicación a las Ciencias de la Salud. Ediciones Díaz de Santos, Madrid. P. 209
- Almaguer, Y. 2005. Evaluación de la susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo de deslizamientos en el yacimiento Punta Gorda. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa (Tesis doctoral) 108p.
- Almaguer, Y. 2005. Evaluación de la susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo de deslizamientos en el yacimiento Punta Gorda. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa (Tesis doctoral) 108p.
- Almaguer, Y. y R. Guardado. 2006. Tipología de movimientos de masas en cortezas lateríticas residuales del territorio de Moa. Cuba. *Minería y Geología* [en línea] Vol. 1, No. 1. <http://ismm.edu.cu/revistamg/v1-n1-2006/art1-1-2006.pdf> [consulta: 20 marzo. 2009] ISSN 0258 5979.
- Álvarez, R. 1983. Nuevo método de empleo de los datos de viento, para su aplicación a los problemas de la contaminación de aire. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, La Habana, Cuba, 1: 139-141.
- Arellano, M., Molerio, L.F. y Suri, A. 1992. Efecto de altitud del ^{18}O en zonas de articulación de llanura criptocársica con carso de Montaña. *Primer taller internacional sobre cuencas experimentales en el karst*. (Editores Arellano, M., Antigüedad, I., Morell, I. y Eraso, A.) Matanzas, Cuba, 29-42.
- ASTM (Annual Book of ASTM Standards) (1993). Section 4. Construction. Volume 04.08. Soil and rock. Dimension stone; geosynthetics. 1296 p.

- Batista, J. 1998. Caracterización geológica y estructural de la región de Moa a partir de la interpretación del levantamiento aeromagnético 1: 50 000. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa (Tesis de maestría) 79p.
- Batista, L.M., Matos, F., y Gutiérrez, R. 2002. Comportamiento de las precipitaciones en Cayo Coco, Jardines del Rey. Cuba. *El Agua y el Clima*. Publicación de la Asociación Española de Climatología (AEC), Serie A(3): 135-142.
- Blanco, J y J. Proenza. 1993. Terrenos tectono-estratigráficos en Cuba Oriental. *Revista Minería y Geología*, 3.
- Brand N.W., Butt C.R.M., Elias M. (1998). Nickel laterites: Classification and features. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17, 81-88.
- Campos, M. 1983. Rasgos principales de la tectónica de la porción oriental de Holguín y Guantánamo. *Minería y Geología*, 2: 51-76.
- Carmenate J. 2006. Influencia de la interfaz agua-aire en la estabilidad de taludes de los suelos lateríticos in situ de la región de Moa. Tesina de DEA.
- Casañas X. 2009. Recursos Minerales sólidos. En: Geología de Cuba para todos. Pág: 110-124. Editorial Científica Técnica.
- CENAI, 2002. Informe sobre la situación sismológica del Nordeste de la Provincia de Holguín, las acciones llevadas a cabo por el Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas para reducir el riesgo sísmico en las instalaciones de níquel y propuesta de estrategia para enfrentar los estudios de riesgos sísmicos en la industria de níquel.
- Chatfield, C. 2003. The Analysis of Time Series: An Introduction. Ediciones Chapman and Hall. London, 2003.
- Cobiella, J.L. 1978. Estratigrafía y paleogeografía del Paleógeno de Cuba oriental. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa (Tesis doctoral) 210 p.
- Colectivo de autores, 1984. Análisis de Varianza VH. Habana. Cuba. P. 270. Editorial Pueblo y Educación.
- Colectivo de autores, 2004. Análisis de Regresión y Series Cronológicas. Ediciones Félix Varela. Habana. p. 392

- Colectivo de autores, 2010. Informe de Investigación de detalle para la construcción de planta Ferroníquel Minera SA. (Cortesía Quality Cuba SA)
- Contreras Riquelme (2000). Análisis pluviométrico de la región del Maule en el Siglo XX. <http://www.miliarium.com> . Consulta 10 de marzo 2010.
- Cué Muñiz, J, Castell, 1987. Estadística. Segunda Parte. Edición ENPES. p. 358.
- Cuesta, O.A. Ortiz, P.L. y González M.L. 1998. Deposition and atmospheric nitrogen concentrations trends in Cuba. *Water, Air, and Soil Pollution*, 106(1-2): 163-169.
- De Miguel F. C. (1999). Hidrogeología Aplicada. Edit. Félix Varela, La Habana.
- De Miguel F. C. (2004). Informe hidrogeológico conclusivo sobre: Investigaciones Ingeniero-geológicas e hidrogeológicas del yacimiento Punta Gorda. (Informe Técnico). ISMM, Moa.
- Díaz L.R., Díaz J.L. y Hernández, E. 1983. Influencia de la orografía sobre la distribución de las precipitaciones en Cuba. *Revista Voluntad Hidráulica*, La Habana, Cuba, XX(1): 42-46.
- Fernández, N. y Maximova, O. 1990 Algunas experiencias durante la determinación de los parámetros de las precipitaciones anuales. *Revista Voluntad Hidráulica*, La Habana, Cuba, XII (83): 41-47.
- Fonseca, E.; V.N. Zelepugin y M. Heredia. 1985. Structure of the ophiolite association of Cuba. *Geotectonic*, 19: 321-329.
- González de Vallejo, L. I. (2002). Investigaciones in situ en Ingeniería Geológica. 715 Págs. ISBN: 84-205-3104-9. Pearson Educación, Madrid
- González, E.A. y Lora, B. Régimen de lluvia de la pluvisilva submontana en Cuba. *Revista Voluntad Hidráulica*, La Habana, Cuba, XXIV(87): 64-68.
- Heredia Calderón (2000). Una metodología de análisis regional de frecuencia de lluvias intensas adecuadas para zonas bajo los efectos de El niño. Boletín SELPER. México N. 33, pág. 14-24
- Hernández Pardo (2007). Estudio pluviométrico de Venta del Moro y su influencia en el cambio climático. International Conference on Regionalization in Hydrology, TU

Braunschweig, Lower Saxonia , Germany; March 10-14, IAHS Publication (IN PRESS), p105-108.

Informe de Investigación para la construcción de la Planta Ferroníquel Minera SA. (*Cortesía Quality Cuba SA*) 2010

Iturralde-Vinent, M. A. 1998. Sinopsis de la constitución geológica de Cuba. *Acta Geológica Hispana*, 33(1-4): 9-56.

Iturralde-Vinent, M. A. 1996. Geología de las ofiolitas de Cuba. En: Iturralde-Vinent, M. (ed.). Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba. IGCP project 364. Special contribution n.1, p. 83-120.

Lecha, L., Fernández, A. y Bueno, J. 1994. Las precipitaciones diarias en la región central de Cuba. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, La Habana, Cuba, 23-24:79-82.

López, G., Herrera, J. y Bernal, P. 2000. Estimación de los coeficientes de evaporación para la región oriental de Cuba. *Revista Voluntad Hidráulica*, La Habana, Cuba, XXI (92-93): 36-40.

Martinez Cortizas y Castillo Rodriguez (1996). Estacionalidad pluviométrica en Galicia: Comportamiento, representatividad espacial y mecanismos asociados. *Boletín de la AGE*: 65-85

Montesinos A 2007. Energía eólica en Cuba: su historia. Disponible en: http://www.cubahora.co.cu/index.php?tpl=principal/vernoticias/vernot_ptda.tpl.html&newsid_obj_id=1021775. Consulta 12 de Dic. 2009.

Montesinos A. Energía eólica en Cuba: su historia. Disponible en: http://cubahora.co.cu/index.php?tpl=principal/ver-noticias/ver-not_ptda.tpl.html&newsid_obj_id=1021775

Pérez, A. M. y S. Santana. 1977. Investigación ingeniero geológica. Objetivo 761. Conductora Moa. Centro de Investigaciones Ingeniero Geológicas F.A.R. 85p.

Proenza J. 1997. Mineralización de cromita en la faja ofiolítica Mayarí-Baracoa (Cuba). Ejemplo del yacimiento merceditas. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa (Tesis doctoral) 227p.

- Proenza, J.; F. Gervilla; J.C. Melgarejo y J.L. Bodinier. 1999. Al- and Cr-rich chromitites from the Mayarí-Baracoa ophiolitic belt (Eastern Cuba): Consequence of interaction between volatile-rich melts and peridotites in suprasubduction mantle. *Economic Geology*, 94: 547-566.
- Quintas F. 1989. Análisis estratigráfico y paleogeografía del Cretácico Superior y del Paleógeno de la provincia Guantánamo y áreas cercanas. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa (Tesis doctoral) 161p.
- Resch G, 2006. Estudios estadísticos de Régimen Pluviométrico de canales y situaciones comparativas. Avances sobre la Investigación en Bioclimatología: 565-581. VII Simposio de Bioclimatología, Sevilla.
- Riverón A.B., 1996: "Caracterización de la respuesta dinámica de los suelos en la ciudad de Moa". ISMMM, Departamento de Geología. Tesis de Maestría.
- Rodríguez R. 2002. Estudio experimental de flujo y transporte de cromo, níquel y manganeso en residuos de la zona minera de Moa (Cuba): influencia del comportamiento hidromecánico. PhD Thesis, University Polytechnic of Catalonia (UPC), Barcelona, España: 1-465. Publicada en <http://www.tdcat.cesca.es/TDCat-0731102-084652/>
- Rodríguez, A. 1998. Estudio morfotectónico de Moa y áreas adyacentes para la evaluación de riesgos de génesis tectónica. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa (Tesis doctoral) 137p.
- Rodríguez, A. 1998a. Estilo tectónico y geodinámico de la región de Moa. *Minería y Geología*, 15(2): 37-41.
- Rodríguez, A. 1998b. Estudio morfotectónico de Moa y áreas adyacentes para la evaluación de riesgos de génesis tectónica. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa (Tesis doctoral) 137p.
- Rodríguez, A. y Sosa, M. 1993. Caracterización química de la lluvia asociada a las ondas tropicales. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, La Habana, Cuba, (21-22): 145-161.
- Rodríguez, R. 2000. Estudio petrológico de las rocas de afinidad ofiolítica portadoras de ilmenita en la zona de Cayo Grande en el macizo Moa-Baracoa. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa (Tesis master) 69p.

- Rodríguez, R. et al. 2004. Distribución y Composición química de las precipitaciones en la región oriental de Cuba. *Boletín Geológico y Minero*, 115, Núm. Especial: 341- 356.
- Rodríguez, R. y Candela, L. 1998. El impacto de la actividad minera y la contaminación de las aguas subterráneas. Moa, Holguín, Cuba. *La Contaminación de las Aguas. Un Problema Pendiente*. (Eds. Samper, J., Sahuquillo, A., Capilla, J.E. y Gómez, J.) Instituto Tecnológico GeoMinero de España, Madrid: 305-311.
- Rodríguez, R. y Téllez, W. 1995. Las precipitaciones en el noreste holguinero y valoración del impacto ambiental. *Congreso Ecología. Camagüey, Cuba*. Libro resumen: 1-6.
- Seguinot Barbosa, J., Batista, J. L. y Sánchez Celada, M. (2008): Evaluación de riesgos por inundaciones en los municipios de carolina y loiza. Puerto Rico. *Geofocus* (artículos) no. 8, p 115-138. ISSN 1578-5152
- Téllez, W. 1995. *Análisis de la pluviometría en el noreste holguinero y algunas consideraciones sobre el impacto ambiental en Moa*. Fondo Geológico, Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba, 1-49.
- Terrero, A.C. 1986. Caracterización de las condiciones hidrogeológicas de la provincia de Holguín. *Minería y Geología*, Ciudad de La Habana, Cuba 2: 19-29.