

BOLETIN DE LA SOCIEDAD GEOLOGICA DEL PERU



Volumen 91

Julio 2001

- Aspectos Físicos de la Alta Montaña en los Andes Peruanos.
- Metodología de Estudio de Impacto Ambiental de una cantera.
- Prevención de la generación de aguas ácidas de mina.
- Análisis de los procesos de ruptura de los sismos ocurridos en 1990 y 1991 en el Valle del Alto Mayo (Moyobamba-Perú).
- Análisis y evaluación del sismo de Calacoa (Omate-Moquegua) del 6 de mayo de 1999 (Mw= 4.0).
- Las Dunas en el litoral del Perú.



© **SOCIEDAD GEOLOGICA DEL PERU, 2001**

All rights reserved. Reservados todos los derechos.

ISSN: 0079 - 1091

Toda la correspondencia relacionada con esta publicación debe ser dirigida al editor responsable:
Sociedad Geológica del Perú, Apartado 2559, Lima 100, Lima-Perú

Impresión: Imprenta Cano S.R.L.

Printed in Peru Impreso en Perú

SOCIEDAD GEOLOGICA DEL PERU

BOLETIN DE LA SOCIEDAD GEOLOGICA DEL PERU Organo Oficial de la Sociedad Geológica del Perú, fundada el 3 de julio de 1924, en Lima

CONSEJO DIRECTIVO DE LA SOCIEDAD GEOLOGICA DEL PERU BIENIO 2000-2001

Presidente	:	Richard Petersen Bluhme
Vice-Presidente	:	René Marocco Chiesa
Secretario	:	Georg Winkelmann Sackmann
Pro-Secretario	:	Carlos Monges Reyes
Tesorero	:	José Lara Paredes
Pro-Tesorero	:	Noel Díaz Bernal
Bibliotecario	:	Javier Jacay Huarache
Vocal Nato	:	Juan Proaño Arias
Vocales	:	César Ardiles Villavicencio
	:	Alejandro Chalco Luna
	:	Miguel Huamán Guerrero
	:	Jorge Injoque Espinoza
	:	José Macharé Ordóñez
	:	Silvia Rosas Lizárraga
	:	Barbara Bruce Ventura
Editor	:	José Macharé Ordoñez
Asistente	:	Sonia Bermúdez Lozano

Colaboraron en el presente número:

Bernard Pouyaud, Rodolfo Ayala, Juana Rosa del Castillo,
César Muñoz, Francisco Rivas y Víctor Benavides

**SOCIEDAD GEOLOGICA DEL PERU
BIENIO 2000-2001**

COMISIÓN DE PUBLICACIONES

José Macharé, Silvia Rosas, Jorge Injoque y Alejandro Chalco

COMISIÓN DE PUBLICIDAD

Georg Winkelmann, Miguel Huamán y Carlos Monges

COMISIÓN DE ACTIVIDADES CIENTÍFICAS

René Marocco, César Ardiles y Jorge Injoque

**COMISIÓN DE ASUNTOS UNIVERSITARIOS Y
CALIFICADORA DE LA MEJOR TESIS**

Silvia Rosas, Alejandro Chalco y Javier Jacay

COMISIÓN DE RELACIONES PÚBLICAS

C.Richard Petersen, Juan Proaño y Carlos Monges

COMISIÓN PRO-LOCAL

Juan Proaño

COMISIÓN DE ADMINISTRACIÓN

Noel Díaz, Barbara Bruce y José Lara

CONTENIDO

1. Aspectos Físicos de la Alta Montaña en los Andes Peruanos Benjamín MORALES ARNAO	7
2. Metodología de Estudio de Impacto Ambiental de una cantera Sofía RAMÍREZ	19
3. Prevención de la generación de aguas ácidas de mina Jorge TOVAR	45
4. Análisis de los procesos de ruptura de los sismos ocurridos en 1990 y 1991 en el Valle del Alto Mayo (Moyobamba-Perú) Hernando TAVERA, Elisa BUFORN, Isabel BERNAL & Yanet ANTAYHUA	55
5. Análisis y evaluación del sismo de Calacoa (Omate-Moquegua) del 6 de mayo de 1999 (Mw= 4.0) Víctor AGUILAR, Hernando TAVERA, Isabel BERNAL, Héctor PALZA & Roberto KOSAKA	69
6. Las Dunas en el litoral del Perú Hanz KINZL	81

Huascarán Norte y Sur visto desde el Este en las nacientes de la Quebrada de Llanganuco.
(ver artículo de Benjamín Morales Arnao).

ASPECTOS FISICOS DE LA ALTA MONTAÑA EN LOS ANDES PERUANOS

Benjamín MORALES ARNAO

Instituto Andino de Glaciología y GeoAmbiente
E-mail: inagga_consult@terra.com.pe

RESUMEN

Este trabajo plantea las particularidades de la Alta Montaña en el Perú, diferenciando en especial la superficie a partir de la cual se consideran las áreas de la Alta Montaña, (entre los 4,000 m.s.n.m y los 6,768 m.s.n.m.), las cuales son de morfología agreste y que se eleva sobre la superficie Puna.

El estudio describe la ubicación de 18 cordilleras de Alta Montaña, distribuidas desde el departamento de Ancash hacia el Sur y Este del Perú. Asimismo, se destacan los tipos de recursos naturales que encierra esta región, destacando los recursos mineros, paisajistas, hídricos y el importante rol del clima en su conformación.

Como un aspecto particular, la Alta Montaña muestra su potencial de recursos hídricos, el preocupante aspecto de la desglaciación, que esta ocasionando la desaparición de importantes volúmenes de recursos hídricos, y las consecuencias negativas en el equilibrio ambiental de las cuencas hidrográficas.

Por último, en cuanto a la vulnerabilidad física, se describen los fenómenos de aluviones de lagunas glaciares y avalanchas de hielo que han causado grandes destrucciones en diferentes lugares del país. Se da cuenta así mismo de las obras de mitigación que se construyeron para proteger y disminuir los daños de estas contingencias.

ABSTRACT.- PHYSIC ASPECTS OF HIGH MOUNTAIN IN THE PERUVIAN ANDES.

This work deals with the particularities of the High Mountain in Perú, focusing on the surface above which the areas of high mountain are considered, (between 4,000 and 6,768 m.a.s.l.), specially with wild morphology that goes over the Puna surface.

This work describes the location of 18 high mountain ranges, distributed from the Ancash department towards the south and east of Perú. It is important to outline the natural resources of this region, where mining, landscape, hydrics highlight.

As a particular aspect, the High Mountain shows high hydric resource potential, but there is a concern about process desglaciation, that is causing the decrease of important hydric resource volumes, and negative consequences in the environment equilibrium of the hydrographic basins.

Finally about physic vulnerability, this paper describes alluvial phenomen a in glacial lakes and ice avalanches, that has caused big destruccions in different places around country. We also show the mitigation work that have been built in order to protect and diminish the damage due to these contingences.

INTRODUCCION

La alta montaña en el Perú está delimitada entre la superficie de rasgos y accidentes geográficos, comprendidos entre los ambientes ecológicos de Puna de los 4000 msnm, hasta las altas cumbres de 6000 y más.

De esta manera, la alta montaña en el Perú se inicia en la Cordillera del Rosco, al Norte del Departamento de Ancash, y sigue en forma discontinua hacia el Sur y Centro, a través de 20 Cordilleras que se ubican en la Cordillera Occidental, Central y Oriental del Perú hasta la frontera con Chile y Bolivia.

La alta montaña se caracteriza por tener un ecosistema sensitivo y propenso a la ocurrencia de situaciones climáticas extremas y catástrofes naturales. Ellas son zonas de conflictos de intereses entre el desarrollo económico y la conservación ambiental.

Las regiones de alta montaña tienen un rol preponderante en el ciclo hidrológico, siendo la fuente u origen de los mayores sistemas de ríos como el Marañón, Ucayali, Madre de Dios, y en la cuenca del Titicaca los ríos Azangaro y Suches.

Las variaciones de temperatura y precipitación, modifican la situación y distribución de la vegetación, del

hielo, nieve y zonas de “permafrost” que impactarán al medio ambiente montañoso, perturbando a la estructura socio económica existente en los habitantes de montaña, y a las poblaciones que viven fuera de ellas.

Las regiones de alta montaña juegan un rol significativo para las economías locales y globales a causa de los recursos hídricos, mineros, del potencial hidroeléctrico y turístico.

FORMACION DE LAS MONTAÑAS

En el Mioceno, en un período de fluctuaciones entre los 25 a 12 millones de años, se tuvo en la superficie terrestre un estado de peneplanización general del continente, y a partir de esta etapa, durante el Plioceno Pleistoceno, se inicia el levantamiento generalizado del continente y el inicio de la formación de las montañas.

Este levantamiento se produjo por pulsos alternados que motivaron elevaciones de la corteza diferentes, de hasta cientos de metros, con períodos de calma donde se producían erosiones y se formaban terrazas.

Estos levantamientos diferenciales estarían relacionados a la interacción de las placas de Nazca y la Sudamericana, que debido a estos fenómenos y a través de movimientos de tipo tectónico y de fallas geológicas, ocasionaron el levantamiento de los Andes Peruanos en más de 3000 metros, a partir de la superficie de erosión general de peneplanización, que podrían haber estado entre los 1000 a 1500 metros de altura. Con este proceso de levantamiento general, se alcanzaron alturas de unos 4000 metros, habiendo algunos bloques que se levantaron por efectos tectónicos unos más que otros, formándose así montañas más elevadas como las Cordilleras, Blanca, Huayhuash, Vilcanota y otras que sobrepasaban en más de 2000 metros a la superficie de Puna.

MODELAMIENTO GEOMORFOLÓGICO

Las altas montañas andinas, en su proceso de formación hasta el presente, han estado expuestas a una serie de efectos internos por influencia de la geodinámica interna, a través de movimientos tectónicos que modificaban el relieve terrestre por efectos de fallas geológicas, produciendo levantamientos o hundimientos de la cordillera, o por efectos externos de la meteorización a través de los agentes de las temperaturas, de las lluvias, de los glaciares, del viento y de la escorrentía fluvial, que en forma permanente actúan y modelan en forma continua el relieve de la alta montaña.

La característica principal de la alta montaña, es la presencia de la gran diversidad de formas que la adornan, siendo lo más impactante la presencia de profundos valles glaciares flanqueados por paredes laterales de inclinaciones de alto ángulo, que se elevan pasando la visión de las nubes.

Ejemplos famosos son las quebradas de Llanganuco, Parón, Santa Cruz en la Cordillera Blanca,

donde el fondo del valle está a unos 3800 msnm, y sus cumbres glaciares están casi 3000 metros sobre ellas. Igual situación podemos apreciar en las Cordilleras de Huayhuash, Central, Ampato, Vilcanota y Apolobamba en el Sur del País.

Como resultado de los agentes modeladores del terreno, se tienen los siguientes tipos de paisaje:

- Superficie Puna
- Mesetas
- Valles Glaciares
- Portadas de quebradas glaciares
- Valles en forma de U
- Valles colgados o suspendidos
- Circos Glaciares
- Aristas y picos piramidales
- Lagunas Glaciares
- Morrenas Glaciares
- Depósitos Fluvio Glaciares
- Sedimentos Varvados

Los períodos de glaciaciones e interglaciaciones del Cuaternario se reflejan en la morfología y en los depósitos sedimentarios fluviales y glaciares. Las áreas glaciares muestran formas diferenciadas. Así, de los últimos avances glaciares, se observan las morrenas laterales y frontales con sus propias características, casi sin disturbación. En cambio las morrenas más antiguas han sido erosionadas y arrasadas.

Las caídas de aludes pueden alcanzar gran importancia cuando descienden por los valles arrastrando y arrasando todo lo que se encuentre en su trayectoria, incorporando bloques y otros sedimentos de diferentes tamaños, fundiéndose el hielo y transformándose en lo que se ha denominado un alud-aluvión. Uno de estos que descendió desde el Nevado del Huascarán por la quebrada del Acraranco, destruyó Yungay, en el terremoto del 31 de mayo de 1970. Otro alud-aluvión descendió por el valle del río Ahobamba (Cusco), produciendo el embalse del río Vilcanota y la inundación de la Central Hidroeléctrica de Machupicchu.

LAS CORDILLERAS PERUANAS Y SU DISTRIBUCIÓN EN ÁREAS GLACIARES

* Cordilleras Del Norte:

Cordillera Blanca:

Ubicación: Departamento de Ancash.
8°08' – 10°02' Latitud Sur
77°09' – 77.53' Longitud Oeste

Longitud: 180 Km.

Superficie Área Glaciar: 611.48 Km².

Pico más alto: Huascarán 6768 msnm

Nº Lagunas Glaciares: 267

Mas de 60 cumbres sobre los 6,000 msnm

Cordillera Huayhuash:

Ubicación: Departamentos Ancash y Huánuco

10°12' – 10°27' Latitud Sur
76°42' – 77°00' Longitud Oeste
Longitud: 35 Km.
Superficie Área Glaciar: 71.68 Km²

Cordillera Huallanca:

Ubicación: Departamento: Ancash y
Huánuco
9°52' – 10°03' Latitud Sur
76°58' – 77°04' Longitud Oeste
Longitud: 19 Km.
Superficie Área Glaciar: 17.64 Km².

Cordillera Raura:

Ubicación: Departamentos: Huánuco,
Pasco y Lima
10°21' – 10°42' Latitud Sur
76°39' – 76°52' Longitud Oeste
Longitud: 22 Km.
Superficie Área Glaciar: 28.92 Km².

*** Cordilleras Del Centro**Cordillera La Viuda:

Ubicación: Departamento: Lima - Junín
10°33' – 11°38' Latitud Sur
76°09' – 76°42' Longitud Oeste
Longitud: 100 Km.
Superficie Área Glaciar: 14.99 Km².

Cordillera Central:

Ubicación: Departamentos: Lima y Junín
11°39' – 12°37' Latitud Sur
75°30' – 76°20' Longitud Oeste
Longitud: 60 Km.
Superficie Área Glaciar: 79.32 Km².

Cordillera Huaytapallana:

Ubicación: Departamento: Junín
11°35' – 11°58' Latitud Sur
74°48' – 75°17' Longitud Oeste
Longitud: 71 Km.
Superficie Área Glaciar: 37.57 Km².

Cordillera Chonta:

Ubicación: Departamento: Huancavelica-Ica
12°36' – 13°13' Latitud Sur
75°00' – 76°00' Longitud Oeste
Longitud: 90 Km.
Superficie Área Glaciar: 9.35 Km².

*** Cordilleras Del Sur Este**Cordillera Vilcabamba:

Ubicación: Departamento: Cuzco
13°15' – 13°34' Latitud Sur
72°21' – 72°56' Longitud Oeste
Longitud: 90 Km.
Superficie Área Glaciar: 25.66 Km².

Cordillera Urubamba:

Ubicación: Departamento: Cuzco
13°08' – 13°15' Latitud Sur
72°00' – 72°27' Longitud Oeste
Longitud: 40 Km.
Superficie Área Glaciar: 28.21 Km².

Cordillera Vilcanota:

Ubicación: Departamento: Cuzco y Puno
13°45' – 14°05' Latitud Sur
70°45' – 71°20' Longitud Oeste
Longitud: 120 Km.
Superficie Área Glaciar: 375.75 Km².

Cordillera La Raya:

Ubicación: Departamento: Puno y Cuzco
14°20' – 14°34' Latitud Sur
70°57' – 71°02' Longitud Oeste
Longitud: 10 Km.
Superficie Área Glaciar: 7.66 Km².

Cordillera Carabaya:

Ubicación: Departamento: Puno
13°34' – 14°27' Latitud Sur
69°38' – 70°47' Longitud Oeste
Longitud: 150 Km.
Superficie Área Glaciar: 70.88 Km².

Cordillera Apolobamba:

Ubicación: Departamento: Puno
14°25' – 14°44' Latitud Sur
69°13' – 69°32' Longitud Oeste
Longitud: 40 Km.
Superficie Área Glaciar: 55.16 Km².

*** Cordilleras Del Sur Oeste**Cordillera Huanzo:

Ubicación: Departamento: Arequipa y
Ayacucho - Apurímac
14°18' – 14°59' Latitud Sur
72°11' – 72°34' Longitud Oeste
Longitud: 50 Km.
Superficie Área Glaciar: 25.11 Km².

Cordillera Ampato:

Ubicación: Departamento: Arequipa-Ayacucho
15°13' – 15°50' Latitud Sur
71°41' – 72°27' Longitud Oeste
Superficie Área Glaciar: 99.78 Km².

Cordillera Chila:

Ubicación: Departamento: Arequipa
15°19' – 15°31' Latitud Sur
71°39' – 72°13' Longitud Oeste
Longitud: 70 Km.
Superficie Área Glaciar: 23.05 Km².

* Cordillera Oriental

Cordillera Huagoruncho:

Ubicación: Departamento: Pasco
 10°29' – 10°34' Latitud Sur
 75°50' – 76°01' Longitud Oeste
 Longitud: 27 Km.
 Superficie Área Glaciar: 13.38 Km².

EL CLIMA Y SU INTERACCION CON EL MEDIO AMBIENTE DE ALTA MONTAÑA

Clima de Alta Montaña

El Clima de la Alta Montaña, presenta características especiales, que teniendo un clima de tipo extremo casi polar, simultáneamente nos ofrece condiciones bastante homogéneas en su comportamiento permanente, donde priman más las variaciones térmicas diarias que las estacionales. Los cambios de temperatura extrema entre el día y la noche, le confiere las características fundamentales a sus condiciones de vida y desarrollo.

En forma diaria se pueden tener variaciones de temperatura entre la máxima y la mínima de hasta 45° en ciertos lugares del altiplano, como la Estación Vincocaya del ferrocarril Arequipa-Juliaca; condiciones extremas que contribuyen inclusive a la destrucción y erosión de la alta montaña, por la meteorización profunda y continua que se producen en las formaciones rocosas.

La alta montaña es dominio de las intensas tormentas eléctricas con fuertes vientos que producen en el ambiente un ruido peculiar: "el viento silva en las punas". Por otra parte, las precipitaciones bajo la forma de nieve y lluvia, pueden ser mayores a los 1,000 mm en las Cordilleras del Centro y Norte, y algo menores en las Cordilleras del Sur.

- Características Principales del Clima:
- Fuerte insolación durante todo el año
- Temperaturas positivas al medio día aún en las cumbres más altas.
- Gran sequedad de la atmósfera
- Presión atmosférica muy baja
- Tormentas eléctricas intensas en época de lluvias
- Transparencia del ambiente
- Disminución de la cantidad de oxígeno
- Disminución violenta de la temperatura con la puesta del sol.

En los Andes Centrales, la Isotherma 0°C está, según la exposición y el relieve, entre los 5200 y 5300 msnm, y juegan un rol importante en la cobertura glaciar de la montaña.

El límite del gel nocturno, aún durante el invierno, se encuentra hacia los 4800 msnm, y es el ambiente activo de los procesos periglaciares. La Alta Montaña es el dominio de los procesos glaciares actuales y periglaciares.

En relación a las temperaturas y precipitaciones, hay que tener en cuenta la diferencia de temperaturas entre el sur del país (Puno) y el Centro y Norte. Las temperaturas menores a -12°C antes del amanecer son raras, sin embargo en el altiplano la temperatura desciende a -20°C en Junio, llamada época de las heladas.

En las cuencas Piloto de Yanamarey y Uruashraju a alturas sobre 4700 msnm, se tienen registros de los últimos años, que muestran los datos de temperatura como se muestran en los cuadros anexos.

Tomando como referencia la estación meteorológica de Querococha, ubicada a 4100 metros de altura en el tramo sur de la Cordillera Blanca, se ha encontrado por el registro de 30 años entre 1965 a 1994, que la temperatura mínima tiene una tendencia al calentamiento del orden de 0.0252 °C/año ó 0.252°C/década (P.Lagos. Gráfico anexo); y la temperatura media un ligero calentamiento a razón de 0.0012°C/año ó 0.012°C/década. En relación a la temperatura máxima, presenta una ligera tendencia al enfriamiento a razón de 0.0108°C/año ó 0.108°C/década.

Precipitaciones

En cuanto a la situación de las precipitaciones de Alta Montaña, podemos indicar por la observación efectuada en los últimos 40 años, que las precipitaciones estarían disminuyendo, sin embargo es necesario efectuar un análisis más detallado.

Como se había indicado, las precipitaciones de la Alta Montaña son bajo la forma de lluvias hasta la altura de 4800 a 5100 msnm, y se presentan en forma de nieve por encima de esa cota.

Por otro lado las precipitaciones son mayores en el Centro y Norte del orden de 900 a 1000 mm/año, a diferencia de las del Sur donde se tienen valores mucho menores del orden de 400 a 700 mm/año.

En la estación de Uruashraju a 4692 msnm, podemos observar las precipitaciones hasta 1,451 mm.

Escorrentía - Caudales

La medición de 3 estaciones de la cuenca del río Santa, entre el período de 1953 a 1993, muestra una tendencia a la disminución de los caudales, lo que sugiere que las precipitaciones sólidas y su contribución a los glaciares, pudieron haber disminuido durante este período.

En los 2 últimos años, investigadores glaciólogos de la Universidad de Innsbruck, como el Dr. Georg Kaser el equipo del IRD con los Drs. Francou y Pouyand y otros, han iniciado un proyecto de investigaciones en los glaciares de la Cordillera Blanca sobre mediciones meteorológicas, habiendo corroborado del resultado de los estudios anteriores, que las temperaturas están aumentando, lo que contribuye a una mayor fusión de los glaciares.

CUADRO Nº 1
RESULTADOS DEL MONITOREO GLACIAR 1968-1997

Glaciares	Años de Monitoreo	Total de Área Glaciar Km ²	Altitud Línea de Equilibrio m.s.n.m.	Balace Anual x 10 ⁶ m ³	Reducción Área en Km ²	Reducción Volumen m ³	Retroceso Glaciar (m)	Coficiente Actividad db/dz	Precipitación mm
Safuna	1968-1975	4,690 (1968)	5.024,0 (Año 1975)	-4,902 (Año 1975)				1,77	1.260 (1975)
Broggi	1968-1997	0,580 (1972)	5,100 (1997)		0,530 (1972-1997)	29.000.000 (1972-1997)	765,80 (49 años)		
Uruashraju	1968-1997	2,084 (1980)	5.085,0 (1988)	-2,896 (1988)	0,319 (1980-1997)	36.160.000 (1980-1997)	606,40 (1948-1997)	3,62	1.302 (1992)
Yanamarey	1972-1997	1,35 (1962)	5.024,0 (1997)	-0,983 (1996)	0,653 (1962-1997)	63.450.000 (1962-1997)	521,90 (1948-1997)	2,13	2.037 (1994)
Santa Rosa	1977-1997	2,360 (1962)	4.914,0 (1997)	- 0,632 (1996)	0,255 (1962-1997)	59.787.000 (1962-1997)	525,00 (1962-1997)	3,57	

DESGLACIACIÓN ANDINA

Monitoreo de Glaciares

Con el objeto de conocer las variaciones glaciares como resultado de la desglaciación andina, se han efectuado en el Perú desde 1968, balances de masas de cuatro glaciares piloto en las Cordillera Blanca y Raura ubicados al norte de Lima.

El balance de masas contrasta la acumulación de precipitación (nieve) con la fusión de hielo, para medir el grado de avance (acumulación mayor que fusión o balance positivo) o de retroceso (fusión mayor que acumulación o balance negativo) de un glaciar.

Siguiendo la metodología usada por el Instituto de Hidrología y Glaciología del Politécnico Federal de Zurich, en Abril de 1968 la Corporación Peruana del Santa, entidad eléctrica estatal, inicia las investigaciones piloto de monitoreo de glaciares en las siguientes lenguas glaciares:

- Glaciar Safuna en la cuenca glaciar norte del nevado Pucahirca al norte de la Cordillera Blanca con un área de 4,69 Km².
- Glaciar Broggi en la cabecera de la quebrada de Llanganuco con un área de 0,580 Km².
- Glaciar Uruashraju en la cabecera del río Olleros al sur de la Cordillera Blanca con un área de 2 090 Km².
- Glaciar Yanamarey en la cuenca de la laguna Querococha al sur de la Cordillera Blanca con un área de 1,35 Km².
- Glaciar Santa Rosa en la cuenca del río Quichas en el

extremo sur de la Cordillera Raura con un área de 2,35 Km².

Para determinar el balance de masas entre 1968 y 1997, se han efectuado dos veces al año las mediciones de ablaciones glaciares (fusión de hielo por el calor), retrocesos glaciares, movimientos de los glaciares, precipitación – temperatura, y levantamientos topográficos (control retroceso-movimiento).

Los resultados obtenidos a través del monitoreo glaciar de los cinco glaciares piloto, se encuentran en el Cuadro Nº1 y Figura 3.

A partir de los estudios realizados se indican las siguientes consideraciones:

1. A nivel de las cordilleras tropicales del mundo, el Perú fue el primer país donde se iniciaron las investigaciones glaciológicas, teniendo los récords más antiguos.
2. En todas las lenguas glaciares estudiadas, se encuentra un balance negativo o pérdida de masas de hielo importante cuya progresión es bastante similar, pudiéndose indicar notables balances negativos en los años 1978-1979, 1982-1983 y 1987-1988. Sin embargo, se han encontrado balances positivos con pequeñas crecientes del frente glaciar en los años 1974-1975 en los glaciares del Uruashraju y Yanamarey.
3. En la estación 1997-1998, se ha encontrado una menor precipitación de nieve y una mayor caída de lluvias, aún sobre la cota 5000, lo que ha contribuido a una mayor fusión de los glaciares coincidente con “El Niño”.
4. La reducción de las áreas glaciares ha sido de gran importancia:
 - El glaciar Broggi en 25 años ha reducido su superficie

en más del 86%

- El glaciar Uruashraju en 17 años ha reducido su superficie en más del 16%
- El glaciar Yanamarey en 35 años ha reducido su superficie en más del 48%
- En los últimos 5 años el retroceso glaciar se ha incrementado notablemente, acelerándose el proceso a partir de la década de los 80 en que éste se dio a un ritmo que triplicaba el retroceso de años anteriores.

Por efecto de los balances negativos medidos en cuatro glaciares monitoreados, se han perdido, en un lapso de 17 a 50 años, más de 188 millones de m³ de reservas de agua que dejarán de aportar recursos hídricos a la cuenca del Santa y Huaral (cuadro N° 1, Figuras 2 y 3).

LOS RECURSOS DE ALTA MONTAÑA

Como se ha indicado en la introducción, la alta montaña, es una zona ecológica de conflicto por el uso y explotación de los variados recursos que guarda, pudiéndose priorizar los siguientes:

El Agua – Los Glaciares

Sin lugar a dudas que el agua bajo las distintas formas en que se encuentran, ya sea como ríos, arroyos, lagunas o reservas de agua en estado sólido en los campos glaciares, es el más valioso de los recursos, sobre todo en un país sediento con crecientes necesidades hídricas.

Todos los ríos que drenan sus aguas hacia las cuencas del Pacífico, Atlántico o Títicaca, nacen en la alta cordillera, y su extensión y persistencia es aún más apreciada en la época de sequía, donde sólo perduran los cursos de agua en las cuencas hidrográficas que tienen áreas glaciares en los picos más altos.

El Paisaje

Este es un recurso natural poco explotado aún, sin duda de mayor potencial para las regiones que tienen altas montañas, la mayoría de las cuales son desconocidas aún por sus habitantes y el resto del país y del extranjero.

Difícilmente habrá países del mundo con mayores posibilidades del turismo de aventura en Alta Montaña a lo largo y ancho de las 20 cordilleras, que muestra una extraordinaria diversidad de ambientes y paisajes con su diversa morfología.

Tenemos todavía cordilleras de Alta Montaña casi desconocidas, como las Cordilleras Chonta, Huanzo y Chila al sur del país, y aún las cordilleras de Vilcabamba, Vilcanota, Carabaya y Apolobamba, en el sur del país; cordilleras que esperan la visita de viajeros, que con seguridad se incrementarán con el tiempo y serán el soporte largo y continuado de viajeros excursionistas tipo Trekking en busca de la naturaleza aún no mancillada, y que será el gran soporte económico del Ecoturismo o Turismo de la Naturaleza o Aventura.

Los Yacimientos Mineros

La fama y tradición del Perú como país minero, viene desde tiempos muy antiguos, cuando las primeras culturas indígenas comenzaron a explotar los muy variados yacimientos mineros de las altas cumbres de la Cordillera de los Andes.

A lo largo y ancho de la alta cordillera, se tienen en explotación diversas minas con contenidos minerales de alta ley. Don Antonio Raimondi, a través de sus esforzados relatos de explorador incansable, pone en evidencia riquísimos yacimientos que ahora se están explotando cada vez en mayor volumen, y con mejor recuperación.

La minería ha sido siempre sinónimo de contaminador, y es recién a partir de los últimos años de la década del 90, con el apoyo de la tecnología, en especial canadiense, se ha implementado normas y reglamentos que obligan a la actividad minera a trabajar con observancia del desarrollo sostenible, y el cuidado del medio ambiente.

En los últimos años, en nuestro país se está implementado en forma más responsable, tanto por parte de la actividad privada como de la parte del control central, mayor conciencia proteccionista de la calidad del medio ambiente, cosa que debemos todos tomarlas como una misión propia para el mantenimiento de mejores condiciones de vida.

Los Bosques y su distribución

La flora de alta montaña, es abundante con gran variedad de plantas propias de altura, encontrándolas aún sobre los 5000 metros de altitud. Las hermosas flores que adornan este severo paisaje tiene también diversas plantas de tipo medicinal.

Sin embargo, considero importante resaltar la presencia de los bosquecillos o relictos de la Puya Raymondí, inflorescencia que crece en colonias, en especial en laderas que contienen rocas sedimentarias ácidas con orientaciones geográficas específicas, que hacen posible la existencia de estas inflorescencias de hasta 10 metros de alto con más de 8000 flores blancas, que crecen a más de 4000 metros de altura en valles glaciares en taludes abrigados del viento.

Otras plantas hermosas, son los bosques de quenuales o polylepis que crecen en los taludes de conos coluviales, como bosques tupidos en valles glaciares a unos 4000 a 4700 metros de altura.

El Hombre

El habitante de la alta montaña es como un super hombre de cualidades físicas extraordinarias, capaz de realizar las labores más extremas en forma rutinaria y sin mostrar síntomas de cansancio y fatiga como tantas veces hemos constatado en trabajos civiles de desagüe de lagunas, en minería o en difíciles ascensiones de cumbres glaciares.

En este punto recordemos las primeras expediciones que estos hombres de alta montaña efectuaron a los Montes Huascarán y Aconcagua, que fueron vencidas en 1953 y 1957 en forma por demás rápida y fácil, debido a esas condiciones físicas excepcionales.

VULNERABILIDAD FÍSICA DE ALTAS MONTAÑAS

Los mayores desequilibrios que afectan a las cuencas hidrográficas, son producidos en la alta montaña por efecto de los cambios climáticos que aceleran la reducción de las áreas glaciares, y por ende la disminución de los recursos hídricos, y por otro lado las grandes remociones de masas causadas por avalanchas de hielo, aluviones o huaycos de carácter destructivo.

Disminución de Recursos Hídricos – Desglaciación

Por el monitoreo de 4 glaciares piloto efectuados en la Cordillera Blanca durante más de 27 años y el inventario de las cordilleras glaciares efectuadas en los años 1970 y 1998, se ha encontrado que se ha tenido una reducción integral de aproximadamente 411 Km² de superficies glaciares en el Perú, estimándose que se han perdido 11.303'220,000 millones de metros cúbicos de

hielo, lo que significa un menor aporte de agua a los ríos que drenan las cuencas hidrográficas.

Esta situación y su tendencia creciente en el futuro, tal vez sea el aspecto más grave que afectaría al aprovisionamiento de agua para el consumo urbano, industrial y agrícola del país.

Primer Inventario de Glaciares (1962 – 1970)

Con ocasión del II Congreso Nacional de Geografía, realizado en Arequipa en 1964, se hace conocer por primera vez la existencia de 20 cordilleras glaciares distribuidas entre los paralelos 8° y 18° Sur.

Durante el desarrollo del Decenio Hidrológico Internacional (1965 – 1974), bajo los auspicios de la UNESCO, el Comité Peruano propuso la realización del inventario de glaciares del Perú, iniciándose en 1966 las observaciones de los glaciares de la Cordillera Blanca. En 1978 se inicia en el Perú el inventario de glaciares de 18 cordilleras auspiciado por el Instituto de Geología y Minería, para lo cual concreta un convenio de cooperación técnica con el Secretariado Técnico Temporal para el Inventario Mundial de Glaciares con sede en Zurich – Suiza.

Siguiendo los procedimientos y técnicas establecidas por el Secretariado Técnico Temporal para el Inventario Mundial de Glaciares, se efectúa el inventario

CUADRO Nº 2

NOMBRE CORDILLERA	INVENT.1962 -1970		INVENTARIO IMÁGENES SATELITE - 1997				TOTAL VOLUMEN
	TOTAL	TOTAL	REDUCCION	REDUC. TOTAL	REDUC.%	REDUCCION EN	
	AREA	VOLUMEN ESTIMADO	ESTIMADA	ESTIMADA	EN AREA	VOLUMEN ESTIMADO	
1	Km ²	Millones m ³	Km ²	Km ²		Millones de m ³	Millones de m ³
	2	3	4	5	6	7	8
CORDILLERA BLANCA	723,37	22.604,863	-111,89	611,48	-15,46	-3414,496	19190,367
CORDILLERA HUALLANCA	20,91	432,536	-3,27	17,64	-15,64	-67,649	364,887
CORDILLERA HUAYHUASH	84,97	2474,462	-13,29	71,68	-15,64	-387,006	2087,456
RAURA	55,2	1337,290	-26,28	28,92	-47,6	-636,550	700,740
LA VIUDA	28,60	426,083	-13,61	14,99	-47,6	-202,816	223,267
CENTRAL	116,65	2535,954	-37,33	79,32	-32,0	-811,505	1724,449
HUAGORUNCHO	23,40	401,652	-10,02	13,38	-42,8	-171,907	229,745
HUAYTAPALLANA	59,08	1146,728	-21,51	37,57	-36,4	-417,409	729,319
CHONTA	17,85	255,009	-8,50	9,35	-47,6	-121,384	133,625
AMPATO	146,73	5123,254	-46,95	99,78	-32,0	-1639,441	3483,813
VILCABAMBA	37,74	721,058	-12,08	25,66	-32,0	-230,739	490,319
URUBAMBA	41,48	784,548	-13,27	28,21	-32,0	-251,055	533,493
HUANZO	36,93	598,824	-11,82	25,11	-32,0	-191,624	407,200
CHILA	33,89	578,816	-10,84	23,05	-32,0	-185,221	393,595
LA RAYA	11,27	156,708	-3,61	7,66	-32,0	-50,147	106,561
VILCANOTA	418,43	12000,047	-42,68	375,75	-10,2	-1224,005	10776,042
CARABAYA	104,23	1955,624	-33,35	70,88	-32,0	-625,800	1329,824
APOLOBAMBA	81,12	2107,709	-25,96	55,16	-32,0	-674,467	1433,242
TOTAL 18 CORDILLRS.	2041,85	55641,165	-446,248	1595,60		-11303,220	44337,945

de 18 cordilleras peruanas, utilizando como fuente de información las fotografías aéreas tomadas en los años 1962 y 1972. El procedimiento para la recopilación de informaciones fue el recomendado por esa misma institución. Se utilizó la fotointerpretación con estereoscopio de espejos, y la transferencia de los límites de cada unidad glaciar al mapa a escala 1:25000.

En este inventario no se pudo completar el relevamiento integral de las 20 cordilleras del país por la falta de recubrimiento aéreo fotográfico de las Cordilleras Vilcabamba, Volcánica y Barroso.

Los resultados obtenidos en este inventario se muestran en el Cuadro N° 1, con un total de 3,044 glaciares y un área de 2,041.85 Km² a 1970.

Inventario de Glaciares por Imágenes de Satélite de 1997

La evidencia demuestra el rápido deterioro de las masas de hielo de las Cordilleras Blanca y Raura, sobre todo en la última década donde el retroceso de los frentes se ha triplicado.

Glaciares de pequeña extensión que no poseen una gran cuenca de alimentación, están en proceso de franca desaparición. Sólo aquellos de mayores dimensiones con cuencas de acumulación amplias y a gran altura, aún subsisten y pueden tener todavía largos años de existencia.

Dada la gran influencia de los cambios climáticos globales en los glaciares, y teniendo en cuenta que el primer inventario nacional fue efectuado con informaciones de más de 28 años, se tomó la decisión de efectuar un inventario actualizado, utilizando imágenes del satélite Landsat de los años 1995 – 1997.

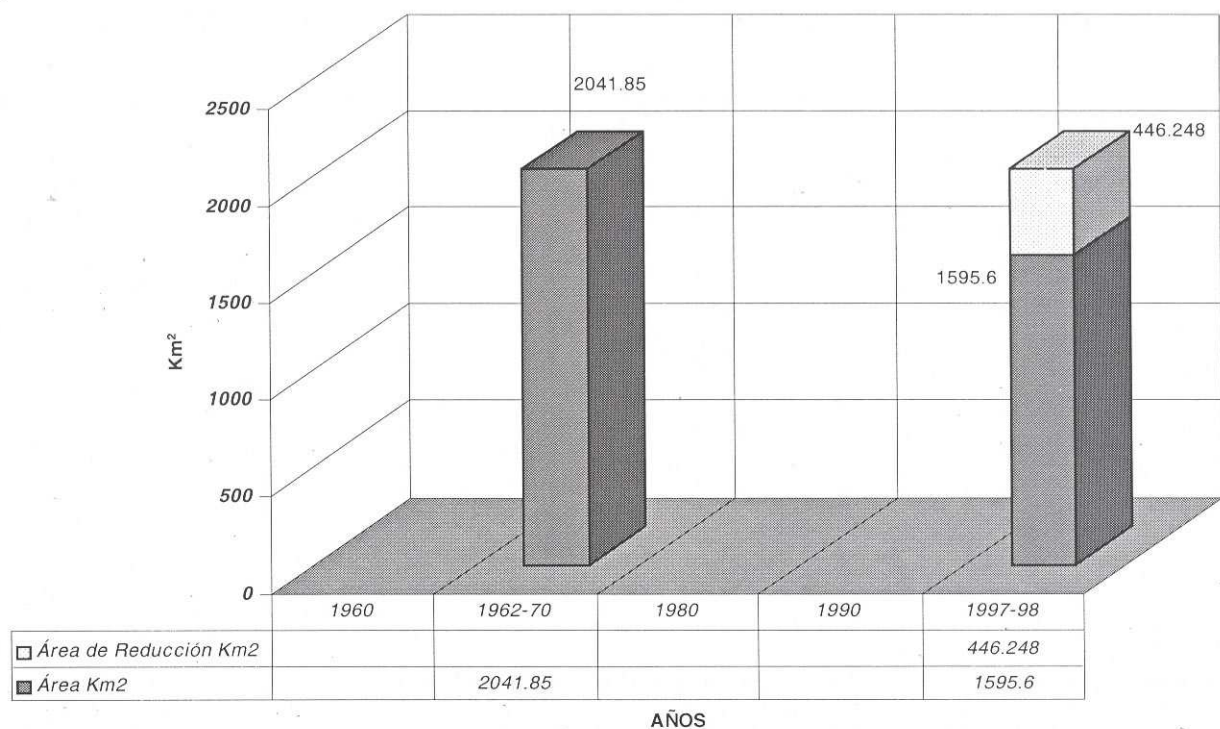
Para este trabajo se han escogido las principales cuencas glaciares de las siguientes cordilleras: Cordillera Blanca, Cordillera Raura, Cordillera Central, Cordillera Huaytapallana, Cordillera Oriental: Huagoruncho y Cordillera Vilcanota.

En el cuadro N° 1 se presentan los resultados de la comparación de los inventarios realizados sobre la base de fotografías aéreas de 1962 – 1970, con el inventario efectuado con imágenes de satélite de los años 1995 y 1997. Tomando como referencia los porcentajes de disminución de áreas glaciares encontradas en las cuencas hidrográficas de cada una de estas cordilleras, y extendiendo estos porcentajes por similitud de dimensiones hacia las otras cordilleras glaciares del Perú, adelantamos una estimación global de la disminución de superficies y volúmenes de las 18 cordilleras que se midieron en el Primer Inventario de 1962 – 1970.

El resultado de esta estimación de nuevas áreas glaciares, está indicada en el cuadro N° 2 y figuras 1 y 2. De los resultados obtenidos podemos hacer los siguientes comentarios:

FIGURA N° 1

**REDUCCION EN AREA 18 CORDILLERAS EN 27 AÑOS
REDUCCION EN 21.85%**



- La magnitud de la disminución de áreas glaciares está en razón inversa a la altitud y magnitud de las cordilleras. Las cordilleras más extensas y altas como la Blanca, Huayhuash y Vilcanota, tienen una reducción de su superficie del orden del 10% al 15%.
- Las cordilleras menos altas y extensas presentan una reducción de sus áreas glaciares con magnitudes preocupantes del orden del 30% al 47%. Es el caso de todas las cordilleras del país excepto las indicadas anteriormente.
- Una de las consecuencias de esa disminución de áreas glaciares es la formación de lagunas, lo cual influye decisivamente en la vulnerabilidad física por la ocurrencia de aluviones y avalanchas de hielo de carácter catastrófico, que ya han afectado en diferentes oportunidades a nuestro país.

En algunas cuencas glaciares, como la del río Quillcay en la ciudad de Huaraz, se ha podido observar a simple vista lo significativo de las variaciones de los glaciares, por la desaparición de la cobertura de hielo de la mayoría de cumbres que se encuentran en la parte este de la ciudad.

También algunas cuencas específicas han tenido un tratamiento independiente, tales como la del río Shullcas en la Cordillera Huaytapallana, la cuenca del río Yuracmayo afluente del río Rímac en la Cordillera Central,

y el glaciar Quelcaya en la Cordillera Vilcanota, cuyas variaciones en área y porcentaje se muestran en el cuadro N° 2.

Avalanchas de Hielo

En el año 1962 el Pueblo de Ranrahirca fue destruido con 4000 muertos, y en 1970 se produjeron desde el nevado Huascarán Norte, las mayores catástrofes de origen glaciar en la historia de la humanidad. En el año 70 fue destruida y sepultada en sólo 4 minutos la ciudad de Yungay con sus 25,000 habitantes, continuando el aluvión del Huascarán por más de 200 Km hasta el Océano Pacífico, destruyendo toda la infraestructura eléctrica, vías de comunicación carrozable y férreas que tenía a su paso como los poblados y campos de cultivo.

Este fenómeno tipo Huascarán, es un fenómeno imposible de controlar por la magnitud de la masa en movimiento; por otro lado es un fenómeno que la naturaleza presenta en forma amenazadora no sólo en el Huascarán y otros picos, sino también en cordilleras del Cuzco como Vilcabamba, que hace un par de años el aluvión del río Aobamba caído del Salcantay, represó el río Vilcanota inundándose la Central Hidroeléctrica de Macchupicchu. Dos años antes del Sacsarayoc cayó el aluvión que destruyó en Santa Teresa la vía férrea.

FIGURA N° 2

**REDUCCION EN AREA DE LA CORDILLERA BLANCA EN 27 AÑOS
REDUCCION EN 15.46%**

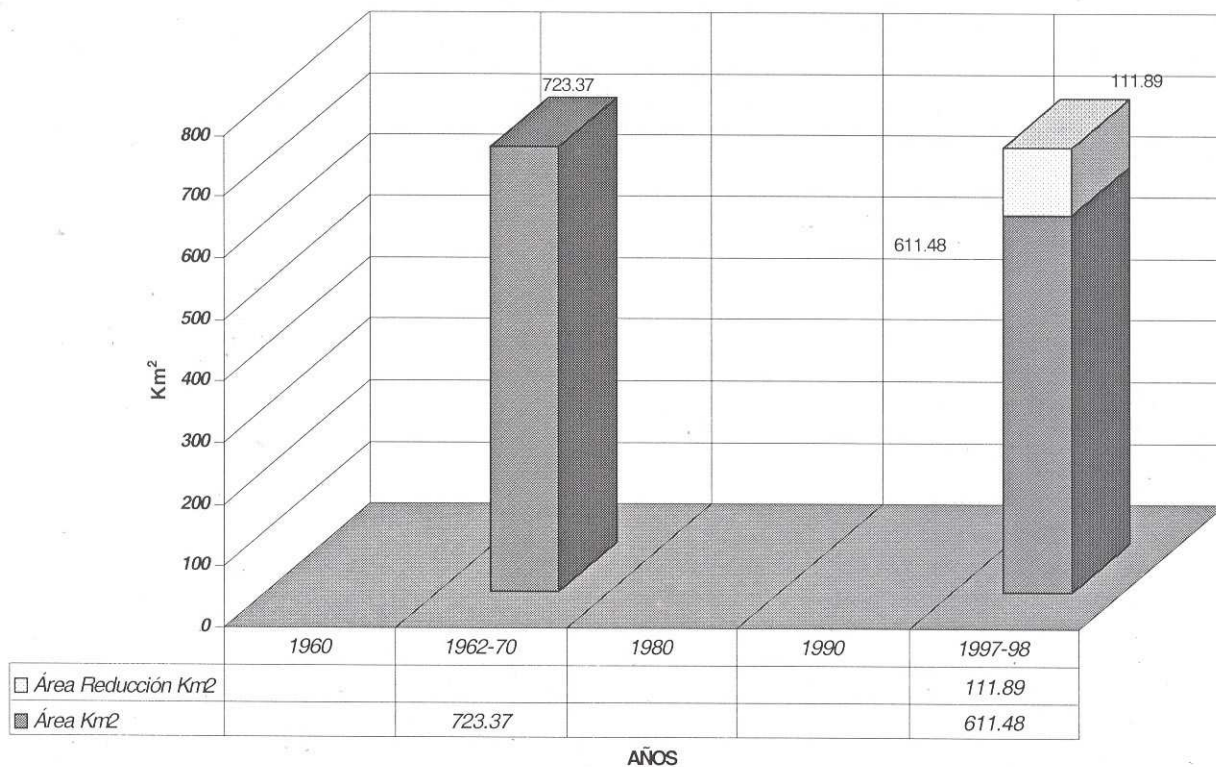
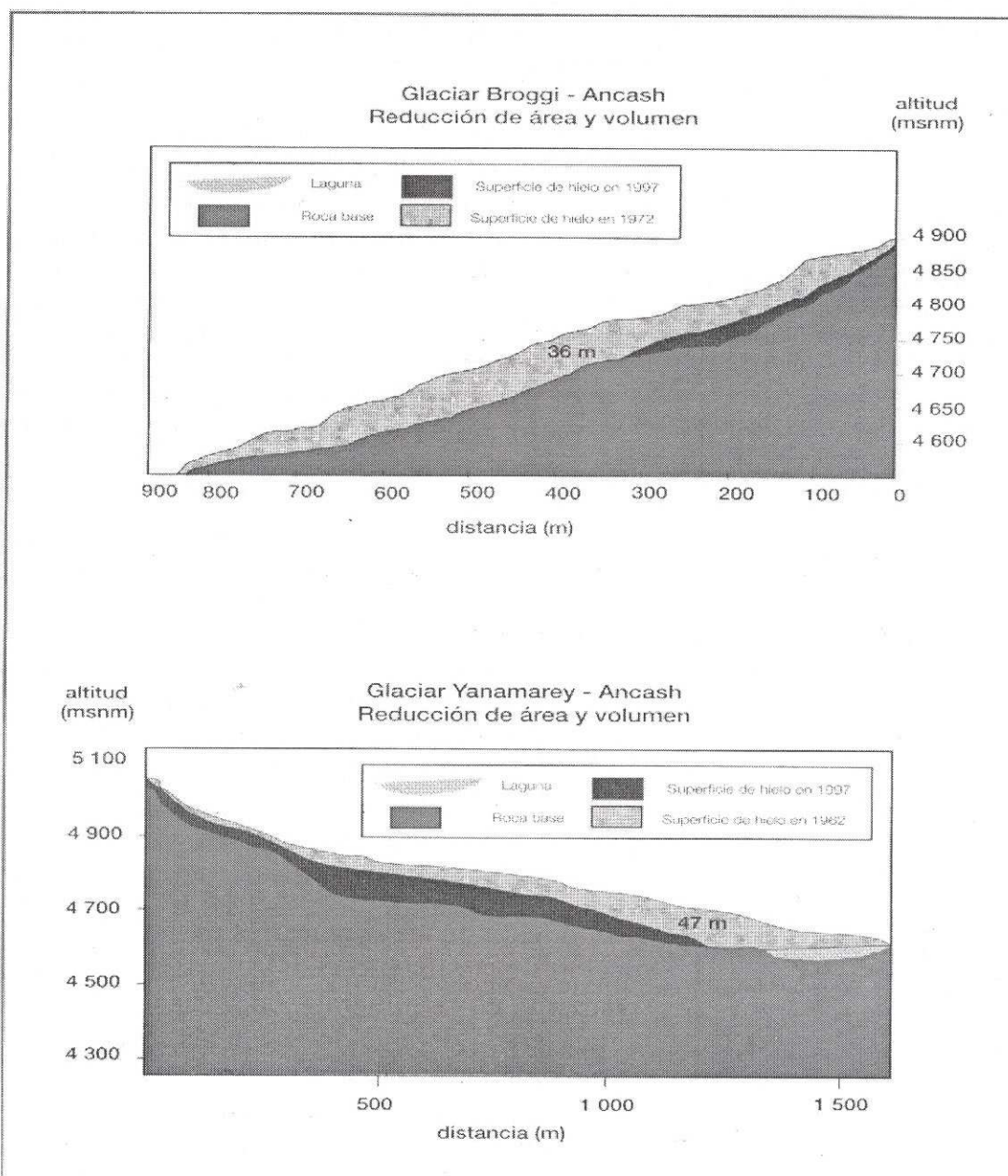


FIGURA N° 3

REDUCCION DE AREA Y VOLUMEN DE GLACIARES



Sin duda es necesario toda la tecnología que sea necesaria para conocer más las posibilidades de previsión para fenómenos de esta envergadura.

Aluviones de Lagunas Glaciares

El 13 de Diciembre de 1941 ocurrió el más grande aluvión de la laguna glaciar sobre la ciudad de Huaraz, destruyendo la tercera parte de una bella ciudad en crecimiento y la pérdida de 7000 personas.

En la Cordillera Blanca y de Huayhuash, en el Departamento de Ancash, entre 1725 a 1951 ocurrieron unos 26 aluviones de carácter destructivo, con grandes pérdidas humanas y materiales.

A partir de 1966 se intensificaron los trabajos de seguridad de lagunas a través de los Ministerios de Agricultura y Energía y Minas, habiendo logrado desaguar y asegurar el Valle del Santa contra los aluviones en forma exitosa, con una tecnología propia de desagües de lagunas, construcción de presas de seguridad y de túneles sub acuáticos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AMES A. & FRANCOU B. (1995).- Cordillera Blanca, Glaciares en la Historia, *Boletín del Instituto Francés de Estudios Andinos*, 24 (1): 37-64.

- BROGGI J.A.** (1942).- La Desglaciación Andina y sus consecuencias. *Boletín Academia Nacional de Ciencias*, V.6, 50-60p.
- CLAPPERTON C.M.** (1981).- Quaternary Glaciation in the Cordillera Blanca, Perú and Cordillera Real Bolivia, Memoria del Primer Seminario sobre el Cuaternario de Colombia, Bogotá.
- ELECTRO PERÚ.** (1973).- Memoria bianual del Programa de Glaciología y Seguridad de Lagunas, 74 p.
- FLIRI F.** (1968).- Beitrage zur Hidrologie and Glaciologie der Cordillera Blanca (Perú). Veroff Univ. Innsbruck, Alpenkund stud I, 25-52 p.
- HIGGLINO L.A.** (1970).- Alud de Yungay y Ranrahirca del 31/05, *Revista Peruana de Andinismo y Glaciología* N° 9 84-88 p.
- HIDRANDINA S.A.** (1998).- Inventario de Glaciares del Perú. 105 p.
- KASER G.** (1990).- Glacier Fluctuations and Climate in the Cordillera Blanca, Perú. *Annals of Glaciology* N° 14, 136-140.
- KINZL H. & SCHNEIDER E.** (1950).- *Cordillera Blanca*. Innsbruck, Universitätsverlag: Wagner Tiroler Graphic 167 p.
- LLIBOUTRY L., MORALES ARNAO B. & SCHNEIDER B.** (1977).- Glaciological Problems set by the Control of Dangerous Lakes is the Cordillera Blanca of Perú. Study of Moraines and Mass Balances at Safuna. *Journal of Glaciology*, v.18, 255-290 p.
- LLIBOUTRY L. MORALES ARNAO B., POUTRE & SCHNEIDER B.** (1977).- Glaciological Problems set by in Cordillera Blanca Perú. Historical failures of morainic dams. their causes and prevention *Journal of Glaciology* V. 18, N° 79, 239-254.
- MERCER J.H. & PALACIOS O.** (1977).- Radio Carbon Dating of the Last Glaciation in Perú. *Geology* N° 5, 600-604 p.
- MORALES ARNAO B.** (1969).- Huascarán Avalanche in the Santa Valley. Scientific Association of Hidrology v. 69, 304-315 p.
- MORALES ARNAO B.** (1966-1968).- Las Lagunas y Glaciares de la Cordillera Blanca y su control. *Revista Peruana de Andinismo y Glaciología* N°1, 14- 17 p.
- MORALES ARNAO B.** (1966-1968).- Estudio de Ablación en la Cordillera Blanca, *Bol. Instituto Nacional de Glaciología* N° 1, 52-57 p.
- MORALES ARNAO B.** (1971).- El día más largo del Hemisferio Sur. *Revista Peruana de Andinismo y Glaciología*. N°9, 63-71 p.
- MORALES ARNAO B.** (1985).- Lagunas y Glaciares del Perú Atlas Geográfico del Perú.
- MORALES ARNAO B.** (1999).- Estudios de Vulnerabilidad de Recursos Hídricos de Alta Montaña en el Perú, CONAM, Perú: Vulnerabilidad frente al cambio climático. Primera Edición.
- MORALES ARNAO C.** (1964).- Las 20 Cordilleras del Perú. *Revista Peruana de Andinismo y Glaciología* N°6, 70-78 p.
- POUYAUD B., FRANCOUB. & RIBSTEIN P.** (1995).- La Red de Monitoreo Glacio-Hidrológica de ORSTOM y de sus contrapartes en Bolivia Perú y Ecuador: una herramienta para el estudio del recalentamiento global y de sus consecuencias en los Trópicos - Aguas Glaciares y cambios climáticos en los Andes Tropicales. Seminario Internacional, 229-239 p.
- RODBELL T. D.** (1991).- Sub Division of Late Pleistocene Moraines in the Cordillera Blanca, Perú, Based on Rock Weathering Features, Soils and Radio Carbon Dates, *Quaternary Research* N° 39.
- SELTZER G.O., RODBELL D.T. & ABBOTT M.** (1995).- Anden Glacial lakes and Climate Variability since the last glacial maximum (Seminario Internacional La Paz Junio).
- THOMPSON H., HASTENRATHS & MORALES ARNAO B.** (1979).- Climatic Ice Core recods from the Tropical. Quekcaya ice Cap. *Science* V. 203, N° 4386, 1240-1245 p.
- THOMPSON L.G.** (1988).- 1500 Años de Variabilidad Climática Registrada en Testigos de Hielo Procedentes de los Andes del Sur del Perú. The Ohio State University, unpub.ms.
- THOMPSON G.G.** (1995).- Climatic records of the last 3000 years in ice cores from the Central Andes (Quekcaya and Huascarán) (Seminario Internacional La Paz Junio).
- WELSCH W. & KINZL H.** (1970).- Der Gletschersturz von Huascarán (Perú) am 31 Mai 1970 di grosste Gletscher Catastrophe der Geschichte (Zeitschrift fur Gletscher Kunde and Glacial geologie, Band 6, Heft 1-2, 181-192 p.
- WRIGHT H.E.** (1983).- Late Pleistocene Glaciation and Climate Around the Junín Plain, Central Peruvian Highlands. *Geografiska Annaler* N° 65A.

METODOLOGIA DE ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL DE UNA CANTERA

Sofía RAMÍREZ

Paseo del Cauce, 86, 4C 47012 Valladolid, España

E-mail: sofya@yahoo.es

RESUMEN

El objetivo de este artículo es presentar una posible metodología y el desarrollo de los pasos de un estudio impacto ambiental a través de una evaluación realizada basándose en los datos obtenidos en la cantera de la Santa Espina, Valladolid, España.

En primer lugar, se ha realizado un análisis profundo del proyecto, enumerando los impactos en cada una de las cuatro fases principales de una explotación minera. Se ha hecho además la comparación de los impactos de la cantera a estudiar y una labor minera en general, destacando los puntos que realmente se tendrán en cuenta durante el estudio.

En segundo lugar, se ha descrito el medio en que se desarrollará la explotación.

En tercer lugar, se ha realizado la identificación de los impactos aplicando dos métodos básicos para poder contrastarlos durante la evaluación. Estos son: *i*) construcción de una matriz causa-efecto, *ii*) aplicación de un grafo de identificación de impactos. Después, se ha hecho la descripción detallada de estos impactos.

En cuarto lugar, se ha presentado la valoración cualitativa y cuantitativa de los 15 impactos más destacados. Posteriormente se ha realizado una presentación general en donde se han detallado todos ellos teniendo en cuenta varios aspectos y demostrando además gráficamente los efectos de las alternativas de localización, anunciando explícitamente las medidas correctoras donde sea posible aplicarlas.

Por último, se han descrito las tres alternativas de localización de la explotación basadas en modelo empírico. Siguiendo los pasos descritos y habiéndose hecho las respectivas comparaciones se ha llegado a la selección de la mejor alternativa para este proyecto.

Palabras claves: *metodología de estudio impacto ambiental, exploración minera a cielo abierto*

ABSTRACT.- METHODOLOGY FOR STUDY THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF A QUARRY.

An environmental analysis based on a possible methodology using data obtained from a quarry situated at Santa Espina, Valladolid, Spain is described.

The detailed description of the impact factors in all major phases of a working mine was given. The comparison of the impacts on the analyzed quarry and those of a general case was carried out. The most important points of the analysis were specially emphasized. The environment where the exploitation will be realized was equally described.

Two basic methods were used to identify the environmental impacts: *i*) the cause-effect matrix, *ii*) the impact graph. A description of the most important impacts along with their qualitative and quantitative evaluation is also given. After the general overview of these impacts a detailed graphical analysis according to the possible alternatives is presented. Where it was possible the correction factors were also analyzed.

Three alternatives for the location of the quarry were found based on empirical model. Following the previously described steps the best alternative was elected.

Keywords: *environmental protection analysis and methodology, opencast min.*

INTRODUCCIÓN

Antes de proceder al desarrollo del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) de la Cantera de la Santa Espina (Valladolid – España) se procedió a utilizar una sistemática que nos servirá de guía en los pasos a seguir en este Estudio:

1. Generación y evaluación de alternativas.
2. Análisis y descripción del proyecto, así como una relación de las posibles acciones que producirán impacto.

3. Descripción del Medio o Inventario Ambiental teniendo en cuenta el Medio Abiótico, Biótico, Socioeconómico y Perceptual o Paisajístico.

4. Identificación de Impactos en conjunto con los factores que se verán alterados o modificados por las acciones.

5. Valoración de Impactos ya sea por uno u otro método (cualitativo – cuantitativo).

6. Evaluación Parcial del EIA.

7. Aplicación de Medidas Correctoras.

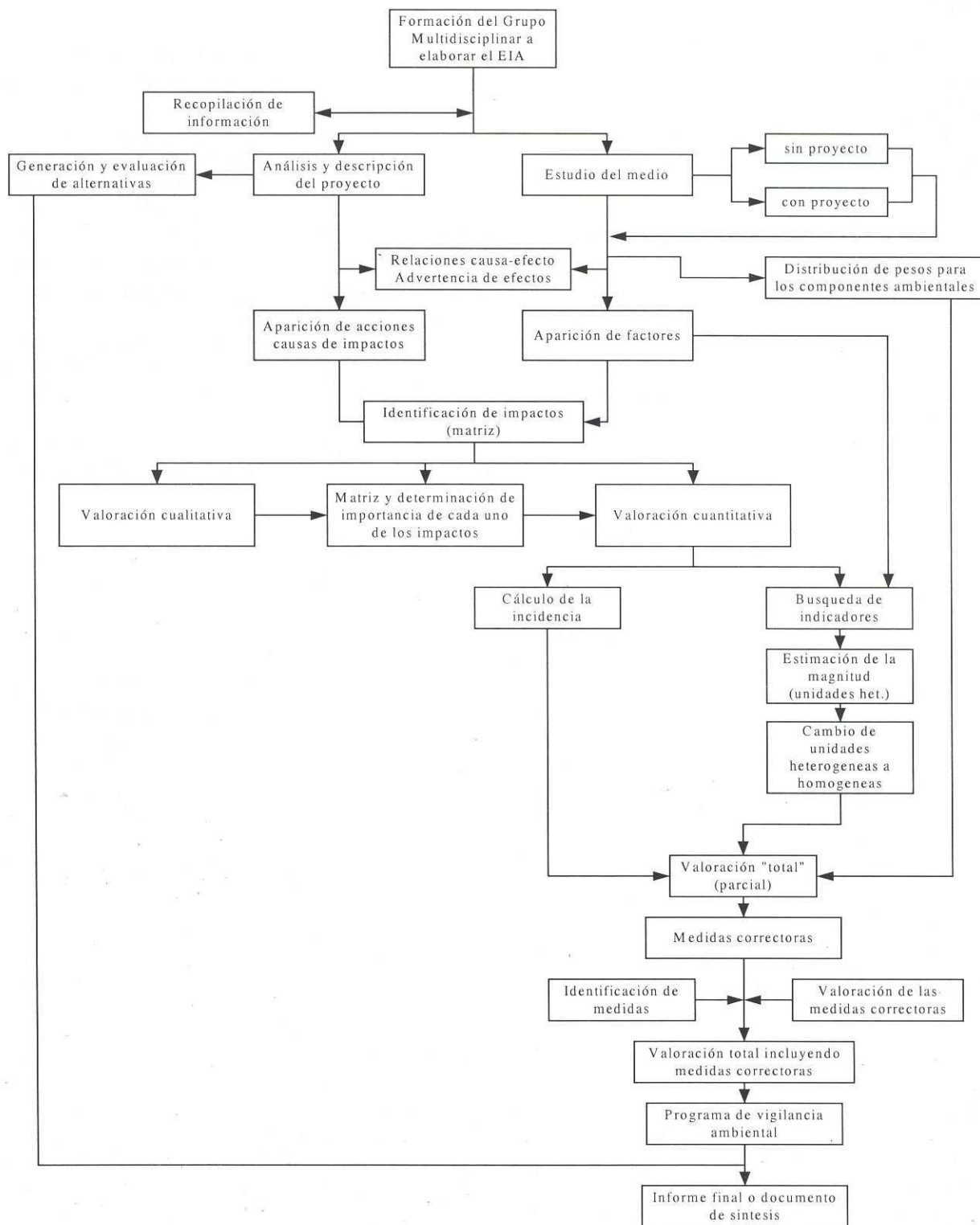
8. Evaluación Total del EIA.

- 9. Programa de Vigilancia y Control.
- 10. Informe final.

El primer problema que surgió en el presente proyecto fue el de la generación de alternativas dado que las actividades mineras siempre se encuentran condicionado por la localización y existencia de los recursos mineros, por lo que muchas veces la ubicación,

en la mayoría de casos es previamente elegida sin tomar en cuenta ningún otro elemento. Sin embargo hay casos en los que se pueden dar situaciones alternativas dada la ubicación de los recursos en grandes áreas. Pese a todo ello y encontrándose la fuente económica en una determinada zona es que se realizó este estudio bajo la metodología vista en el párrafo anterior.

Metodología seguida para el estudio de esta cantera



ANÁLISIS DEL PROYECTO

El proyecto consiste en la explotación a cielo abierto de rocas ornamentales del tipo calizas con fines para la construcción ubicado en la “Senda de Molino” muy cerca de la carretera que une San Rafael de la Santa Espina y Villagarcía de Campos ocupando un área de 67,8422 has.

Las fases que se describirán a lo largo del proyecto así como las que conlleva cada uno de éstas son:

- Fase Exploración:

Primera fase a llevarse a cabo donde se estudiarán características del lugar.

 1. Calicatas y Excavaciones piloto:

Proyectadas de 25 cm de ancho por 80 cm de largo con un espesor de 30 cm.
- Fase de Construcción:

Adecuación del terreno para su explotación.

 1. Movimiento de tierras:

Limpieza del área correspondiente al proyecto, desarrollando las siguientes acciones:

 - Desbroce y despeje: se despejará 60 has.
 - Excavación y acopio: levantamiento de capa fértil del suelo (0,3 m).
 - Vertedero
 2. Estructuras:

Acondicionamiento de la infraestructura de la cantera.

 - Oficina, almacenes y servicios: remodelación y construcción de infraestructuras
 - Sistema de drenaje: canalización de aguas de lluvia.
 3. Movimiento de maquinaria: Tráfico de

- maquinaria indispensable por la ejecución de las anteriores acciones.
- 4. Trabajos auxiliares:
 - Contratación de mano de obra: la cual repercutirá en los núcleos cercanos al proyecto.
 - Adquisición de Materiales.
- Fase de Explotación:

Durante esta fase se realizará una explotación que tendrá una vida promedio de 13 años.

 1. Desarrollo:
 - Voladura: supone la apertura de hueco.
 - Perforación y barrenado: ingreso en la roca con fin extractivo
 - Arranque: corte y obtención de bloques paralelepípedos.
 - Carga y transporte.
 - Almacenamiento.
 2. Movimiento de Maquinaria:
 - Transporte del material.
 3. Mantenimiento:
 - Mano de obra.
 - Maquinaria.
- Fase de Abandono:

Es la etapa final, agotado el recurso natural se tratará de “recuperar” o al menos palear una de las alteraciones que más repercuten en una zona de intensa actividad minera:

 1. Revegetación: Se tratará de devolver las especies vegetales autóctonas e introducir nuevas especies.
 2. Remodelación de taludes: Disminución de pendientes por técnicas de descabezado de taludes para aminorar el contraste dejado.

FASES Y ACCIONES DEL PROYECTO

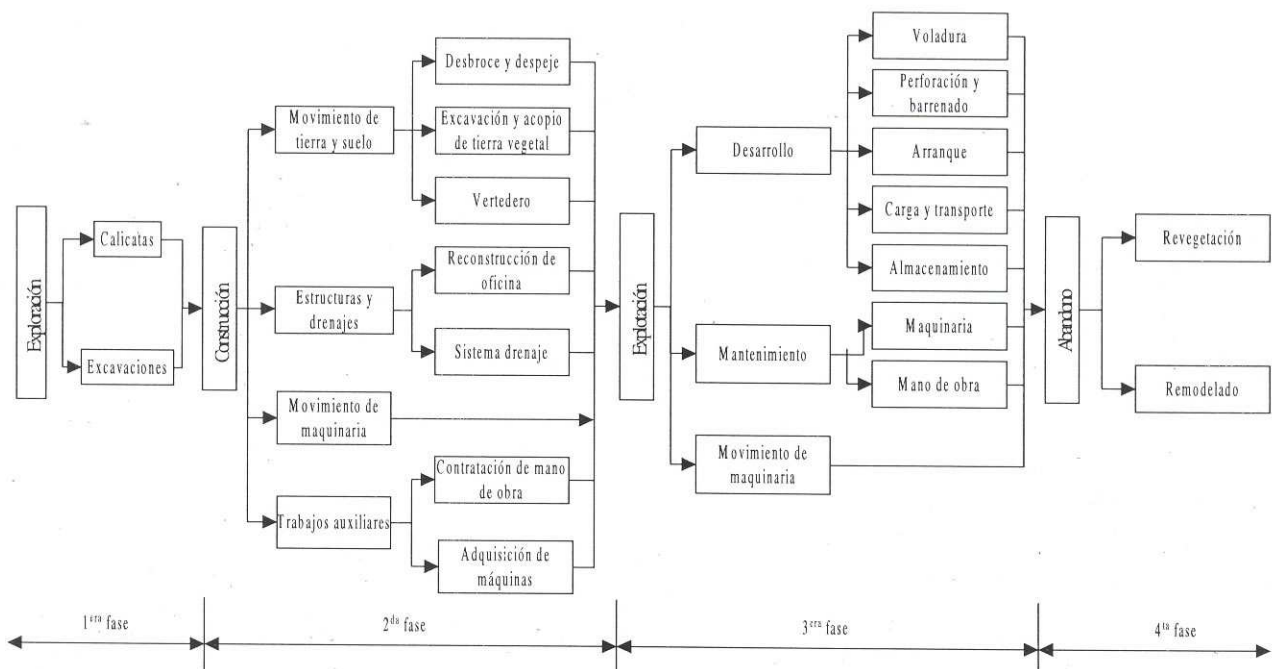


Tabla 1 Fases de un proyecto minero en general en comparación con las fases de la cantera

Fases de un proyecto minero	Principales acciones productoras de impactos en una labor minera	Acciones productoras de impacto en nuestro proyecto
A. Prospección y exploración	A.1. Calicatas y excavaciones A.2. Sondeo A.3. Perforaciones	A.1. Calicatas y excavaciones
B. Construcción	B.1. Movimiento de tierra y suelo Desbroce y despeje. Excavación y acopio de tierra vegetal. Vertedero y desmonte. B.2. Estructuras y Drenajes Construcción de viviendas. Planta concentrada y/o planta de tratamientos. Prera de relave o residuo. Obras de drenaje. Vías de comunicación. B.3. Movimiento de maquinarias Parque de maquinas, almacenes, oficinas y otras. B.4. Trabajos auxiliares Contracción de mano de obra. Compra de materiales y maquinaria. Expropiaciones.	B.1. Movimiento de tierra y suelo Desbroce y despeje. Excavación y acopio de tierra vegetal. Vertedero. B.2. Estructuras y drenaje Construcción de oficinas de obras, almacenes. Sistema de drenaje. Movimiento de maquinarias. Parque de maquinas, almacenes, oficina de obras. Camino de servicio. Emisiones de ruido y vibraciones Emisiones de efluentes. Emisiones de gases. Trabajos auxiliares. Contracción de mano de obra. Adquisición de materiales y maquinaria.
C. Explotación	C.1. Explotación Perforación. Voladuras. Acarreo y cargio. Transporte. C.2. Movimiento de maquinaria Emisiones de ruido y vibraciones. Emisiones de efluentes. Emisiones de gases. C.3. Tratamientos De minerales. De efluentes. C.4. Mantenimiento Contratación de mano de obra. Compra de materiales y maquinaria. C.5. Accidentes	C.1. Desarrollo de explotación Perforación. Voladuras. Perforación y/o barrendal. Arranque. Carga y transporte. Almacenamiento. C.2. Mantenimiento Mantenimiento de maquinaria y almacén. Contratación de mano de obra.
D. Abandono	D.1. Reforestación. D.2. Estructuras abandonadas. D.3. Desmantelación y abandono.	D.1. Revegetación. D.2. Remodelado.

ESTUDIO DEL MEDIO O INVENTARIO AMBIENTAL

C.1. Medio físico

Geología:

La cantera se encuentra en los Montes Torozos que pertenecen a la cuenca del Duero, formándose a finales del cretácico y comienzos del terciario originado por el hundimiento del zócalo paleozoico.

En la zona se han desarrollado calizas y margas producto de periodos de climas tropicales con periodos de aridez los que generarían lagunas efímeras donde posteriormente se desarrollarían estas rocas de origen químico.

Clima:

El clima de la zona estudiada es mediterráneo con matices de continentalidad por lo que presenta una aridez estival (min. pluviométrico y max. térmico), presentando una precipitación media anual de 450-500 mm durante los meses centrales del invierno principalmente y temperaturas que en este período pueden llegar a ser menores de 0 °C y durante el verano superar los 30 °C, sin embargo la temperatura media anual oscila entre los 10-13 °C.

Agua:

Pese a estar el estudio en una zona de recursos hídricos superficiales muy limitados tenemos al Río Bajoz (afluente del Duero) el cual nace en los Montes Torozos; presentando un caudal escaso y muy irregular recibiendo aportes principalmente de precipitaciones y del manto freático.

En cuanto a las aguas subterráneas son explotadas casi en una totalidad para los acuíferos superficiales presentando una buena calidad.

Geomorfología:

La zona de estudio (Montes Torozos) presenta un relieve bastante plano y extenso, convirtiéndolo en un páramo de llanura casi perfecta cuyas altitudes fluctúan entre los 800 y 850 m.

Flora:

Debido al clima mediterráneo (aridez estival y la rigurosidad de los inviernos) es que la esclerófila se convierte en la vegetación potencial de la zona representada principalmente por la encina carrasca habituada a soportar temperaturas extremas, sin casi necesitar agua, adaptándose tanto a suelos ácidos como básicos.

Las especies encontradas en la zona son: tomillares, aljezares, herbazales, encinar, quejigal, pinares de carrasca y de piñonero, éste último por introducción del hombre con fines económicos.

Fauna:

En esta zona de altiplanicies se encuentra una fauna muy variada donde coexisten animales propios de zonas

húmedas y de ribera con las características de ambiente mediterráneos, tanto los propios del encinar quejigal como las especies esteparias: encontrándose un total de 6 especies de peces en el Bajoz (río cercano a la zona de estudio), 8 especies de anfibios, 11 especies de reptiles, gran número de especies de aves, observándose ocasionalmente durante los pasos migratorios o de fauna ocasional algunas y en mamíferos no se ha realizado un verdadero estudio del número de especies.

C.2. Medio socioeconómico

El análisis de este acápite se realizará en los poblados rurales más cercanos: Villagarcía de Campos, Villabragima, Tordehumos, Castromonte y San Rafael de la Santa Espina teniendo éstos una distribución algo heterogénea (menor en el interior y mayor en la periferia).

Su densidad poblacional es de 10 habitantes por km²; presentando una dinámica demográfica en la que la edad media es de 43 años. En cuanto al valor del suelo no suele ser tan elevado en la zona de estudio.

La base económica se sustenta en la agricultura (motor de la economía de la zona), recayendo como segunda actividad en la economía local la ganadería.

C.3. Medio perceptual

Teniéndose en cuenta que éste es producto de la evolución geológica y geomorfológica, así como de la acción del hombre, observándose los conjuntos paisajísticos: estepa cerealista y estepa arbolada siendo ésta última la que mayormente predomina en nuestra zona.

Ya en los componentes visuales tenemos: la vegetación, rocas y alguna actuación humano (cultivos, caminos y edificación). Mientras que en las características presenta el color de la estación del año (debido a la vegetación), la forma regular (relieve llano y vegetación homogénea), la línea no es unidireccional, con textura regular.

En cuanto la calidad visual presenta los siguientes atributos físicos:

Agua:	río más cercano Bajoz, pero fuera del área en sí.
Forma del terreno:	llano y aislado
Vegetación:	no existe de forma permanente
Fauna:	muy diversa
Uso del suelo:	eriazos
Color:	diverso y bien contrastado
Textura:	regular

IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS

La identificación de impactos se realiza mediante dos métodos:

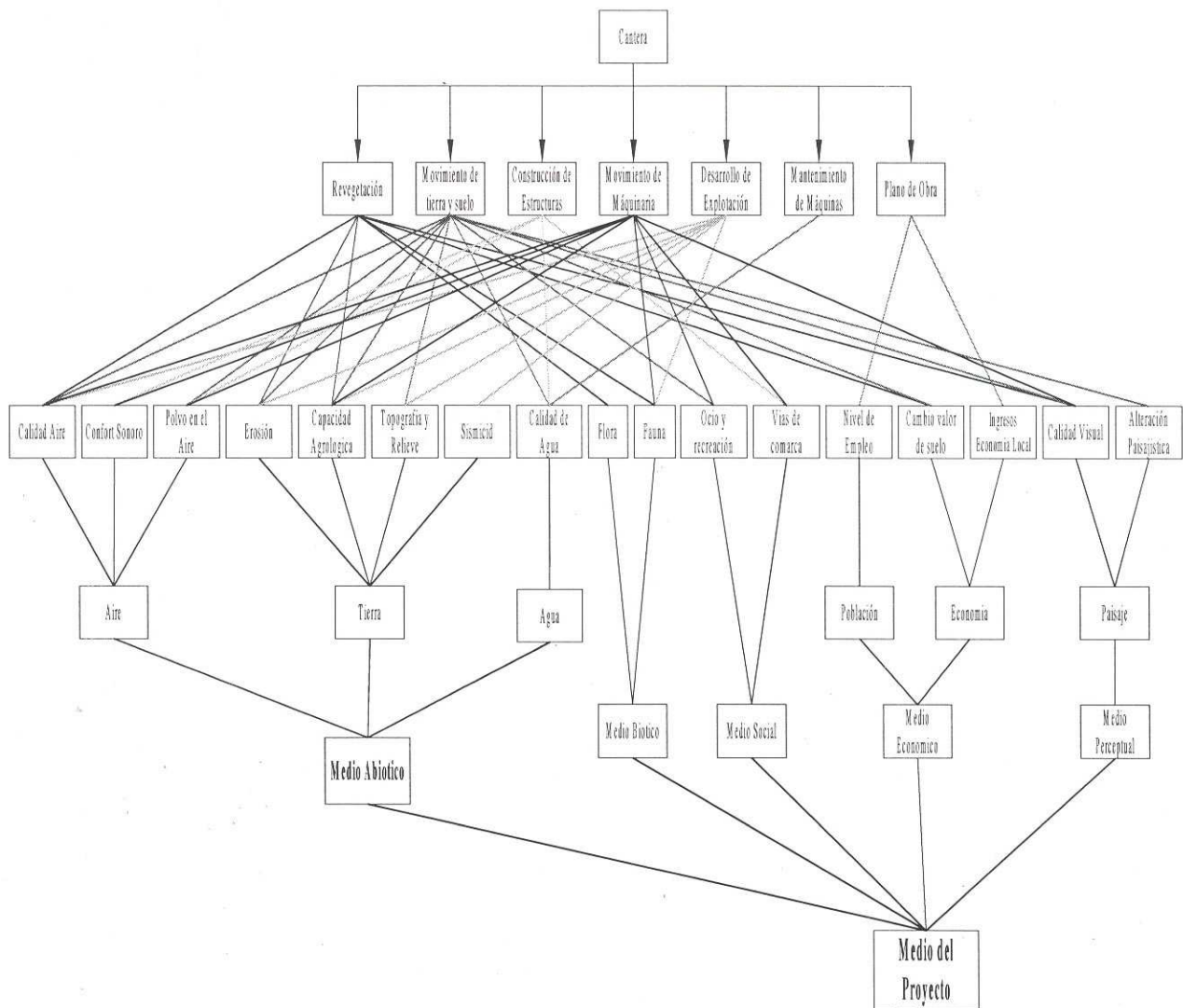
El primero y más conocido fue el de una matriz causa-efecto con un cuadro de doble entrada en el que se

disponen en coherencias las acciones del proyecto y en filas de una fila los factores del medio. (Ver matriz de identificación). Entre el encuentro de una fila y columna se señalarán cada uno de los impactos dependiendo de cada factor, de cada acción.

El segundo es un grafo que está constituido por dos sistemas en el que el superior muestra el proyecto

con sus diferentes acciones y en la parte inferior se mostrará el medio o entorno con sus diferentes factores ambientales. De tal manera que la señalización de una acción hacia un factor nos indicará qué acción actúa sobre tal o cual factor, generándose así un impacto. (Grafo de identificación de impactos).

Diagrama de los factores de Medio que se verán impactados por la diferentes acciones del proyecto



MATRIZ DE IDENTIFICACION DE IMPACTOS				ACCIONES DEL PROYECTO																			
				FASE CONSTRUCCION						FASE EXPLOTACION			ABANDONO										
FACTORES DEL MEDIO				CONTRATACION MANO DE OBRA	EXCAVACION Y ACOPIO DE MATERIALES	DESBRUCE Y DESPEJE	VERTEDERO	DRENAJE	MOVIMIENTO DE MAQUINARIA	VIAS DE ACCESO MEJORA	REMODELACION DE EDIFICIOS	VOLADURA	ARRANQUE DE BLOQUES	CARGA Y TRANSPORTRE	ALMACENAMIENTO	MANTENIMIENTO DE MAQUINAS	REMODELACION	RECUBRIMIENTO DE TIERRA	INTRODUCCION DE FLORA	DESPIDO MANO DE OBRA			
				MEDIO FISICO	MEDIO ABIOTICO	AIRE	CALIDAD	x	x	x			x			x		x				x	x
RUIDOS	x	x							x	o	x	x	x	o					o	x			
POLVO	x	x	x								x	x	x	o	x	x				o	x		
TIERRA	CONTAMINACION									x	x					x							
	EROSION	x	x											x								x	
	CAPACIDAD AGRICOLA		o							x			o	x						o	x		
MEDIO BIOTICO	AGUA	TOPOGRAFIA O RELIEVE	x		x									x									
		SISMICIDAD												x									
		SUPERFICIAL	x		x	x	x									x						x	
	CLIMA											x	x										
	FLORA																						
FAUNA																							
MEDIO SOCIO-ECONOMICO	MEDIO SOCIAL	TERRITORIO	CAMBIO DE USO		o	o							x							x	o		
		OCIO Y RECREO		x																			
	COMUNIC.	INFRAESTRUCTURA						x	x					x						x	x		
	MEDIO ECONOMICO	POBLACION	NIVEL DE EMPLEO	x																		x	
ECONOMIA		CAMBIO VALOR SUELO		o	o																x		
INGRESOS ECON. LOCAL		x																			x		
MEDIO PERCEPTUA	PAISAJE	CALIDAD VISUAL			o	o	x			x			o		x						o	o	o
		ALTERACION PAISAJISTICA												o									

o: impactos más relevantes

Descripción de impactos

Fase de construcción

Acción: Movimiento de tierras.

Factores ambientales afectados por la acción:

Aire: Alteración de la composición atmosférica e incremento del nivel sonoro.

Suelo: Variación de sus propiedades geofísicas y su capacidad agrológica.

Aguas superficiales: Alteración de la red natural de drenaje y disminución de la calidad del agua.

Aguas subterráneas: Afeción de la capa freática (vulnerabilidad de la napa) y disminución de la calidad del agua.

Clima: Modificación a nivel microclimático por la eliminación de la cubierta vegetal (ciclo hidrológico).

Flora: Eliminación de la vegetación y pérdida de elementos fértiles.

Fauna: Desplazamiento de la fauna por modificación de hábitat (emisión de polvo y ruido).

Socio-económico: Disminución de valor de los terrenos próximos por efectos de contaminación.

Paisaje: Modificación de relieve y pérdida de la calidad de paisaje.

Acción: Construcciones.

Factores ambientales afectados por la acción:

Aire: Alteración de la composición atmosférica e incremento del nivel sonoro.

Suelo: Ocupación del suelo fértil por la construcción de estructuras (pistas, oficinas, almacenes, etc.)

Aguas superficiales: Construcción de un sistema de drenaje que evacúe el agua de lluvia durante la excavación.

Fauna: Desplazamiento de la fauna a zonas distintas de la natural, debido a modificación de terreno.

Socio-económico: Mejora del tránsito por la zona, turismo y comunicación.

Acción: Movimiento de maquinaria.

Factores ambientales afectados por la acción:

Aire: Disminución de la calidad de aire de forma temporal por emisión de CO e hidrocarburos.

Suelo: Deterioro del firme por tráfico intenso de

maquinaria pesada.

Aguas superficiales: Turbidez derivada del tráfico de maquinaria pesada.

Fauna: Perturbación en el comportamiento de las especies por el tráfico de maquinaria.

Socio-económico: Aumento del tráfico sobre vías públicas por ende mayores probabilidades de accidentes.

Acción: Otros trabajos.

Factores ambientales afectados por la acción:

Suelo: Variación de la capacidad agrológica y alteración de las propiedades del suelo por contaminación y ocupación.

Socio-económico: Incremento económico a núcleos cercanos por generación de trabajo.

Paisaje: Cambio total de la percepción por introducción de agentes discordantes.

Fase de explotación

Acción: Perforación y voladura.

Factores ambientales afectados por la acción:

Aire: Afección del aire por gases desprendidos derivados de la utilización de explosivos. Emisión de partículas sólidas. Producción de vibraciones que podrían ser causantes de molestias de las localidades próximas.

Suelo: Modificación de su disposición y aumento del riesgo de agrietamiento por la rotura de estratos y apertura de huecos.

Aguas subterráneas: Deposición de partículas debido a las vibraciones de la voladura.

Paisaje: Aparición de una gama de colores diferente a la persistente.

Acción: Otros trabajos.

Factores ambientales afectados por la acción:

Aire: Emisión de partículas sólidas e incremento sonoro.

Suelo: Incremento de la meteorización y erosión. Modificación total de la pendiente del terreno.

Aguas superficiales: Modificación del agua de lluvia en aguas duras por disolución de la caliza que al mezclarse con el agua del río disminuye su calidad.

Acción: Almacenamiento.

Factores ambientales afectados por la acción:

Aire: Contaminación de partículas sólidas desprendidas por el proceso de carga y descarga de materiales.

Acción: Movimiento de maquinaria.

Factores ambientales afectados por la acción:

Aire: Emisión temporal de CO, hidrocarburos y partículas sólidas.

Suelo: Emisión de efluentes y residuos por mantenimiento de maquinaria.

Aguas superficiales: Contaminación por vertidos de aceites, hidrocarburos, procedentes de mantenimiento de maquinaria.

Aguas subterráneas: Infiltración de efluentes (baja probabilidad).

Fase de abandono

Acción: Remodelación.

Factores ambientales afectados por la acción:

Aire: Emisión de partículas y gases por las reacciones químicas derivadas de la utilización de explosivos al intentar disminuir los pendientes de los taludes y dar formas naturales a la superficie.

Paisaje: Eliminación de líneas rectas y horizontes de apariencia no natural.

Acción: Preparación del suelo.

Factores ambientales afectados por la acción:

Aire: Partículas sólidas en el aire por el proceso de descarga de materiales fértiles para el recubrimiento del suelo.

Suelo: Introducción de suelo fértil, recuperación parcial de sus propiedades geofísicas y de su capacidad agrológica.

Acción: Revegetación.

Factores ambientales afectados por la acción:

Aire: Recuperación y restitución de la composición atmosférica.

Suelo: Por implantación de vegetación variación de propiedades geofísicas y la capacidad agrológica.

Aguas superficiales: Restitución del ciclo hidrológico de la zona.

Aguas subterráneas: Restitución de la capa freática

Clima: Recuperación a nivel microclimático.

Flora: Recuperación e introducción de nuevas especies.

Paisaje: Recuperación de vistas y matiz de colores paisajísticos.

Acción: Otros trabajos.

Factores ambientales afectados por la acción:

Socioeconómico: Disminución del nivel económico de los núcleos próximos debido al despido de mano de obra por el abandono de la explotación.

VALORACIÓN DE IMPACTOS

E.1. Valoración cualitativa

Se aplicó la metodología propuesta por V. Conesa Fernández en donde se le empezó determinando la importancia de cada uno de los impactos mediante la fórmula:

$$I = \pm(3I+2Ex+MO+PE+PV+SI+AC+EF+PR+MC),$$

donde:

I: intensidad, Ex: extensión, MO: momento, PE: persistencia, RV: reversibilidad, SI: sinergia, AC: acumulación, EF: efecto, PR: periodicidad, MC: recuperabilidad.

Confrontado finalmente acciones, factores y valores de importancia en la matriz de importancia.

E.1.1. Distribución de pesos

Subsistema	Medio	Factor	Subfactor	Pesos			
Físico	700	Abiótico	290	Aire	160	Calidad	55
						Ruido	50
						Polvo	55
			95	Tierra	Contaminación	15	
					Capacidad agrológica	70	
	10	Topografía o Relieve		10			
			25	Agua	Superficial	17	
		Calidad en Acuíferos			8		
	410	Biótico	10	Clima	Microclima	10	
					200	Flora	Flora Natural
			Flora Introducida	80			
210			Fauna	Fauna – Habitas			150
					Movilidad de Especies	60	
100	Socioeconómico	70	Territorio	60	Cambio de uso	45	
					Ocio y recreo	15	
				10	Comunicación	10	
		30	Económico	12	Nivel de empleo	12	
				18	Economía	Cambio del valor del suelo	16
			Ingresos en economía local	2			
200	Perceptual	200	Paisaje	Calidad Visual	80		
				Alteración Paisajística	120		
				Peso Total:	1000		

E.2. Valoración cuantitativa

La valoración se realizó en base a los 15 impactos más destacados del proyecto, sobre el medio, donde se trabajó con los indicadores (ver tabla de indicadores) que

reflejarían con mayor nitidez la afección de éste, así como dependería también muchas veces de los datos con los que contaba el inventario; contando con la importancia ya calculada en el anterior procedimiento y calculando la incidencia para cada uno de los impactos donde:

$$INC = \frac{v_x - v_{min}}{v_{max} - v_{min}} = \frac{x - 13}{100 - 13}$$

Tabla 2 Tabla de indicadores

N°	IMPACTO	INDICADOR	UNIDAD DE MEDIDA
I ₁	Desbroce y despeje de la cubierta vegetal	Porcentaje de superficie cubierta	%
I ₂	Desbroce y despeje afectando a la fauna	Valor Ecológico del Biotipo (VE)	Adimensional (1-100)
I ₃	Cambio del uso del suelo afectado por el desbroce y despeje.	Suma ponderada de la superficie de cada clase de suelo	%
I ₄	Desbroce y despeje afectando al Paisaje	El valor relativo del paisaje	Adimensional
I ₅	Afección de la capacidad agrológica debido a la excavación y acopio de materiales	Suma ponderada de la superficie de cada clase de suelo	%
I ₆	Calidad de agua superficial	Índice de calidad de agua	%
I ₇	Empeoramiento de infraestructura Debido al movimiento de maquinarias	Grado de destrucción de Factor	%
I ₈	Contaminación por emisión de partículas de polvo	Índice de calidad del aire	M g/m ³
I ₉	Cambio del valor del suelo debido al arranque de bloques	Suelo afectado revalorizado	%
I ₁₀	Afección del paisaje debido al arranque de bloques.	% de cuenca visual afectada multiplicada por la calidad visual del paisaje	0/100
I ₁₁	Contaminación acústica	Nivel de presión Acústica	DBA
I ₁₂	Afección del recubrimiento de tierra a favor de la flora	Variedad cualitativamente estimada	Adimensional
I ₁₃	Favorecimiento del ocio y recreo debido al recubrimiento de tierra	Superficie equivalente de espacios de ocio	%
I ₁₄	Mejora de la calidad de aire debido a la introducción de flora	Índice de la calidad del aire	Adimensional (10-100)
I ₁₅	Introducción de fauna indirectamente debido a la introducción de flora	Movilidad de especies	%

Tabla 3 Tabla resumen de importancias, incidencias y significados

IMPACTO	IMPORTANCIA	INCIDENCIA	SIGNIFICADO
I ₁	75	0,712	CRITICO
I ₂	56	0,494	SEVERO
I ₃	75	0,712	CRITICO
I ₄	64	0,586	SEVERO
I ₅	64	0,586	SEVERO
I ₆	34	0,241	MODERADO
I ₇	40	0,310	MODERADO
I ₈	21	0,09	COMPATIBLE
I ₉	46	0,379	MODERADO
I ₁₀	42	0,333	MODERADO
I ₁₁	43	0,345	MODERADO
I ₁₂	37	0,276	MODERADO
I ₁₃	43	0,344	MODERADO
I ₁₄	40	0,310	MODERADO
I ₁₅	35	0,252	MODERADO

Tenemos como:

Impacto 1: Destrucción de la cubierta vegetal.
 Incidencia: 0,712
 Significado: crítico
 Indicador: porcentaje de superficie cubierta
 Contaminante: destrucción de la cubierta vegetal
 Unidad de medida: porcentaje
 Enunciado:

$$PSC = \frac{100}{S_t} \sum_1^I S_i \cdot k$$

Focos de contaminación: cambio de uso
 Efectos principales: - anulación de la productividad forestal
 - reducción de la fijación y reciclaje del CO₂ atmosférico

Otros efectos: - disminución de la calidad visual
 - menor potencial recreativo
 - menor calidad de vida

Medida correctora: revegetación y protección de vegetación periférica

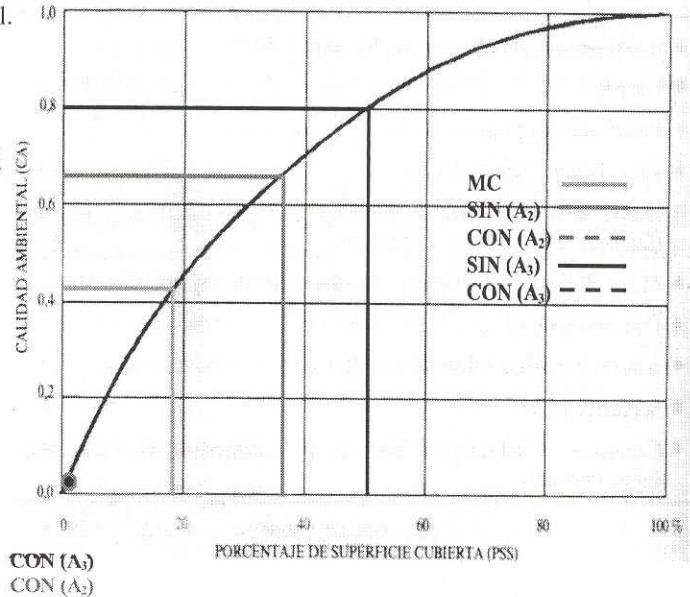
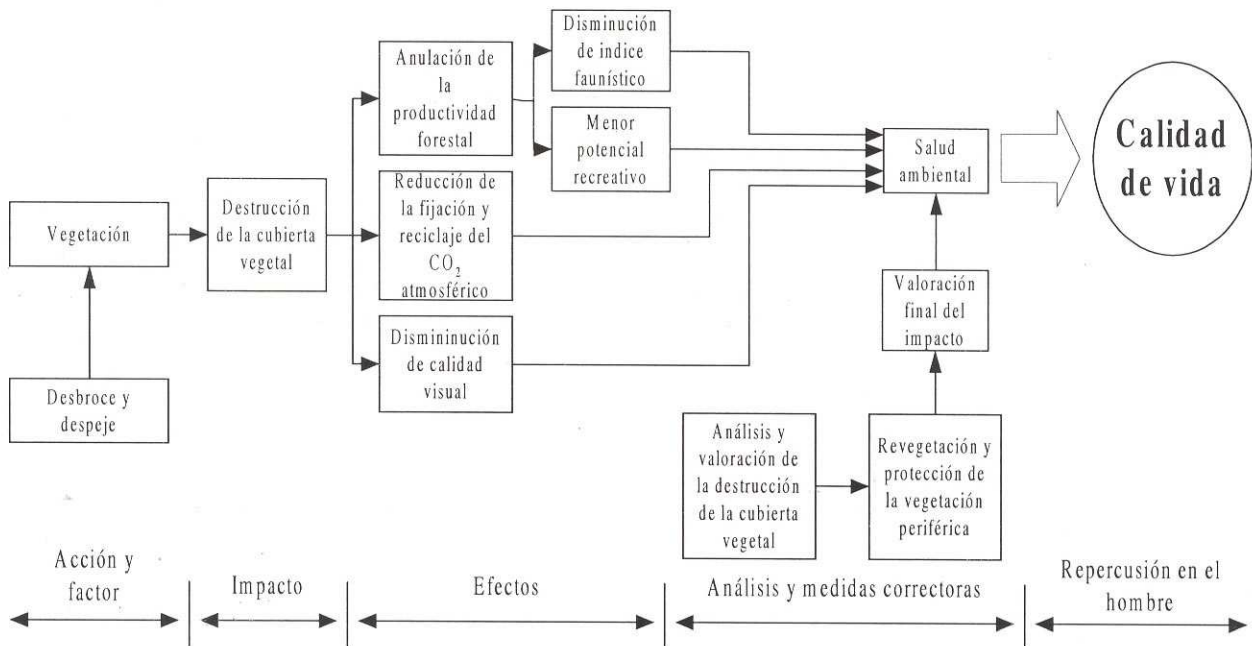


Diagrama de causa-efecto sobre la cubierta vegetal en la presente cantera



Impacto 2: Modificación del hábitat
 Incidencia: 0,494
 Significado: severo
 Indicador: valor ecológico del biotipo (VE)
 Contaminante: obras y actuaciones que degradan el hábitat
 Unidad de medida: adimensional
 Enunciado:

$$VE = \frac{a \cdot b + c + 3 \cdot d}{e} + 10 \cdot (f + g)$$

Focos de contaminación:
 Efectos principales:

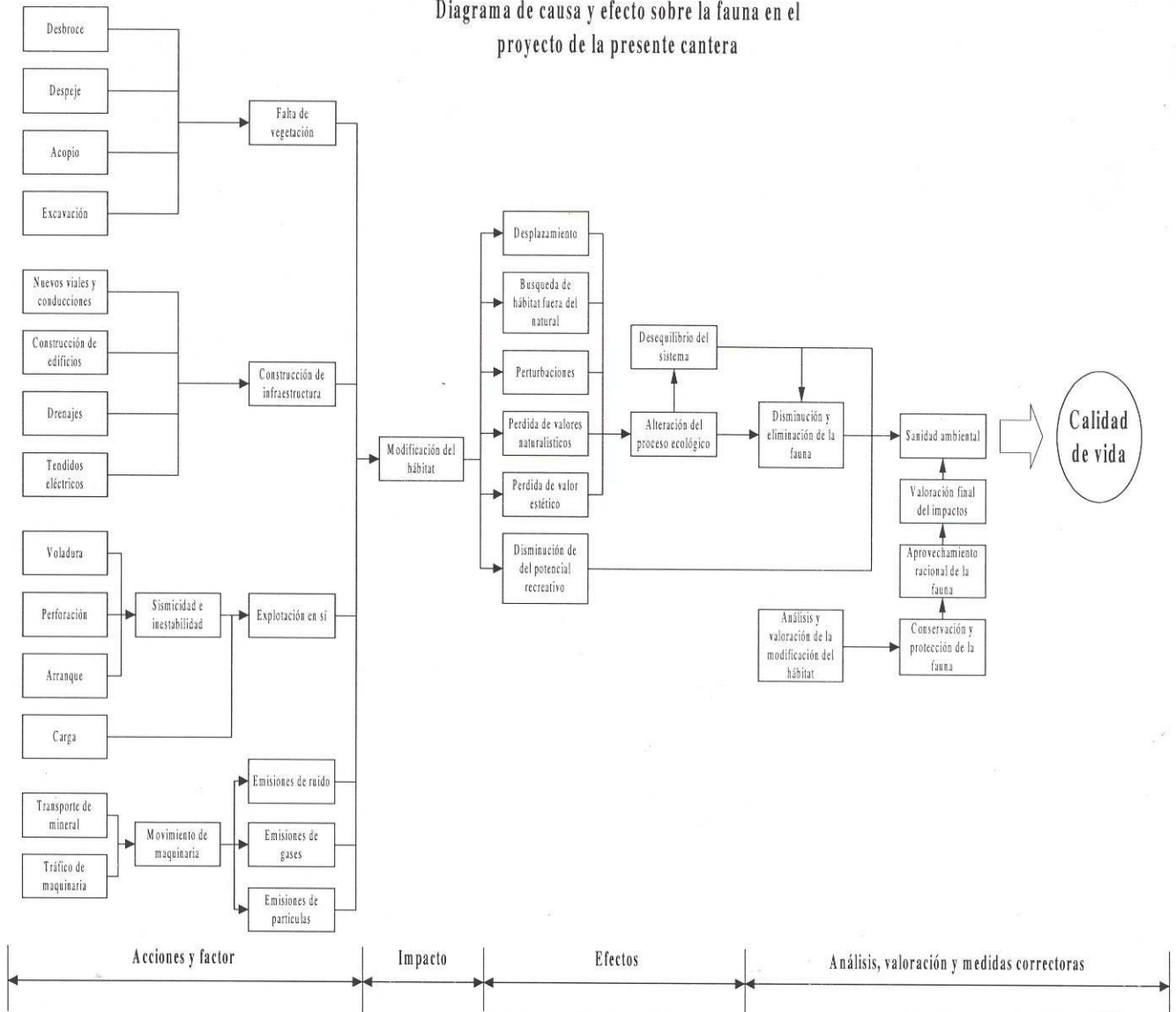
a: abundancia de especies,
 b: diversidad de especies,
 c: número de especies protegidas que habitan en el área,
 d: diversidad de biotipo,
 e: abundancia de biotipo,
 f: rareza de biotipo,
 g: endemismos.
 Focos de contaminación: iniciación del proyecto
 Efectos principales: - pérdida de los valores

naturalísticos y del patrimonio faunístico
 - desequilibrio en el ecosistema
 - pérdida del valor estético
 - alteración del proceso ecológico

Medida correctora:

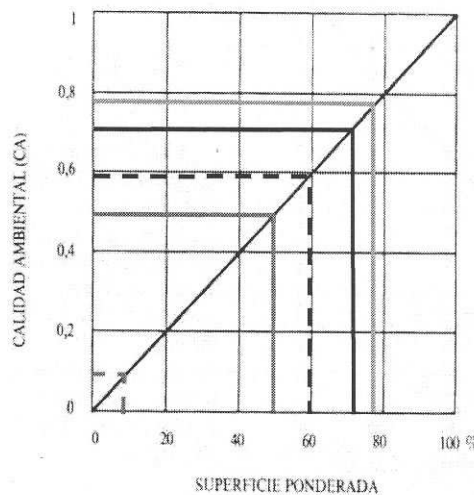
- desplazamiento
 - búsqueda de hábitat fuera del natural
 - perturbaciones
 planes de protección y conservación de la fauna

Diagrama de causa y efecto sobre la fauna en el proyecto de la presente cantera



Impacto 3: Cambio del uso del suelo.
 Incidencia: 0,712
 Significado: crítico
 Indicador: suma ponderada de la superficie de cada clase de suelo
 Contaminante: - extracción de recursos minerales
 - movimiento de tierra
 Unidad de medida: porcentaje
 Enunciado:

$$S.P.S. = 100 \cdot (\sum S_i \cdot P_i) / S_t$$



Indicador del factor
 Suma ponderada de la superficie de cada tipo de uso del suelo (natural 1; forestal 0,8; agrícola 0,6; residencias 0,4; comercial 0,2; industrial 0) expresada en porcentaje de la superficie total.

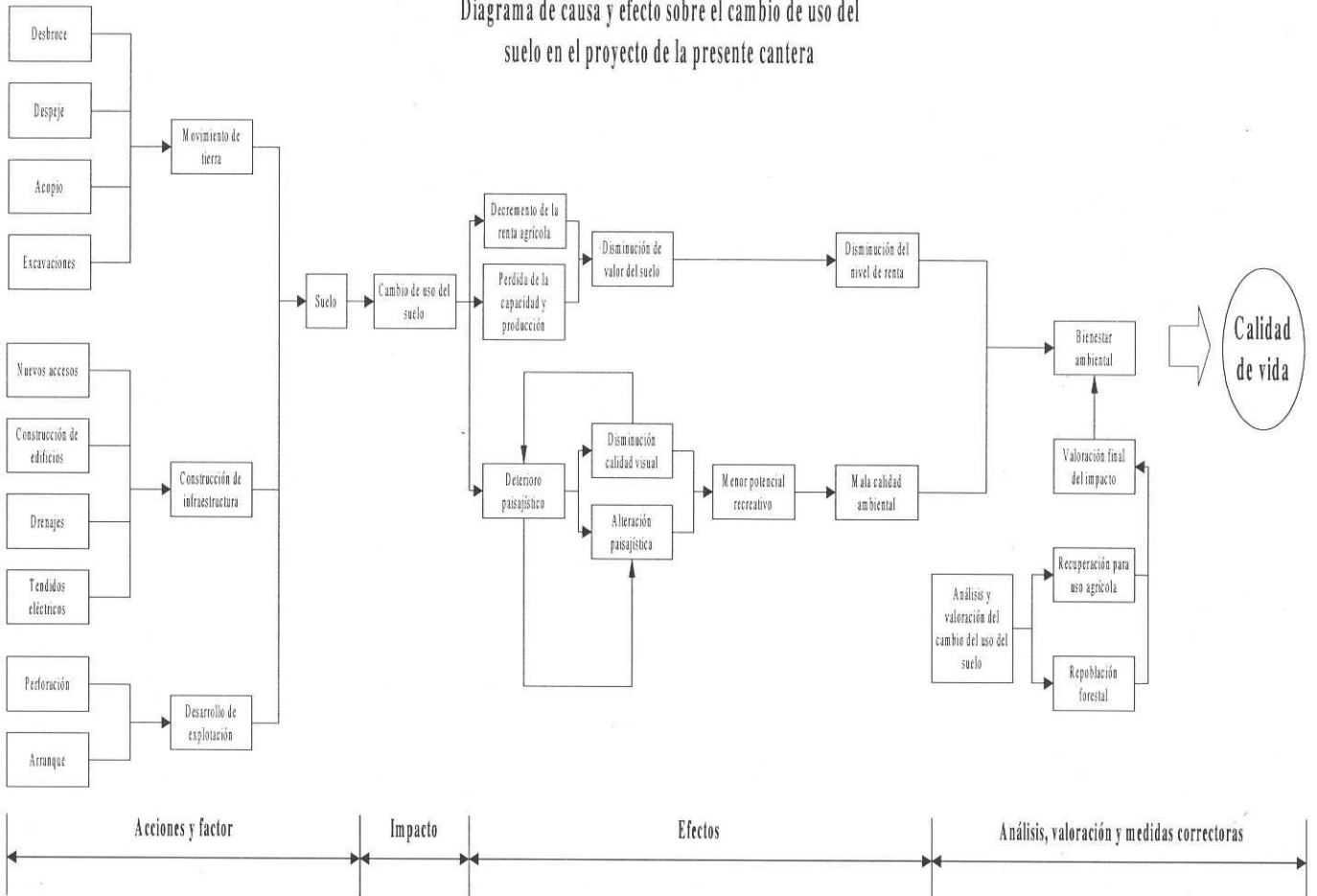
$$100 \cdot (\sum S_i \cdot P_i) / S_t$$

Unidad de medida: %

- MC —————
- SIN (A₂) —————
- CON (A₂) - - - - -
- SIN (A₃) —————
- CON (A₃) - - - - -

S_i : superficie total
 S'_i : utilidad que se le da al suelo
 P_i : ponderación de la utilidad del suelo
Efectos principales: - disminución del valor del suelo
Medida correctora: - recuperación para la reutilización ecológica
 - repoblación forestal
Focos de contaminación: desbroce y despeje de vegetación

Diagrama de causa y efecto sobre el cambio de uso del suelo en el proyecto de la presente cantera



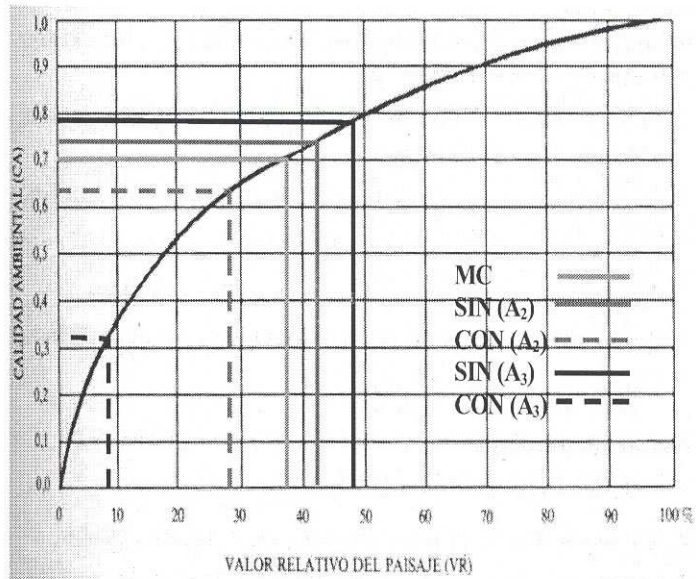
Impacto 4: Empeoramiento del paisaje.

Incidencia: 0,586
Significado: severo
Indicador: valor relativo del paisaje
Contaminante: - eliminación de componentes del paisaje
 - eliminación del suelo
 - cambio del uso del suelo
 - introducción de nuevas estructuras
 - ruido, polvo

Unidad de medida: adimensional
Enunciado: $V_R = K \cdot V_a$

V_a : valor absoluto del paisaje
 V_R : valor relativo del paisaje
 K : constante

Focos de contaminación: - desbroce y despeje de cubierta vegetal
 - explotación de la cantera
 - construcción de edificios



Efectos principales:

- construcción de vías de acceso
- movimiento de tierra
- aparición de taludes desnudos
- interrupción de líneas y formas naturales

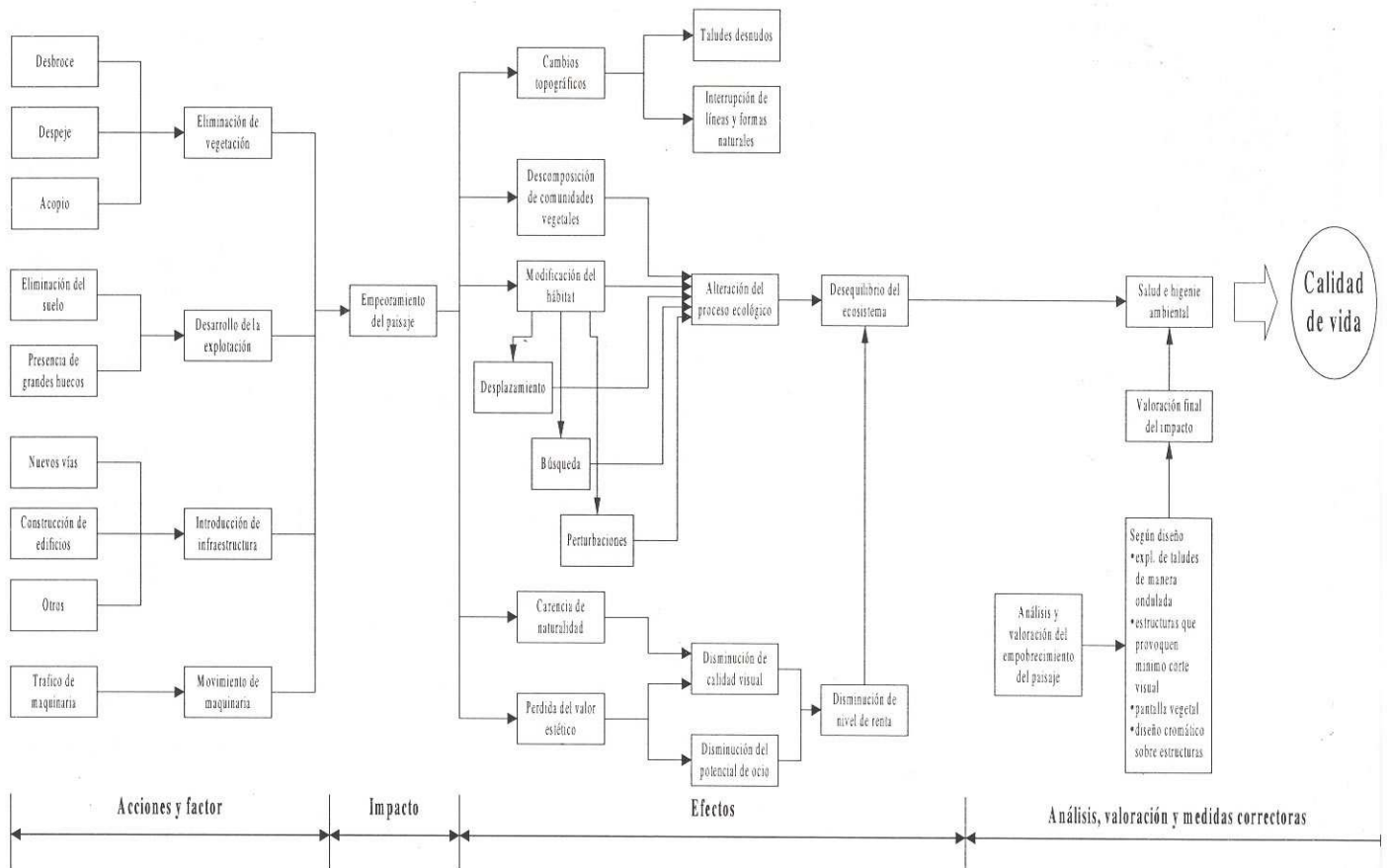
Otros efectos:

- eliminación de especies vegetales y animales
- introducción de elementos extraños

Medida correctora:

- construcción de pantalla vegetal
- explotación de taludes de manera ondulada

Diagrama de causa y efecto sobre el empeoramiento del paisaje en el proyecto de la presente cantera



Impacto 5: Disminución de la capacidad agrológica.

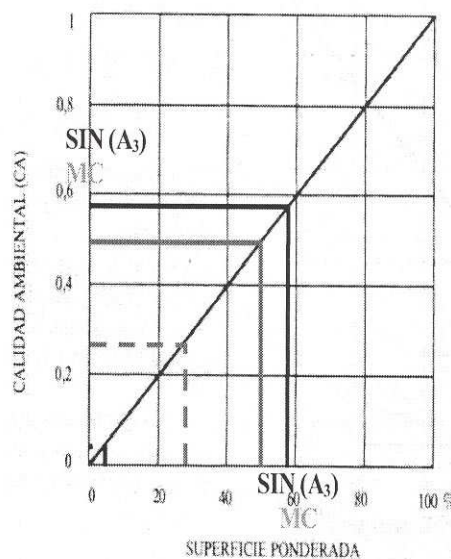
Incidencia: 0,586
 Significado: severo
 Indicador: suma ponderada de la superficie de cada clase de suelo
 Contaminante: - eliminación del suelo
 - extracción de roca madre
 Unidad de medida: porcentaje
 Enunciado:

$$S.P.S. = 100 \cdot (\sum S_i \cdot P_i) / S_t$$

S_t : superficie total
 S_i : utilidad que se le da al suelo
 P_i : ponderación de la utilidad del suelo

Focos de contaminación: acciones que modifiquen la capacidad agrológica del suelo.

Efectos principales: - pérdida de suelo vegetal



Indicador del factor
 Suma ponderada de la superficie de cada tipo de uso del suelo (natural 1; forestal 0,8; agrícola 0,6; residencias 0,4; comercial 0,2; industrial 0) expresada en porcentaje de la superficie total.

$$100 \cdot (\sum S_i \cdot P_i) / S_t$$

Unidad de medida

- %
- MC
- SIN (A₂)
- CON (A₂)
- SIN (A₃)
- CON (A₃)

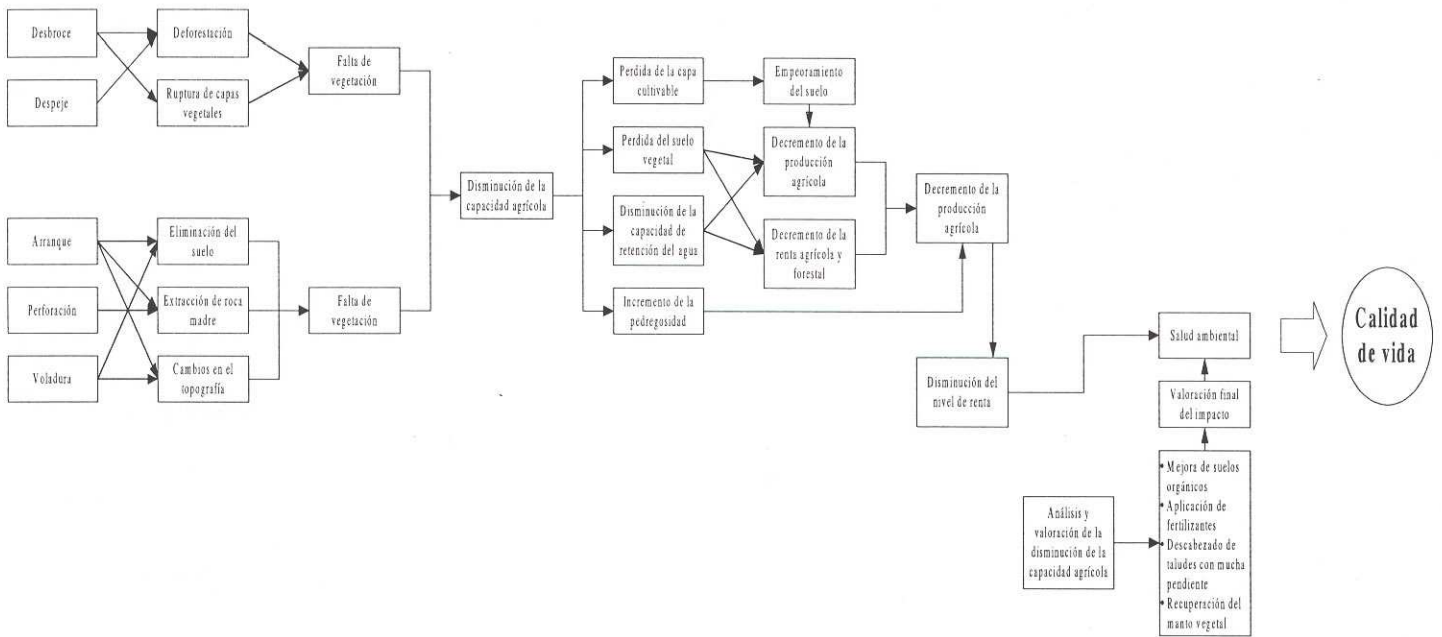
- disminución del valor del suelo
- eliminación de la productividad agrícola.
- incremento de la pedregosidad

Otros efectos:

Medida correctora:

- descenso de la renta agrícola y forestal
- recuperación del manto vegetal
- recuperación productiva del suelo
- repoblaciones forestales

Diagrama de causa y efecto sobre la disminución de la capacidad agrícola en el proyecto de la presente cantera



Impacto 6:

Pérdida de la calidad del agua superficial

- Incidencia: 0,241
- Significado: moderado
- Indicador: índice de calidad de agua
- Contaminante: sólidos en suspensión
- Unidad de medida: porcentaje
- Enunciado:

$$IKA = K \sum C_i P_i / \sum P_i$$

- C_i : valor porcentual asignado a los parámetros
- P_i : peso asignado a cada parámetro
- K : constante

Focos de contaminación: desarrollo de la explotación minera

- Efectos principales:
 - presencia de sólidos en suspensión en las aguas superficiales cercanas al proyecto
 - obstrucción de corrientes

Otros efectos: - reducción de la vida vegetal y animal

Medida correctora: balsas de decantación

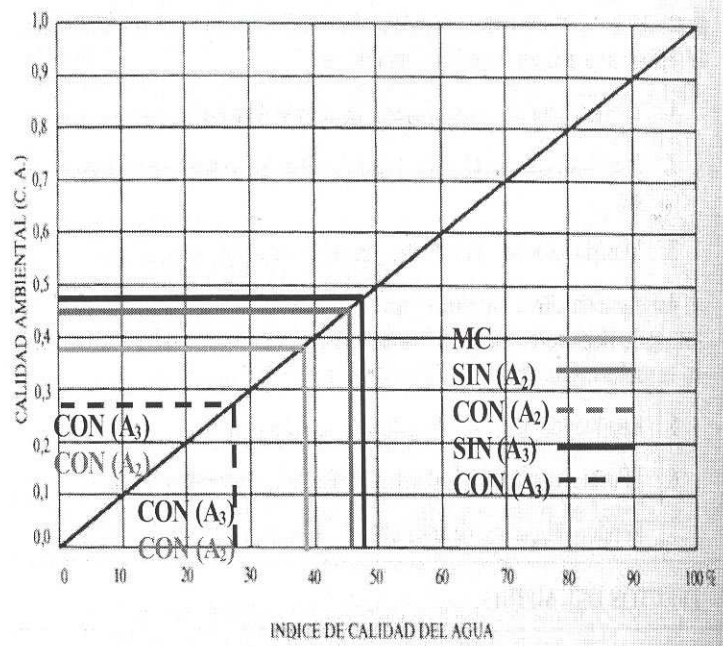
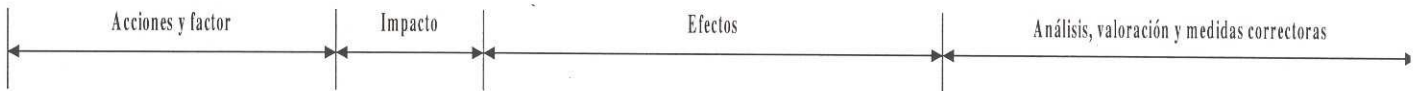
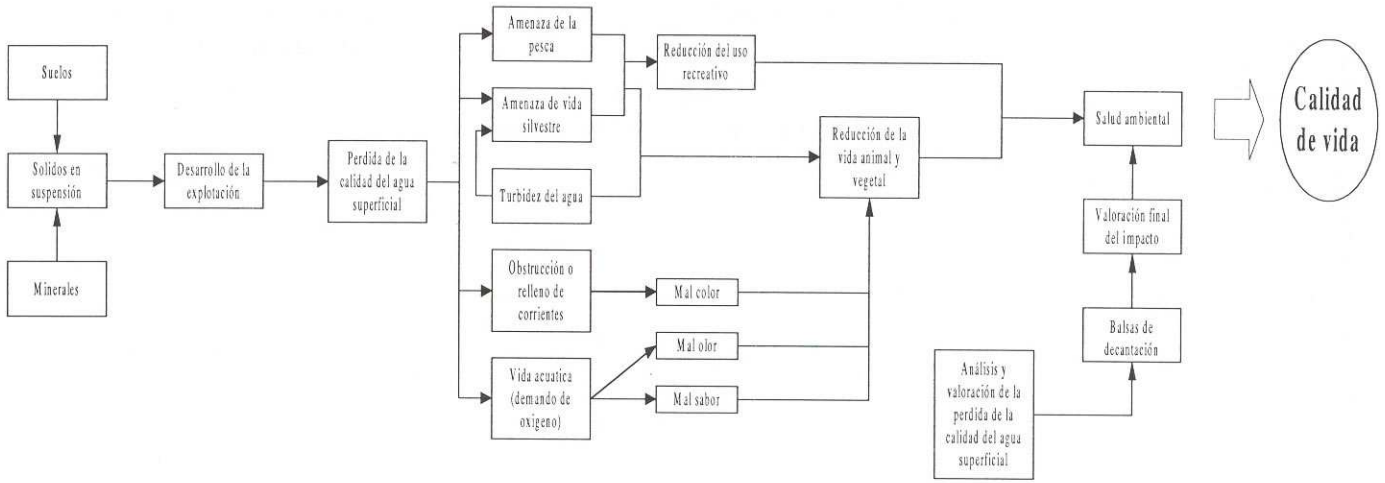


Diagrama de causa y efecto sobre la pérdida de la calidad del agua superficial en el proyecto de la presente cantera



Impacto 7: Degradación de las vías del acceso.

Incidencia: 0,310

Significado: moderado

Indicador: grado de destrucción del factor

Contaminante: desgaste rápido de vías de acceso

Unidad de medida: porcentaje

Focos de contaminación: tráfico de maquinaria

Efectos principales: - destrucción temprana de vías de acceso (carreteras, camino, etc.)

Otros efectos: - posibles accidentes viales

Medida correctora: pavimentación y mantenimiento firme de las vías

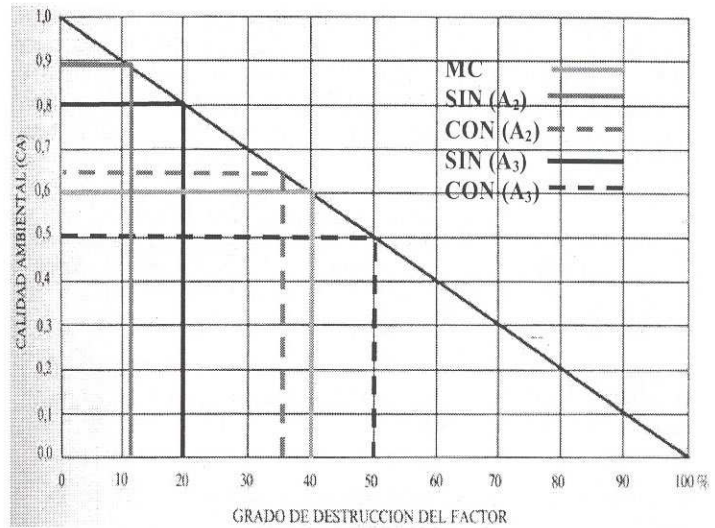
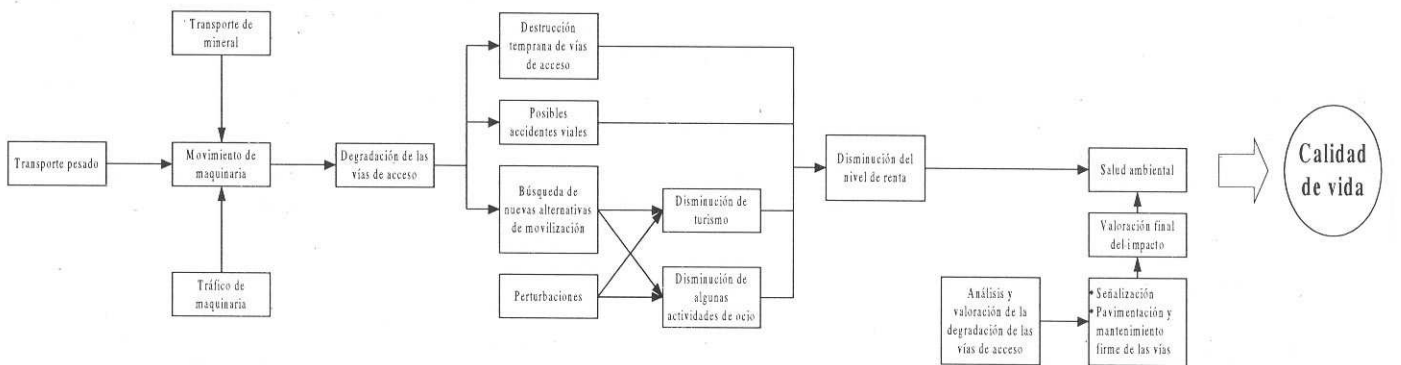


Diagrama de causa y efecto sobre la degradación de las vías de acceso en el proyecto de la presente cantera



Impacto 8: Destrucción de la cubierta vegetal.

Incidencia: 0,09
 Significado: compatible
 Indicador: índice de calidad del aire
 Contaminante: emisión de partículas de polvo
 Unidad de medida: miligramos por metros cúbicos
 Enunciado:

$$ICAIRE = K \sum C_i P_i / \sum P_i$$

C_i : valor porcentual asignado a los parámetros

P_i : peso asignado a cada parámetro

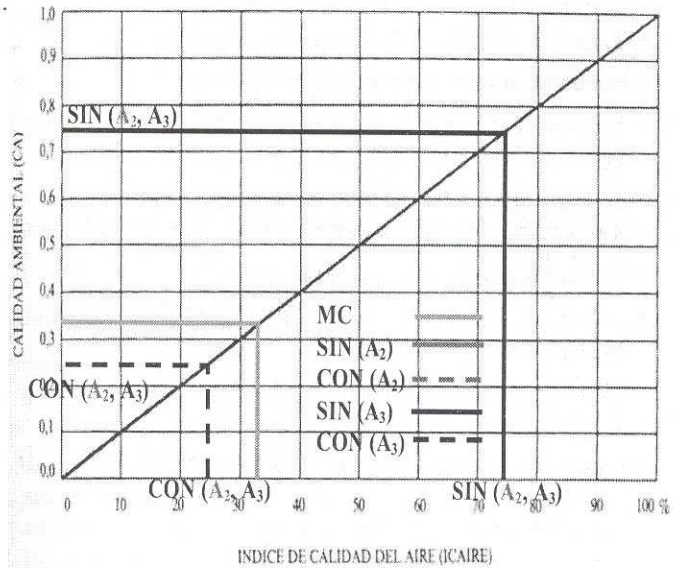
K : constante

Focos de contaminación: movimiento de suelos y roca

Efectos principales: - efectos sobre la visibilidad
 - efectos sobre el ecosistema terrestre
 - dispersión y transporte por el viento

Otros efectos: - incidencia sobre la salud y bienestar de los trabajadores

Medida correctora: riego periódico, permanente



Impacto 9: Extracción del recurso (caliza).

Incidencia: 0,379
 Significado: moderado
 Indicador: suelo afectado revalorizado
 Contaminante: cantera
 Unidad de medida: porcentaje
 Enunciado:

$$SR = 100 S_a \cdot C_r / S_t$$

S_t : superficie total del suelo

S_a : superficie afectada

C_r : coeficiente de revalorización

Focos de contaminación: explotación de mineral

Efectos principales: - menor revalorización del suelo
 - menor renta obtenida del suelo

Medida correctora: no se encontró

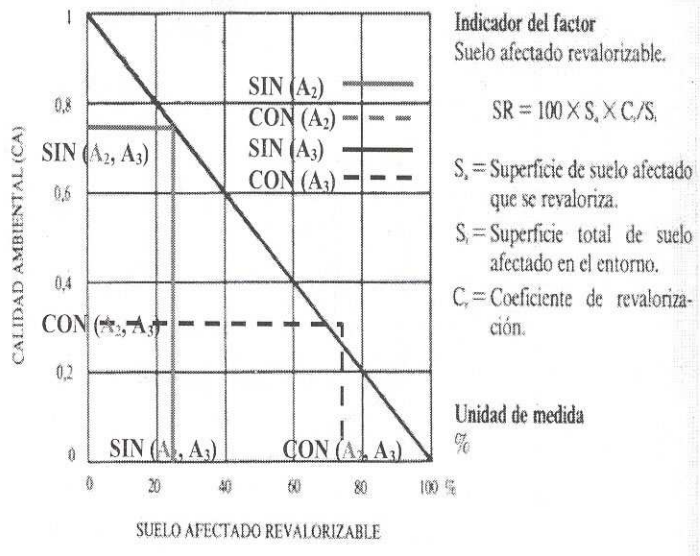
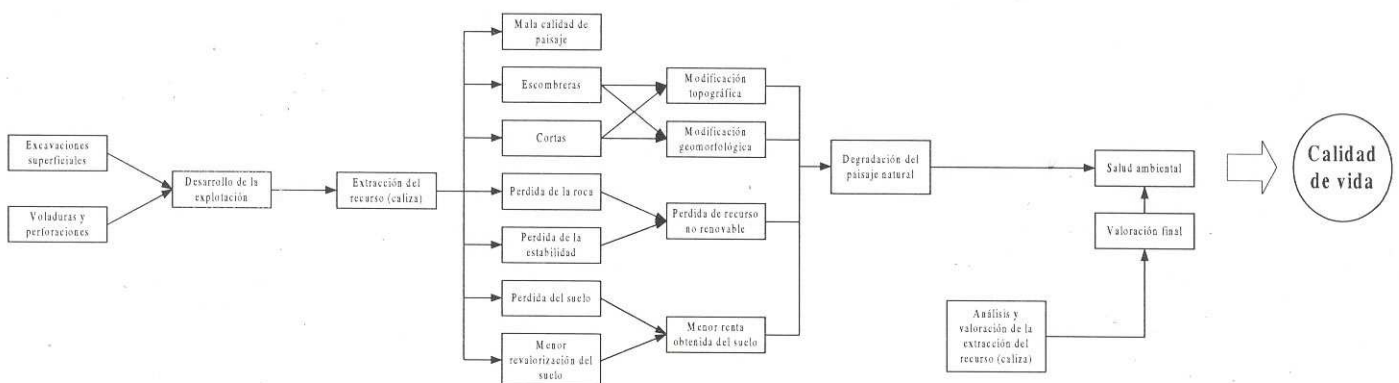
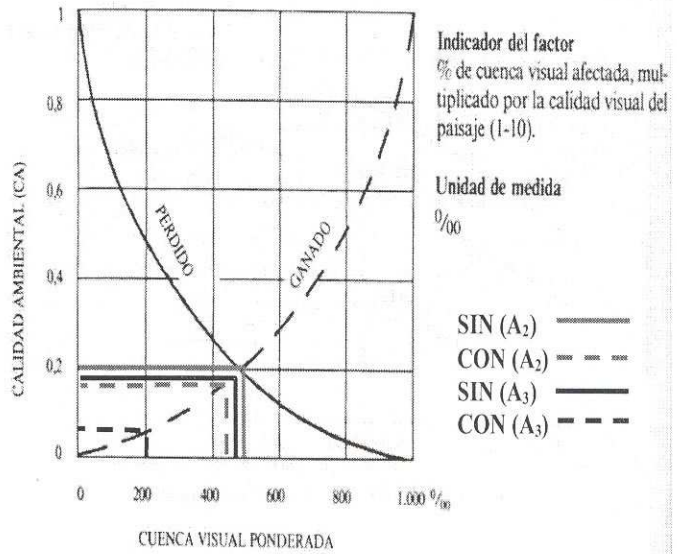


Diagrama de causa y efecto sobre la extracción de la caliza en el proyecto de la presente cantera



Impacto 10: Destrucción del paisaje.
 Incidencia: 0,333
 Significado: moderado
 Indicador: porcentaje de cuenca visual afectada multiplicada por la calidad visual del paisaje
 Contaminante: cantera
 Unidad de medida: porcentaje
 Focos de contaminación: desarrollo de explotación (arranque de bloques, perforación del terreno)
 Efectos principales: - pérdida del paisaje
 - pérdida de la calidad visual
 Medida correctora: - reforestación
 - descabezamiento de taludes



Impacto 11: Contaminación acústica.
 Incidencia: 0,345
 Significado: moderado
 Indicador: nivel de presión acústica
 Contaminante: emisión de ruido de maquinaria
 Unidad de medida: DBA
 Enunciado: estimación promedio de presión acústica con maquinaria
 Focos de contaminación: - tráfico de maquinaria
 - explotación minera
 Efectos principales: - efectos acumulativos
 - perturbación en el hábitat que rodea el proyecto
 Medida correctora: - instalación de silenciadores en maquinaria
 - revestimiento con goma a las tolvas y cajas de camiones

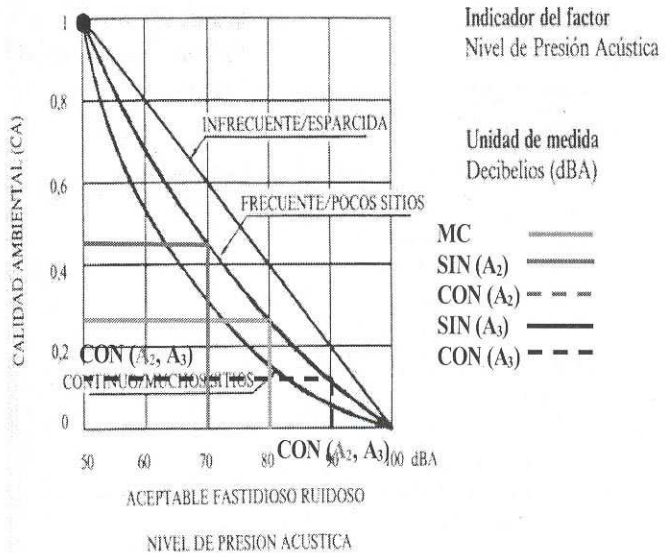
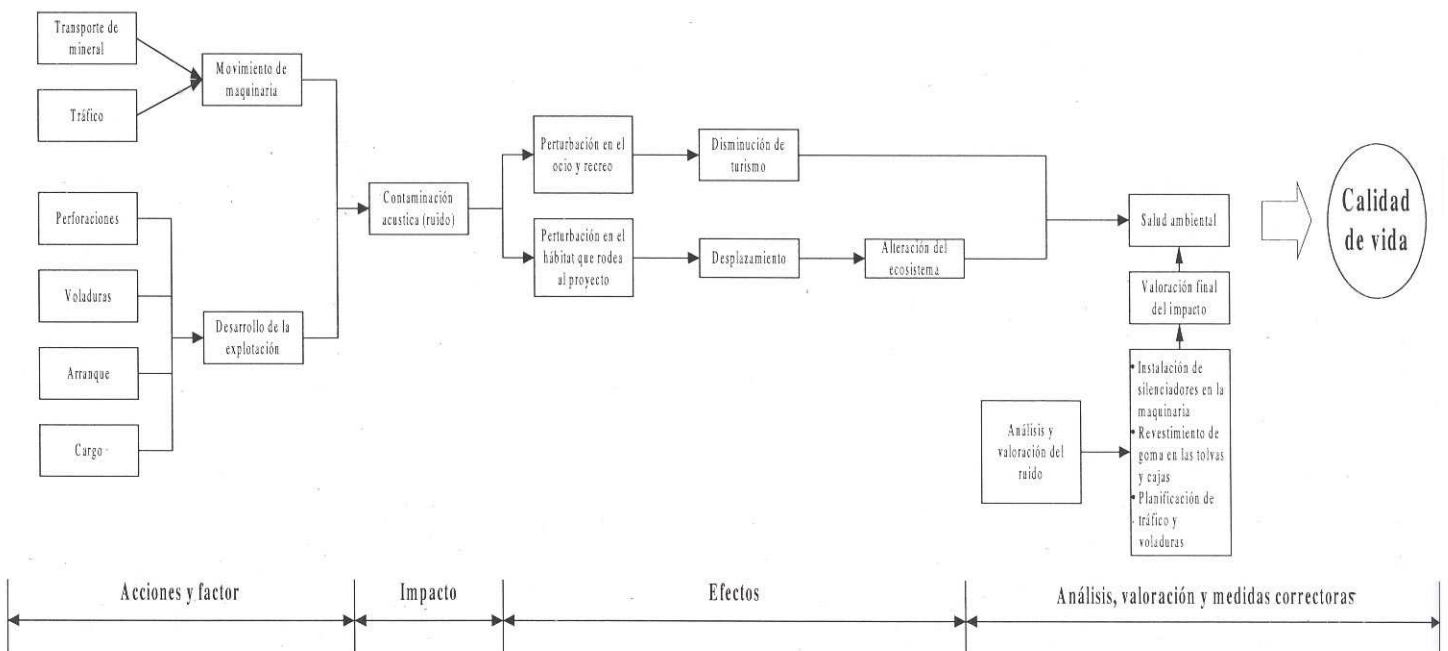


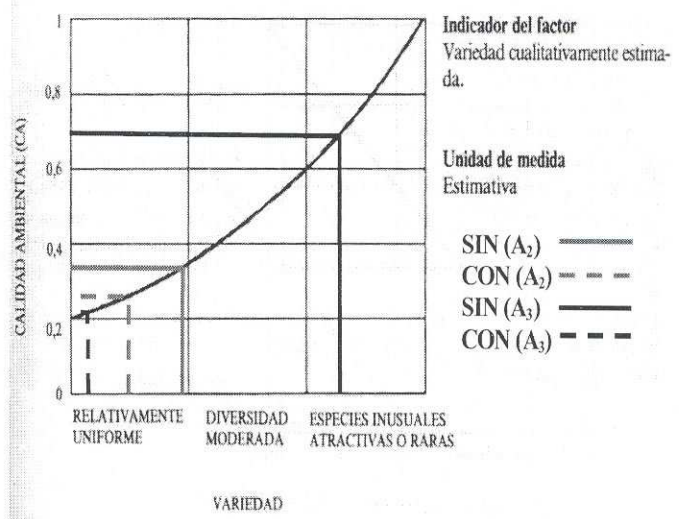
Diagrama de causa y efecto sobre la contaminación acústica en el proyecto de la presente cantera



Impacto 12: Afeción de recubrimiento de tierra a favor de la flora.

Incidencia: 0,276
 Significado: moderado
 Indicador: variedad cualitativa estimada
 Unidad de medida: adimensional
 Efectos principales: - revegetación
 - reforestación
 - desplazamiento faunístico a favor del entorno

Medida correctora: utilización de fertilizantes e incremento de la riqueza orgánica del suelo



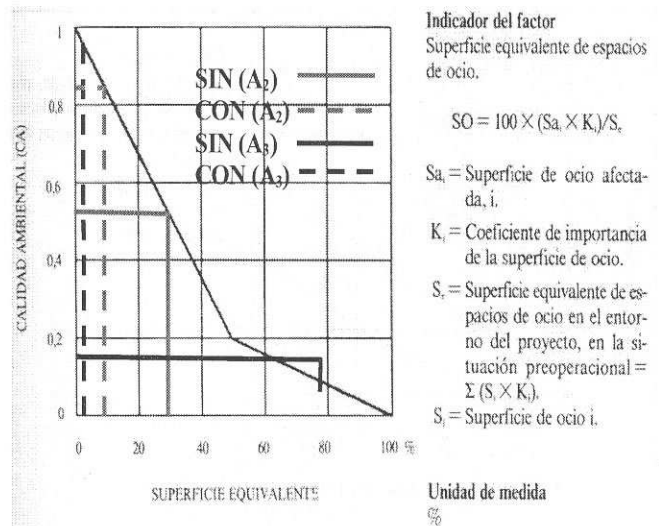
Impacto 13: Incremento del ocio y recreo.

Incidencia: 0,344
 Significado: moderado
 Indicador: superficie equivalente de espacios de ocio
 Unidad de medida: porcentaje
 Enunciado: $SO = 100 \cdot (Sa_i \cdot K_i) / S_e$

Sa_i : superficie de ocio afectada
 K_i : coeficiente de importancia de la superficie de ocio
 S_e : superficie equivalente de espacios de ocio

Efectos principales: - incremento de la caza
 - incremento de las actividades recreativas

Otros efectos: renovación del número de especies vegetales



Indicador del factor: Superficie equivalente de espacios de ocio.

$$SO = 100 \times (Sa_i \times K_i) / S_e$$

Sa_i = Superficie de ocio afectada, i.

K_i = Coeficiente de importancia de la superficie de ocio.

S_e = Superficie equivalente de espacios de ocio en el entorno del proyecto, en la situación preoperacional = $\sum (S_i \times K_i)$.

S_i = Superficie de ocio i.

Unidad de medida: %

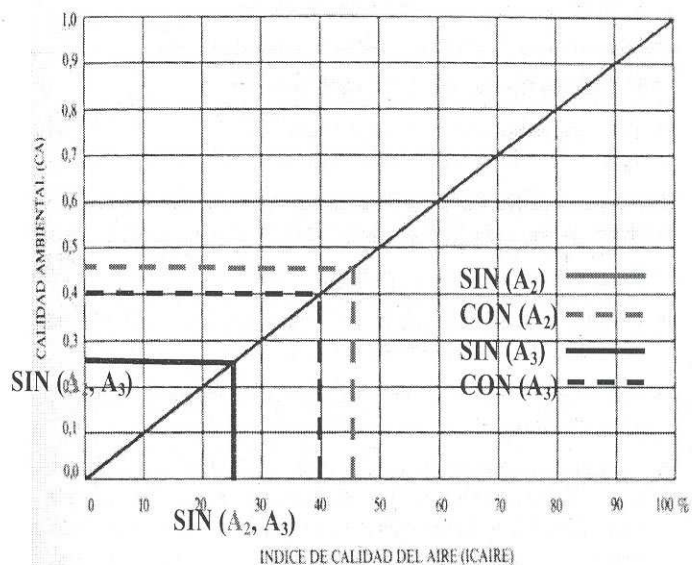
Impacto 14: Mejora de la calidad del aire.

Incidencia: 0,310
 Significado: moderado
 Indicador: índice cualidad del aire
 Unidad de medida: adimensional (10-100)
 Enunciado: $ICAIRE = K \sum C_i P_i / \sum P_i$

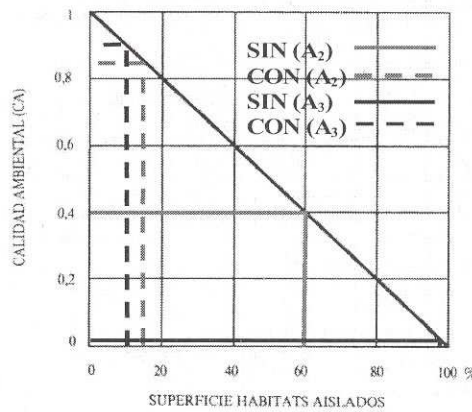
C_i : valor porcentual asignado a los parámetros
 P_i : peso asignado a cada parámetro
 K : constante

Efectos principales: - aumento de la fijación y reciclaje del CO₂ atmosférico

Otros efectos: - mejora de la calidad visual
 - mayor potencial recreativo
 - mejor calidad de vida



Impacto 15: Introducción indirecta de fauna.
 Incidencia: 0,252
 Significado: moderado
 Indicador: movilidad de especies
 Unidad de medida: porcentaje



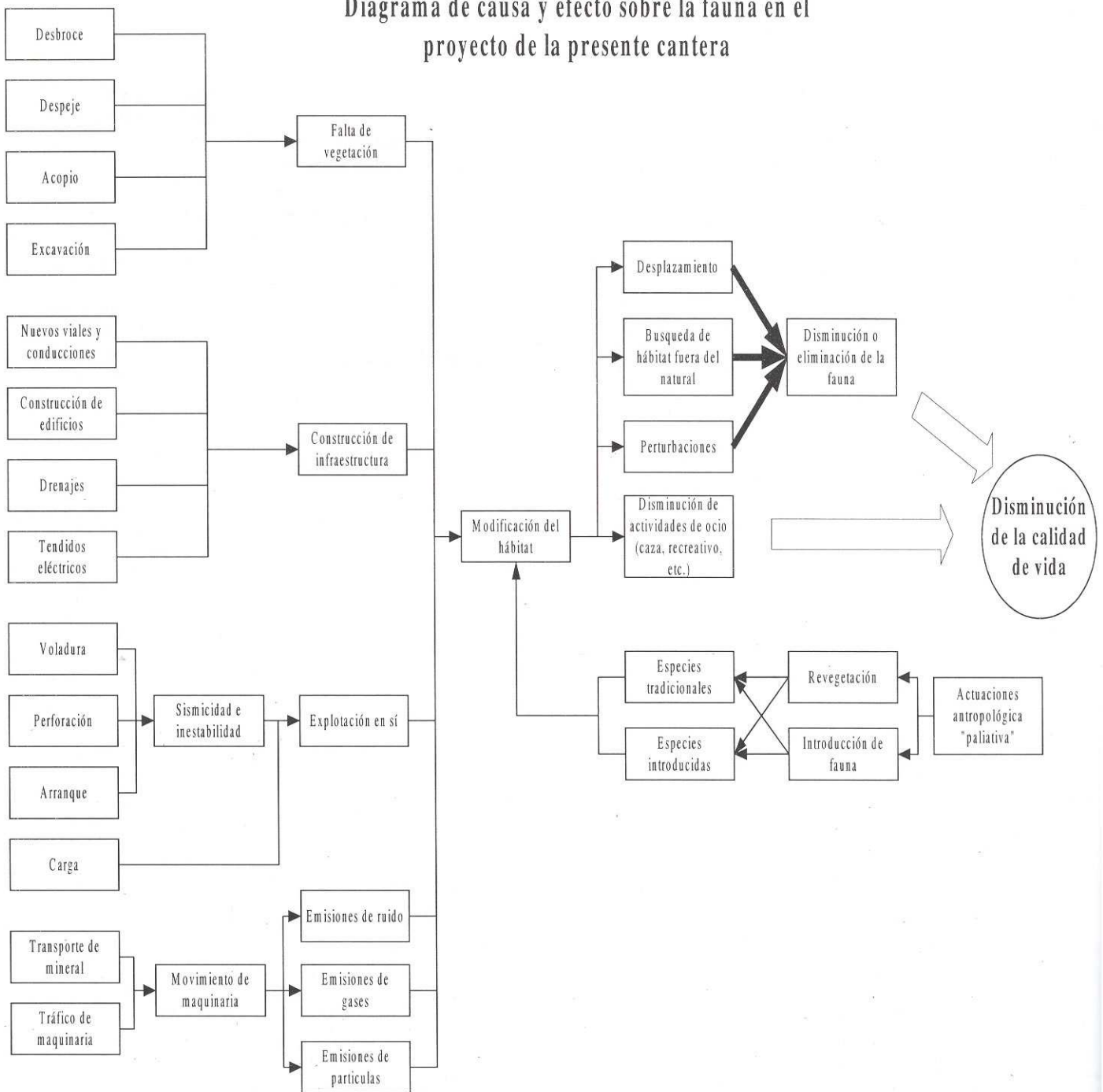
Indicador del factor
 Superficie de habitats faunísticos aislados por el efecto barrera.

$$SH = 100 \sum (Sh_i \times K_i) / S_e$$

Sh_i = Superficie de hábitat i, aislado.
 K_i = Coeficiente de conservación del hábitat i.
 S_e = Superficie equivalente del hábitat faunístico en el entorno del proyecto ($\sum Sh_i \times K_i$)
 Sh = Superficie total del hábitat i, en la situación preoperacional.

Unidad de medida
 %

Diagrama de causa y efecto sobre la fauna en el proyecto de la presente cantera



Enunciado:

$$SH=100 \sum (Shq \cdot K_i) / S_c$$

Sh_i : superficie de hábitat i, aislado

K_i : coeficiente de conservación del hábitat i

S_c : superficie equivalente del hábitat faunístico

Efectos principales: - recuperación parcial de valores naturalísticos

- recuperación parcial de continuo del patrimonio faunístico
- reducción de la alteración de los procesos ecológicos
- disminución de desequilibrios en los ecosistemas

Por lo que se obtiene como magnitudes de los impactos la siguiente tabla:

Tabla 4 Magnitudes de la Alternativa 3

Impacto	Indicador	Unds. Hetero.		Unds. Homo.		Diferencia
		SIN	CON	SIN	CON	
I ₁	% de superficie cubierta	49,280	0,0	0,8	0,0	0,8
I ₂	Valor ecológico del biotipo	28,33	24,00	0,426	0,348	0,078
I ₃	Suma ponderada de la superficie de cada clase de suelo	70,872	59,821	0,721	0,591	0,13
I ₄	Valor relativo del paisaje	48,22	7,95	0,774	0,325	0,449
I ₅	Suma ponderada de la superficie de cada clase de suelo	59,821	2,31	0,591	0,03	0,561
I ₆	Indice de calidad de agua	46,67	27,78	0,46	0,27	0,19
I ₇	Grado de destrucción del factor	20	50	0,8	0,5	0,3
I ₈	Indice de calidad del aire	75	25	0,75	0,25	0,50
I ₉	Suelo afectado revalorizable	17,68	79,59	0,84	0,21	0,63
I ₁₀	% de cuenca visual afectada multiplicada por la calidad visual de paisaje	480	200	0,2	0,05	0,15
I ₁₁	Nivel de Presión acústica	50	90	1	0,15	0,85
I ₁₂	Variedad cualitativamente estimada	Especies inusuales atractivas	Relativa-mente uniforme	0,69	0,2	0,48
I ₁₃	Superficie equivalente de espacios de ocio	79,59	0,044	0,1	1	- 0,9
I ₁₄	Indice de calidad del aire	75	40	0,75	0,4	0,35
I ₁₅	Movilidad de especies	99,99	11,559	0,01	0,9	- 0,89

Teniendo como totalización parcial del impacto causado por la cantera los siguientes resultados:

Tabla 5 Tabla de totalización parcial del impacto de la cantera

IMP.	INCIDENCIA x PESO x MAGNITUD	VALOR DEL IMPACTO
I ₁	0.712 x 120 x 0.8	68.352
I ₂	0.494 x 150 x 0.078	5.779
I ₃	0.712 x 45 x 0.13	4.165
I ₄	0.586 x 80 x 0.449	21.049
I ₅	0.586 x 70 x 0.561	23.012
I ₆	0.241 x 17 x 0.19	0.778
I ₇	0.310 x 10 x 0.3	0.93
I ₈	0.090 x 55 x 0.50	2.475
I ₉	0.379 x 16 x 0.63	3.820
I ₁₀	0.333 x 120 x 0.15	5.994
I ₁₁	0.345 x 50 x 0.85	14.662
I ₁₂	0.276 x 80 x 0.48	10.598
I ₁₃	0.344 x 15 x 0.9	- 4.664
I ₁₄	0.310 x 55 x 0.35	- 5.967
I ₁₅	0.252 x 60 x 0.89	- 13.457
Total:		137.526

Valoración de las medidas correctoras o minimizadoras

Dadas las medidas correctoras escritas para cada

impacto se procedió a analizarlas cuantitativamente de lo que se puede obtener los siguientes valores:

Tabla 6 Tabla de importancia e incidencia de las medidas correctoras

IMPACTO	IMPORTANCIA	INCIDENCIA
I ₁	58	0,5172
I ₃	56	0,4942
I ₄	44	0,356
I ₅	56	0,4942
I ₆	30	0,3448
I ₇	38	0,4367
I ₈	37	0,2758
I ₁₁	33	0,2298

Homogenizando las medidas correctoras y hallando el valor del impacto total de las medidas correctoras:

Tabla 7 Tabla de magnitudes de las medidas correctoras

Imp acto	Indicador	MC	Unds. Hete.		Unds. Homo		Diferencia
			SIN	CON	SIN	CON	
I ₁	% de superficie cubierta	Revegetación y Protección de vegetación periférica	0,0	19,91	0,00	0,435	0,435
I ₃	Suma ponderada de la superficie de cada clase de suelo	Recuperación para la utilización ecológica.	59,82	79,73	0,591	0,793	0,22
I ₄	Valor relativo del paisaje	Pantalla Vegetal	7,95	37	0,325	0,7	0,375
I ₅	Suma ponderada de la superficie de cada clase de suelo	Recuperación productiva del Suelo	2,31	59,82	0,03	0,59	0,56
I ₆	Indice de calidad de agua	Balsas de decantación	27,78	38,88	0,27	0,38	0,11
I ₇	Grado de destrucción del factor	Pavimentación y mantenimiento firme de las vías	50	40	0,5	0,6	0,1
I ₈	Indice de calidad del aire	Riego Periódico, permanente	25	32,5	0,25	0,32	0,07
I ₁₁	Nivel de Presión acústica	Instalación de silenciadores y revestimiento con goma tolvas y cajas de camiones	90	80	0,15	0,26	0,11

Tabla 8 Tabla de valoración total de las medidas correctoras

IMP.	$VI = I$ <i>INCIDENCIA x PESO x MAGNITUD</i>	VALOR DEL IMPACTO
I ₁	0.517 x 120 x 0.435	2.698
I ₃	0.494 x 45 x 0.22	4.89
I ₄	0.356 x 80 x 0.375	10.69
I ₅	0.494 x 70 x 0.56	19.364
I ₆	0.345 x 17 x 0.11	0.645
I ₇	0.436 x 10 x 0.1	0.436
I ₈	0.275 x 55 x 0.25	3.781
I ₁₁	0.229 x 50 x 0.11	1.26
Total de las medidas correctoras:		43.764

VALOR TOTAL O FINAL

Tabla 9 Tabla de valoración del impacto total de la cantera

Impacto	Valor inicial	Impacto total parcial	Impacto final o total
I ₁	68.352	2.698	65.654
I ₂	5.779	-	5.779
I ₃	4.165	4.89	+ 0.725
I ₄	21.049	10.69	10.359
I ₅	23.012	19.364	3.648
I ₆	0.778	0.645	0.133
I ₇	0.93	0.436	0.494
I ₈	2.475	3.781	+ 1.306
I ₉	3.82	-	3.800
I ₁₀	5.994	-	5.994
I ₁₁	14.662	1.26	13.402
I ₁₂	10.598	-	10.598
I ₁₃	+ 4.664	-	+ 4.664
I ₁₄	+ 5.967	-	+ 5.967
I ₁₅	+ 13.457	-	+ 13.457
Total:	- 137.526	+ 43.764	- 93.762

ALTERNATIVAS

Debido al alto impacto que causaría la cantera en esa zona se trató de generar alternativas basadas en el modelo empírico, es decir en experiencia y en criterio del equipo del trabajo. Basados en la elevada afección negativa que tiene el proyecto sobre el paisaje y la vegetación es que se desarrollaron tres alternativas de localización.

G.1. Alternativa N° 1

Debida que posee una cota más alta que la del proyecto, se buscará que la explotación se realice desde un punto más bajo hacia un punto más alto rebajando gradualmente la cota y adaptándonos las formas del terreno. Reduciendo así el impacto visual por encontrarse alejado de las vías del acceso y por la pantalla vegetal de los alrededores.

G.2. Alternativa N° 2

Donde se propone la ampliación de una cantera ya existente. El impacto visual sería menor en esta cantera por encontrarse en una zona estepa cerealista y por la convivencia de la población con esta pequeña cantera.

Los calculos efectuados nos arrojaron los siguiente datos:

Tabla 10 Tabla de magnitudes de la Alternativa 2

Impacto	Indicador	Unds. Hetero.		Unds. Homo.		Diferencia
		SIN	CON	SIN	CON	
I ₁	% de superficie cubierta	39,891	0,0	0,69	0,0	0,69
I ₂	Valor ecológico del biotipo	23,33	22,34	0,35	0,31	0,04
I ₃	Suma ponderada de la superficie de cada clase de suelo	59,89	48,86	0,59	0,48	0,11
I ₄	Valor relativo del paisaje	40,135	29,67	0,735	0,65	0,085
I ₅	Suma ponderada de la superficie de cada clase de suelo	48,862	0,948	0,48	0,09	0,39
I ₆	Indice de calidad de agua	46,67	27,78	0,46	0,27	0,19
I ₇	Grado de destrucción del factor	11	35	0,89	0,65	0,24
I ₈	Indice de calidad del aire	75	25	0,75	0,25	0,5
I ₉	Suelo afectado revalorizable	19,24	76,586	0,805	0,27	0,535
I ₁₀	% de cuenca visual afectada multiplicada por la calidad visual de paisaje	500	450	0,2	0,15	0,05
I ₁₁	Nivel de Presión acústica	70	90	0,49	0,15	0,34
I ₁₂	Variedad cualitativamente estimada	Relativamente uniforme	Relativamente uniforme	0,35	0,25	0,1
I ₁₃	Superficie equivalente de espacios de ocio	28,862	9,62	0,56	0,89	- 0,33
I ₁₄	Indice de calidad del aire	25%	45%	0,25	0,45	0,2
I ₁₅	Movilidad de especies	60	14,66	0,	0.	- 0,5

Teniendo como totalización parcial del impacto causado por la alternativa 2 los siguientes resultados:

Tabla 11 Tabla de totalización de impactos de la alternativa 2

IMP.	INCIDENCIA x PESO x MAGNITUD	VALOR DEL IMPACTO
I ₁	0.310 x 120 x 0.69	25.696
I ₂	0.183 x 150 x 0.04	1.103
I ₃	0.195 x 45 x 0.11	0.965
I ₄	0.195 x 80 x 0.085	1.328
I ₅	0.218 x 70 x 0.39	5.962
I ₆	0.241 x 17 x 0.19	0.779
I ₇	0.149 x 10 x 0.24	0.358
I ₈	0.137 x 55 x 0.50	3.793
I ₉	0.275 x 16 x 0.535	2.361
I ₁₀	0.195 x 120 x 0.05	1.172
I ₁₁	0.091 x 50 x 0.34	1.563
I ₁₂	0.310 x 80 x 0.1	2.482
I ₁₃	0.195 x 15 x 0.33	- 0.967
I ₁₄	0.264 x 55 x 0.2	-2.907
I ₁₅	0.333 x 60 x 0.5	-9.999
Total:		33,689

G.1. Alternativa N° 3

La misma ubicación del proyecto.

EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

Se basó en los siguientes criterios: flora (C₁), fauna (C₂), calidad visual (C₃), alteración paisajística (C₄), cambio del uso del suelo (C₅), ocio y recreo (C₆), y atribuyendo una escala sencilla representativa del comportamiento de cada alternativa tenemos:

- +2: muy positivo
 - +1: positivo
 - 0: medio
 - 1: insuficiente
 - 2: muy insuficiente
- obteniendo la siguiente matriz:

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	SUMATOTAL
A ₁	-2	-2	0	-1	-1	-2	-8
A ₂	0	0	0	-1	0	2	1
A ₃	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-7

Según la matriz la mejor alternativa sería la A₂. También se constató esta valoración simple mediante dos puntos:

$$V_{ai} = \frac{\sum (V_{ij} \cdot P_j)}{\sum P_j}$$

donde:

- V_{ai}: valoración de la alternativa,
- V_{ij}: valoración de la alternativa respecto al criterio,
- P_j: peso de cada criterio.

Se utilizará una escalar de referencia, donde 1 representa una aproximación muy escasa a la consecución del criterio, mientras que 10 el cumplimiento totalmente satisfactorio.

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
Pesos	9	8	9	9	6	5
A ₁	2	1	7	3	2	3
A ₂	6	7	4	4	5	6
A ₃	3	2	2	3	3	4

Según la matriz de evaluación de alternativas por agregación total, se obtiene:

- A₁ = 3,10
- A₂ = 5,26
- A₃ = 2,73

Cabe recalcar que según los datos obtenidos cuantitativamente en la alternativa 3 con un impacto final de -93.762 (incluidas las medidas correctoras), y en la alternativa 2 con un impacto de 33.689 (sin medidas correctoras) siendo este último la opción a tomar para la realización del proyecto.

BIBLIOGRAFIA

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (1997).- *Datos estadísticos de los municipios de la Junta de Castilla y León*. Editorial del I.N.E., Madrid, 195p

I.N.E. (1989).- *Censo Agrario. Tomo R. Resumen nacional por comunidades autónomas y provincias*. Editorial del I.N.E., Madrid, 205p

I.N.E. (1991).- *Censo de Población. Densidad de población de los municipios españoles. Mapas provinciales*. Editorial del I.N.E., Madrid, 118p

I.N.E. (1996).- *Padrón municipal de habitantes a 1 de mayo de 1996. Población de los municipios españoles*. Editorial del I.N.E. Madrid, 240p

CÁMARA DE COMERCIO E INDUSTRIA DE VALLADOLID (1995).- *Censo comercial e industrial de Valladolid. Listado por municipios*. Reprografía Mata, Valladolid, 621p

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (1997).- *Libro verde de medio ambiente en Castilla y León*. Edit. Junta de CyL., Valladolid, 203p

GOMEZ OREA, DOMINGO (1994).- *Ordenación del territorio*. Edit. Agrícola Española S.A., Madrid, 238p

INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA (1989).- *Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería*. Edit. ITGE., Madrid, 321p

I.T.G.E. (1996).- *Evaluación y corrección de impactos ambientales*. Edit. ITGE., Madrid, 256p

I.T.G.E. (1993).- *Estudios de viabilidad en proyectos mineros*. Editorial ITGE., Madrid, 203p

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (1996).- *Indicadores ambientales. Una propuesta para España*. MMA Centro de Publicaciones, Madrid, 187p

MMA (1993).- *Guía para la elaboración de estudios del medio físico*. MMA Centro de Publicaciones, Madrid, 809p

HERNÁNDEZ NAVARRO S. (1998).- *Manual de paisajismo*. Edit. UVA, Palencia, 162p

V. CONESA, FERNÁNDEZ-VITORA (1997).- *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental*. 3ª ed. Ediciones Mundi Prensa, Valladolid, 407p

GOMEZ OREA D. (1998).- *Evaluaciones de impacto ambiental*. Edit. Agrícola Española S.A., Madrid, 260p

JUNCEDA MORENO J. (2001).- *Minería, medio ambiente y ordenación del territorio*. Civitas, Madrid, 380p

PEDRAZA GIBANZ J. (1981).- *Geología y medio ambiente*. Edit. de Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid, 462p

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1984).- *Risk Assessment and Management Framework for Decision Making*. Ed. U.S. EPA, 37p

MAYSTRE L. Y., PICTET J. & SIMOS J. (1994).- *Méthodes Multicritères Électre*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 323p

CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE Y ORDENACIÓN DEL TERRITORIO (1996) - Recopilación de normativa sobre Evaluación de Impacto Ambiental de la Comunidad Autónoma de Castilla y León. Edit. Junta de CyL., 96p

CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE Y ORDENACIÓN DEL TERRITORIO (1991).- Decreto 329/1991, sobre Restauración de Espacios Naturales afectados por Actividades Mineras. *B.O. CyL. 21-11-1991*

CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE Y ORDENACIÓN DEL TERRITORIO (1982).- Real Decreto 2994/1982, sobre Restauración del Espacio Natural afectado por Actividades Mineras. *B.O.E., 294, 1982*

PREVENCIÓN DE LA GENERACIÓN DE AGUAS ACIDAS DE MINA

Jorge TOVAR PACHECO

*TRC Hydro-Geo Ingeniería S.A.C. Av. Central 671 Of. 702 - Lima 27, Perú
Teléfono: + 51 1 212 4010, Fax: + 51 1 212 4989
e.mail: jtovar@trc.com.pe*

RESUMEN

El agua es el elemento fundamental en la formación de aguas ácidas de mina, en presencia de aire y bacterias, actúa como reactivo en la oxidación de la pirita, la cual se encuentra tanto en el mineral, como en la roca encajonante. Es muy frecuente que el material de desmonte, carente de mineral económico, esté compuesto por importantes porcentajes de sulfuros de hierro como la pirita. Este desmonte generalmente es acumulado en las bocaminas y botaderos, y es además el principal constituyente de los relaves.

En muchos casos, las cavidades dejadas por el minado subterráneo o a tajo abierto son rellenadas con desmonte o con relave, material que debido a su contenido piritoso facilita la generación de aguas ácidas.

Para controlar la generación de aguas ácidas en las minas, es casi imposible erradicar la pirita, por lo que es preferible manejar el ingreso de agua y aire a las labores mineras, con lo cual puede reducirse drásticamente el problema. Existen técnicas preventivas basadas principalmente en el manejo del agua, las cuales están referidas a lo siguiente:

- Desvío de aguas superficiales y subterráneas.
- Sellado con arcilla, compactación del relleno e impermeabilización de la superficie de escombreras y relaveras.
- Manipulación de la cobertura y colocación de lechos de caliza.
- Inhibición bacteriana mediante bacterias, detergentes aniónicos, sustancias orgánicas conservantes, e inyección alcalina.

El impacto ambiental ocasionado por la descarga de aguas ácidas al ecosistema hidrográfico es diverso. Pueden causar impactos estéticos y recreacionales al sistema fluvial, la degradación de aguas potables e industriales, o el envenenamiento lento de lagos.

ABSTRACT.- GROUNDWATER VULNERABILITY IN MINING ACTIVITY AND PREVENTION OF ACID WATER GENERATION.

Water is the main element in the mine acid water generation, in the presence of air and bacteria acts as reactive in the pyrite oxidation, which occurs both in ore and in the host rock. It is frequent that the waste rock material, free of economic mineral, contains important percentages of iron sulfides like pyrite. This waste rock is usually accumulated in adits and waste dams, and is the main component of the tailings.

In many cases, the cavities left by the underground mining or at open pits are filled up with waste rock or tailings, that owing to its pyrite content facilitates the acid water generation.

In order to control the acid water generation in mines, it is almost impossible to extract the pyrite. It is therefore preferable to manage the air and water within the mining workings, and the problem can be drastically reduced. Preventive techniques in water manage exist, which are referred as follows :

- Surface and groundwater derivation.
- Sealing with clay, landfill compaction and waterproofing of the tailings and dump surface.
- Cover handling and limestone beds placement.
- Bacterial inhibition through bacterial, anionics detergents, preservant organic substances and alkaline injection.

The environmental impact caused by the acid water discharge to the hydrographic ecosystem is diverse. It can cause aesthetic and recreational impacts in the fluvial system, the potable and industrial water degradation, or the slow poisoning of lakes.

ORIGEN Y GENERALIDADES

Aunque se sabe, que los elementos esenciales para la formación del agua ácida de mina son el agua, el aire, las bacterias y la pirita, no existe todavía ningún método estandarizado para reducir la producción de estos efluentes ácidos de mina.

El agua es el elemento fundamental en la formación de aguas ácidas de mina. Actúa como reactivo en la oxidación de la pirita, como medio en el cual se desarrollan las reacciones, y como elemento de transporte de los productos formados. La pirita puede encontrarse tanto en el mineral como, en la roca encajonante (fig.1).

El problema de contaminación queda planteado cuando las aguas de mina tienen acceso directo a sistemas hidrológicos superficiales o a sistemas acuíferos subterráneos susceptibles de utilización.

Antes de desarrollarse las actividades mineras en un determinado lugar, es muy reducida la cantidad de pirita expuesta a las condiciones bajo las cuales se producen aguas ácidas. Las operaciones de minería implican la exposición de la pirita a la acción de aguas superficiales o subterráneas, y permiten su oxidación.

Los sulfuros se oxidan a sulfatos de hierro solubles, en la superficie de las rocas meteorizadas, los cuales forman costras salinas, ocre-amarillentas, que serán disueltas e hidrolizadas por aguas de lluvia, generando aguas ácidas.

El primer paso de la reacción libera ión ferroso, que se oxida a férrico y forma oxihidróxidos, los cuales dan el color ocre-amarillento característico de esta agua de mina. Estos precipitados de hidróxido de hierro, constituyen los llamados «yellow boy», frecuentes en los arroyos de muchas minas de carbón. Una tonelada de

carbón, que contenga un 1% de azufre pirítico, puede producir, potencialmente, 15 kg de «yellow boy» y 25 kg de ácido sulfúrico. El ritmo de producción ácida es muy variable, y se ha comprobado que algunas minas y escombreras, abandonadas, pueden producir aguas ácidas durante más de cincuenta años.

Con algo más de detalle, el mecanismo de degradación de la calidad del agua, es el siguiente:

- Oxidación de la pirita, al existir condiciones aerobias, y una vez que las labores mineras han alcanzado la mineralización.
- Oxidación de los otros sulfuros, menos oxidables, por la acción de las aguas ácidas que ha producido la pirita.
- Lixiviación de arcillas, carbonatos y feldespatos, por las aguas ácidas formadas.
- Deposición de los iones disueltos, formando costras y masas de sulfato. Se ha comprobado la presencia de sulfatos de magnesio (epsomita), calcio (yeso), hierro (melanterita), y otros.
- Disolución de los sulfatos, una vez que el drenaje ha dejado de actuar y el agua subterránea circula de nuevo por la roca. En este momento el agua se contamina.

El resultado es que las aguas adquieren bajo pH y altas concentraciones de sulfatos, cationes alcalinos, y metales pesados y de transición (fig.2).

Sin embargo, existen aguas contaminadas que no son ácidas. Esto se explica por la acción neutralizadora de dolomías o de rocas carbonatadas, en general, en las que se desarrolle la mineralización o que el agua ácida encuentre en su flujir subterráneo (este es el caso de algunas minas, de sulfuros complejos, en rocas

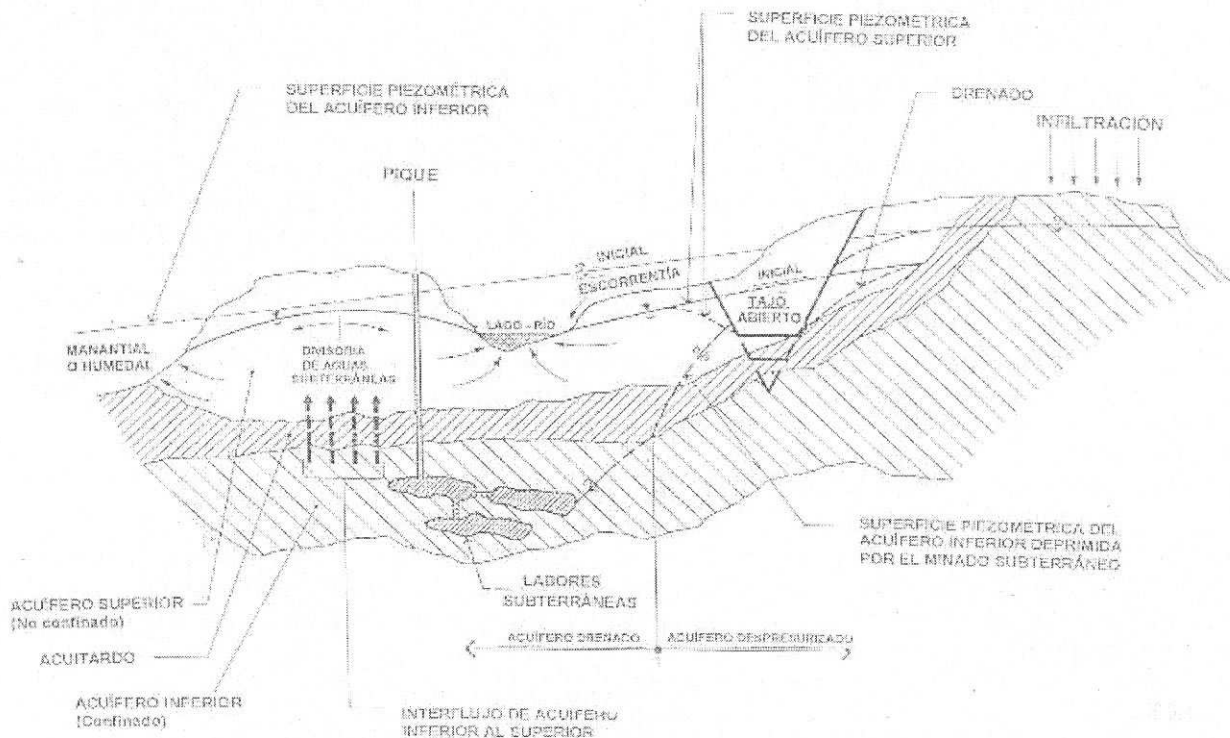


Figura 1: Agua subterránea afectada por la minería

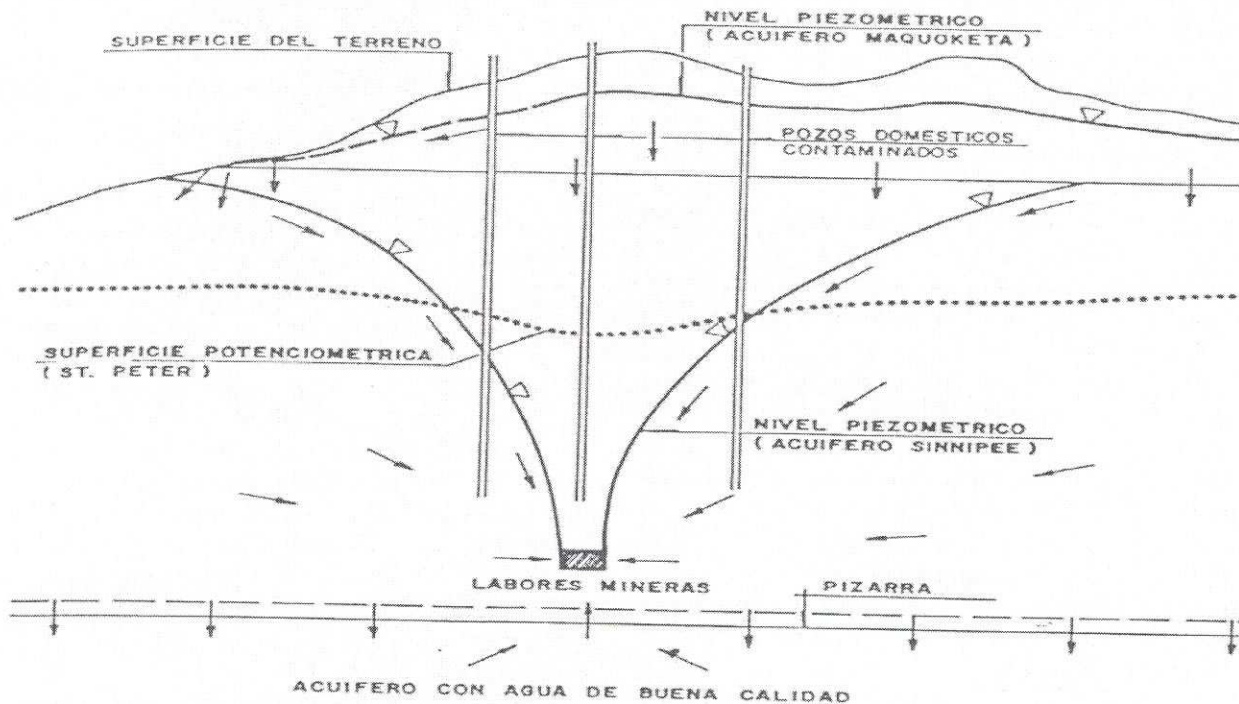


Figura 2: Tras el abandono de una mina subterránea, el cono de depresión desaparece y el agua invade las áreas con sulfuros

carbonatadas). El elevado contenido del agua en calcio y magnesio demuestra que, efectivamente, la dolomía se disuelve para neutralizar el pH. Además de la dureza, el agua presenta contenidos altos en sulfatos, así como en algunos metales pesados, que con este pH no han precipitado aún.

La calidad y cantidad de agua ácida que se produce, en los desechos piríticos, depende de diversos factores:

- La cantidad de pirita presente y el tamaño de los granos en los que se presenta.
- La profundidad de penetración del oxígeno.
- La humedad.
- La temperatura.
- Las características hidrogeológicas del lugar.
- La presencia de bacterias que oxidan a la pirita.

MINERIA PRODUCTORA DE AGUAS ACIDAS

Minería de la Pirita

En una primera apreciación, simplista, podría pensarse que las aguas ácidas de mina vienen asociadas a las exploraciones de pirita, sólo y exclusivamente, pero la realidad es otra. En efecto, la extensión de este problema radica en que, si bien es cierta esta producción en la minería de piritas, son muchas otras las explotaciones mineras que presentan este grave problema.

En cuanto a la pirita se refiere se debe resaltar que son innumerables las minas abandonadas, las cuales son fuentes productoras de aguas ácidas, que afectan tanto a los sistemas acuíferos subterráneos, como a la escorrentía superficial y, por supuesto, mucho más por la

cantidad de pilas de estériles acumulados, sujetos a la lixiviación por las aguas meteóricas, que por la propia explotación minera.

Estas acumulaciones son comunes en minas en que se han incrementado los volúmenes de estériles, tanto por la necesidad de explotar sectores más profundos (con mayor ratio estéril/mineral), como por la necesidad de conseguir mayor movimiento de rocas (para hacer rentables explotaciones de yacimientos de baja ley).

Este panorama real hace que sea inviable el llegar a pensar que, por ejemplo, una corriente de agua superficial como el Río Tinto, deje de ser un curso de agua ácida, con toda la secuela contaminante que ello supone. No obstante, el esfuerzo que ya están realizando, por las empresas mineras, si se aplican a él los más recientes avances tecnológicos en este campo, se debiera lograr que el problema no se acreciente, sino que permanezca circunscrito al estado actual y que, incluso, se pueda reducir sin dejar una triste herencia a las generaciones futuras.

La pirita en general, no es el único sulfuro que da lugar a este proceso. También lo es la marcasita, presente en muchos yacimientos que contribuye de manera decisiva, a la generación de aguas ácidas.

Minería de Sulfuros Complejos

Llegado a este punto, los minerales productores de aguas ácidas están prácticamente omnipresentes en muchos otros yacimientos muy diversos, tanto por su contenido mineral como por su génesis.

En gran parte de la minería de sulfuros complejos, en los que la asociación BPG (blenda-pirita-galena) es la

más frecuente, los yacimientos tienen extensión más generalizada. Igualmente, en minas abandonadas y en yacimientos en explotación, donde el importante movimiento de rocas supone un gran desarrollo de huecos mineros y de pilas, con lo que se dan condiciones favorables para la afección a las aguas subterráneas y a las superficiales.

En este dominio se ha hecho poco, en general, aunque con honrosas excepciones, e incluso, a veces, se han aplicado «soluciones» totalmente inadecuadas, como es la ubicación de estériles en depresiones kársticas, o el relleno de minas con introducción de rechazos de lavadero en proceso de oxidación. Por otra parte, en este grupo de yacimientos, si bien puede no ser la pirita el mineral mayoritario, es verdad el que, en muchas ocasiones, ha tenido y tiene condición de rechazo, por lo que ha ido a apilarse con los desechos de mina.

Si bien una serie de estos yacimientos están en contacto con formaciones carbonatadas, las cuales pueden neutralizar la acidez de las aguas, esto no tiene lugar sin un incremento de su contenido iónico en sulfatos, bicarbonatos, calcio y magnesio.

Minería del Carbón

La propia génesis de formación de los yacimientos de antracita, hulla, lignito y turba está relacionada con ambientes sedimentarios y con procesos de reducción, muy favorables para el desarrollo de sulfuros de hierro. Esto ocurre tanto en los propios niveles carbonosos como en la roca de caja.

TECNICAS DE CONTROL DE LAS AGUAS ACIDAS DE MINA

Técnicas Preventivas

Técnicas preventivas son aquellas cuyo objetivo es evitar que la mina abandonada produzca un efluente ácido. Técnicas correctoras, por el contrario, son las diseñadas para tratar las aguas ácidas que produce una mina, de modo que dejen de ser una amenaza para el medio ambiente.

Se comprende fácilmente que, en la planificación del abandono de una mina, debe darse prioridad a las técnicas preventivas, cuya aplicación sea posible. La utilización de técnicas correctoras, a minas abandonada, está justificada sólo en los casos más graves e imprevistos de contaminación por aguas ácidas.

Las técnicas preventivas, actúan sobre alguno de los tres factores que deben concurrir para que se formen aguas ácidas: oxígeno, agua y la presencia de Thiobacillus ferrooxidans. Se da por hecho que no se puede actuar sobre la cantidad o tamaño de grano, del sulfuro presente en la roca. Las técnicas que actúan sobre el Thiobacillus ferrooxidans son muy recientes y, aplicables sólo a minas a cielo abierto.

Por otra parte, existe gran diferencia entre las medidas preventivas que pueden aplicarse a minas

subterráneas y las específicas para minas a cielo abierto, por lo que abordamos su estudio separadamente.

Técnicas Preventivas Aplicables a Minería Subterránea

Las técnicas preventivas, aplicables a minas subterráneas, son de dos tipos:

- Las que pretenden reducir el nivel de oxígeno en la mina a niveles tan bajos que impidan la oxidación de los sulfuros (son las técnicas de inundación).
- Las que limitan la cantidad de agua existente en la mina, de tal manera, que si bien se produce oxidación de los sulfuros, el caudal de aguas ácidas llega a ser tan pequeño que no plantea problemas ambientales (son las técnicas de impermeabilización y de aislamiento hidrológico de minas) (figs. 3-5).

Se han producido, en el pasado, algunos casos de minas subterráneas abandonadas, que han contaminado acuíferos abastecedores de aguas potables. La solución más elemental al problema, que no es propiamente preventiva ni correctora, consiste en realizar nuevas captaciones, en un acuífero más profundo no contaminado.

Con independencia de la tecnología escogida, para evitar la formación de aguas ácidas en minas abandonadas, es imprescindible, en un proyecto de este tipo, realizar previamente un estudio hidrogeológico minero de detalle, que incluya los siguientes aspectos:

- Localización de las áreas de recarga y de las vías de flujo hacia la mina.
- Identificación de los sectores de la mina en los que se producen aguas ácidas.
- Estimación de los caudales de agua que circularán por la mina.
- Determinación de las variaciones laterales de la calidad del agua.

Técnicas Preventivas Aplicables a Minas a Cielo Abierto

Se denomina «restitución» («reclamation»), al conjunto de labores que se realizan en terrenos gravemente afectados por las explotaciones mineras, con objeto de que sus características agronómicas, hidrogeológicas, paisajísticas y de todo tipo vuelvan a ser, como mínimo, igual a las originales.

Las técnicas convencionales de restitución están orientadas, fundamentalmente, a regenerar agrónomicamente los terrenos. Para conseguirlo se suele añadir, superficialmente, cierta cantidad de caliza. Este aditivo, unido a la presencia de una capa vegetal, que consume oxígeno y tiende a generar un ambiente reductor en superficie, explica el que, en algunos casos, se consiga evitar la formación de aguas ácidas, sin aplicar técnicas de restitución específicamente orientadas hacia este fin.

En el caso de una mina de transferencia, en la cual se va realizando la restitución convencional de los terrenos a medida que la explotación concluye en ellos, en el estéril apilado no se efectúa ningún tipo de diferenciación entre materiales piríticos y alcalinos.

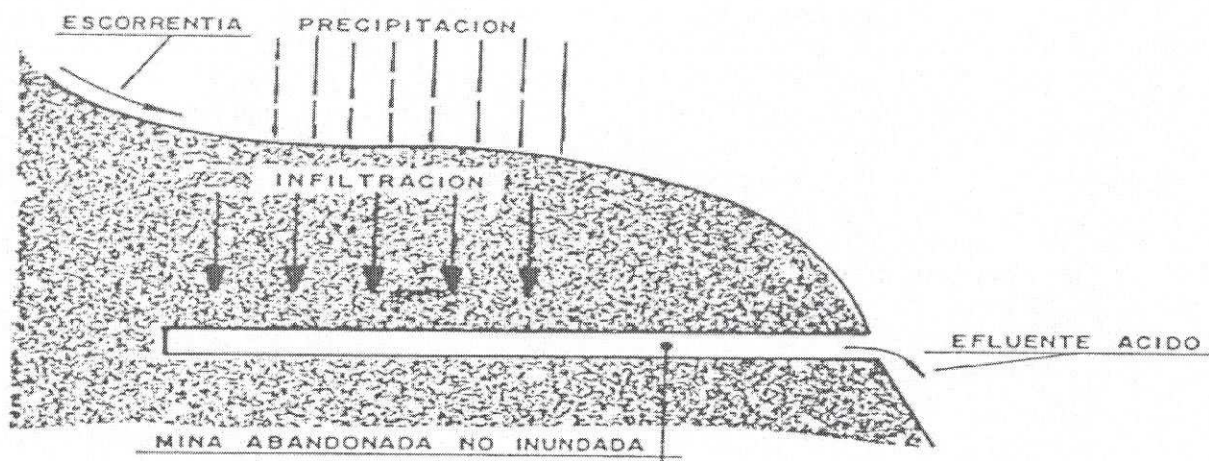


Figura 3: El rediseño de la superficie puede contribuir eficazmente a reducir la infiltración de aguas superficiales en una mina abandonada

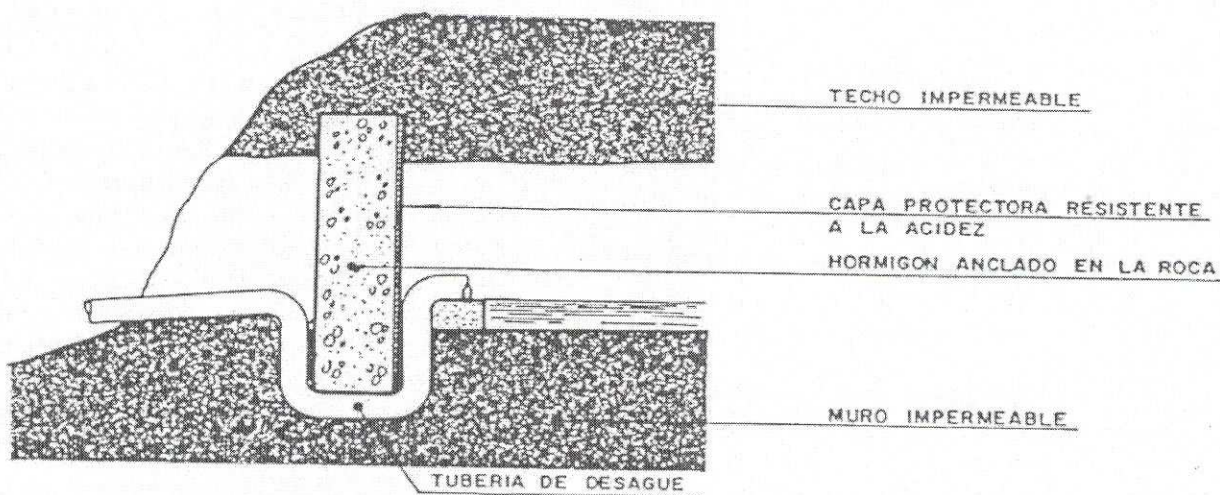


Figura 4: Modelo de cierre de mina que impide la entrada de aire y permite el desagüe de la mina

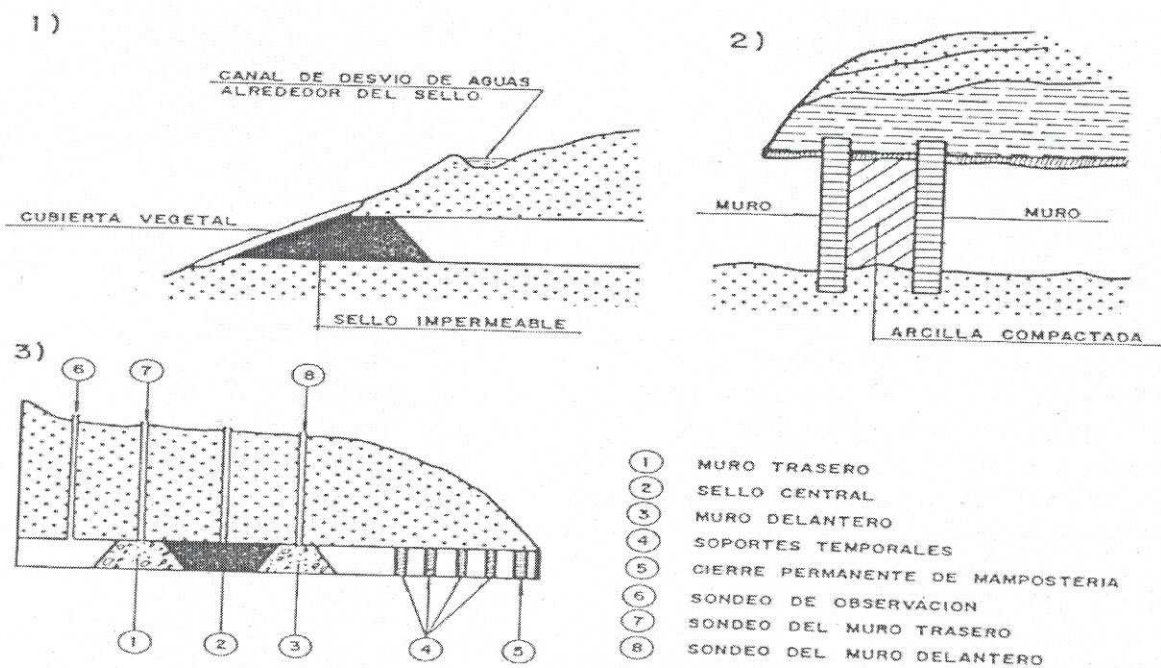


Figura 5: Tres tipos de cierre de mina impermeables tanto para el aire como para el agua

Sin embargo, existe gran cantidad de minas en las cuales, debido a sus características geológicas, hidrológicas o topográficas, es necesario realizar labores específicas de restitución, diseñadas para evitar que se formen aguas ácidas, que representen una amenaza para la calidad de las aguas superficiales o subterráneas (figs. 6-7).

Existe una amplia bibliografía referente a minas abandonadas cuyas escombreras, productoras de aguas ácidas, han sido restituidas según el método convencional, que comprende las siguientes operaciones:

- Explanación y compactación.
- Distribución de una capa de caliza triturada.
- Distribución de una capa de suelo vegetal.
- Abonado.
- Siembra de especies resistentes a la acidez.

En los casos de algunas minas abandonadas, en las que se produjo el empeoramiento de la calidad del agua tras la restitución, seguido de un período de lenta y progresiva mejoría, el efecto de las técnicas tradicionales de restitución fue el contrario. Tras un breve período de mejora, la calidad del agua empeoró luego progresivamente y, en la actualidad, las escombreras restituidas siguen produciendo aguas ácidas de muy mala calidad. De lo anterior se desprenden dos conclusiones:

- Los métodos de restitución, empleados actualmente y en el pasado, no siempre han demostrado ser eficaces para controlar la producción de aguas ácidas.
- Todavía no se comprenden por completo, los procesos implicado en la producción de aguas ácidas, lo que explica que, frecuentemente se obtengan resultados contrarios a los esperados.

Ocasionalmente, se han obtenido buenos resultados, a largo plazo (más de siete años), completando la restitución con grandes cantidades de aguas residuales urbanas, sin que se haya producido ningún tipo de contaminación orgánica.

Una característica común, a casi todas las técnicas preventivas que se están desarrollando actualmente, es la referente a las elevadas inversiones iniciales que se requieren, ya que deben ser planificadas y realizadas durante el desarrollo de la explotación minera (en una escombrera, durante el apilamiento de los desechos). Por el contrario, la restitución puramente agronómica se realiza una vez concluido el apilamiento de materiales en la escombrera.

La necesidad de diseñar y realizar la restitución, sin poder estudiar directamente las acumulaciones de desechos mineros, en los cuales se van a formar las aguas ácidas, ha obligado a desarrollar técnicas de predicción de la producción de aguas ácidas en cada mina. Estas técnicas constituyen, un aspecto fundamental de la restitución de terrenos.

Las técnicas destinadas a evitar la formación de efluentes ácidos, a partir de residuos mineros al aire libre, están en pleno desarrollo. Algunas de ellas son todavía

experimentales. Otras han sido insuficientemente contrastadas y se encuentran mal documentadas en la literatura.

Las técnicas, actualmente empleadas o en desarrollo, son las siguientes:

- Desvío de aguas superficiales y separación de aguas subterráneas.
- Sellado con arcilla.
- Compactación del relleno.
- Impermeabilización de la superficie de las escombreras.
- Manipulación de la cobertura.
- Colocación de lechos de caliza en los materiales piríticos.
- Inhibición bacteriana:
 - mediante bacterias,
 - mediante detergentes aniónicos,
 - mediante sustancias orgánicas conservantes.
- Inyección alcalina.

Las cuatro primeras técnicas tienen por objeto modificar los flujos de agua subterránea, de modo que las aguas ácidas no lleguen a formarse (figs. 8-9). Las cuatro últimas tiene un doble objetivo: por una parte, pretenden crear un ambiente alcalino (o menos ácido), que impida que la acidificación del agua continúe, y por otra parte neutralizar «in situ» el agua ácida que se forme.

Varios de estos métodos (segundo, tercero y quinto) no pueden llevarse a la práctica en escombreras completadas (o abandonadas), y con algunos de los restantes sólo podrán obtenerse mediocres resultados. Tan sólo el primero, cuarto y octavo son específicos para escombreras abandonadas.

Existen discrepancias entre los diversos autores, acerca del efecto beneficioso que una capa de suelo, situada sobre una escombrera pirítica, puede ejercer para evitar la formación de ácido. Existe tendencia a pensar que la capa del suelo, sobre todo si es arcilloso, sellará eficazmente el material pirítico.

La investigación sobre este tema, llega a las siguientes conclusiones:

- El sellado que se consigue no es eficaz. Un suelo arcilloso tiene una permeabilidad vertical muy superior a la horizontal, que permite la filtración del agua y la formación de ácido. Esto se evitaría compactando suficientemente, pero en este caso las plantas no podrían asentarse sobre la superficie compactada.
- Los suelos con mejores propiedades impermeabilizantes son los constituidos por mezclas de bentonita con tierra vegetal.
- Un suelo situado sobre una escombrera pirítica ejerce un efecto secundario muy interesante para evitar la formación de aguas ácidas: ante una precipitación, retiene una fracción importante del agua y la devuelve luego a la atmósfera, por evapotranspiración, evitando que se filtre y acidifique.

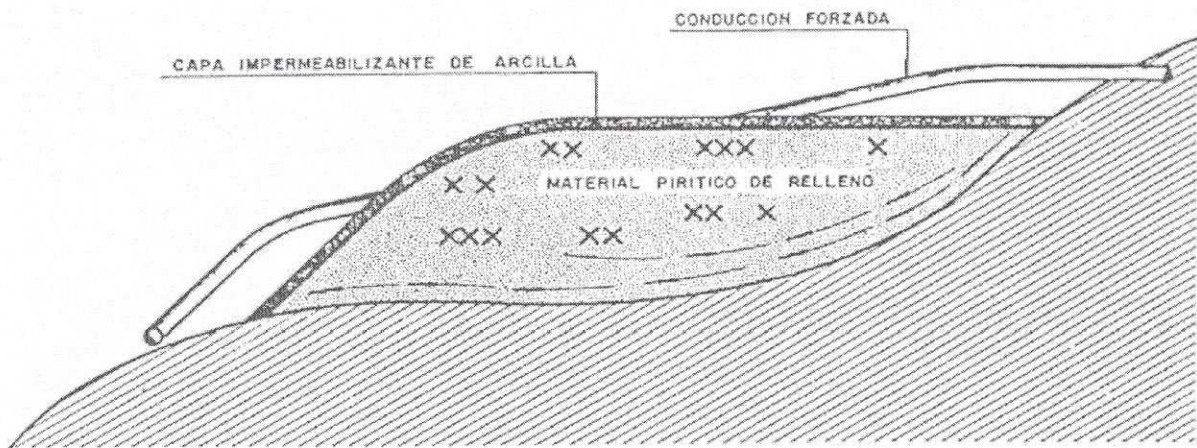


Figura 6: El desvío de un curso de agua combinado con la impermeabilización superficial, asegurará la no formación de aguas ácidas en la escombrera

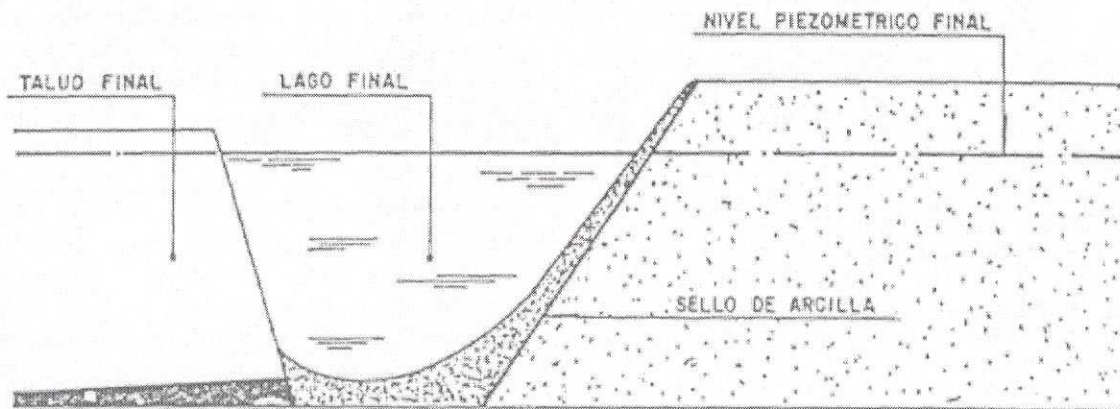


Figura 7: Si el nivel piezométrico está situado por encima de la capa explotada, se formará un lago tras el abandono de la mina

Técnicas Correctoras

Son aquellas técnicas que pueden aplicarse para purificar las aguas ácidas producidas por una mina. Se oponen, conceptualmente, a las técnicas preventivas, que tienen por objeto evitar que esas aguas se lleguen a formar. Las técnicas correctoras se aplican, indistintamente, a minas subterráneas o a cielo abierto.

La reciente promulgación, en muchos países desarrollados, de legislaciones de tipo ambientalista, ha llevado a las explotaciones mineras a instalar plantas de tratamiento de sus efluentes. Los problemas que esto crea, a las empresas, son graves durante la explotación, pero muchas veces se hacen críticas al planificar el abandono de la mina. En los países en los cuales están en vigor las legislaciones más restrictivas, los operadores mineros afrontan el dilema de poner en práctica medidas preventivas eficaces, durante el desarrollo de la mina, o

verse obligados a costear el tratamiento de los efluentes durante años, después de ser abandonada la mina.

La industria minera mundial gasta, anualmente, millones de dólares en el tratamiento de las aguas ácidas que produce. En Estados Unidos son frecuentes las minas que se ven obligadas a tratar más de 3.500 m³ diarios de agua ácida. Las plantas de neutralización química, las únicas que tienen importancia industrial en la actualidad, suelen emplear como agente neutralizante la cal. Esta técnica tiene numerosos inconvenientes:

- Es realmente cara.
- Exige manipular una sustancia cáustica.
- Produce un lodo difícil de almacenar.

Las plantas de tratamiento por intercambio iónico no tienen aplicación directa, en relación a las aguas ácidas, si bien se usan en la minería del uranio, para resolver problemas de contaminación radioactiva, específicos de

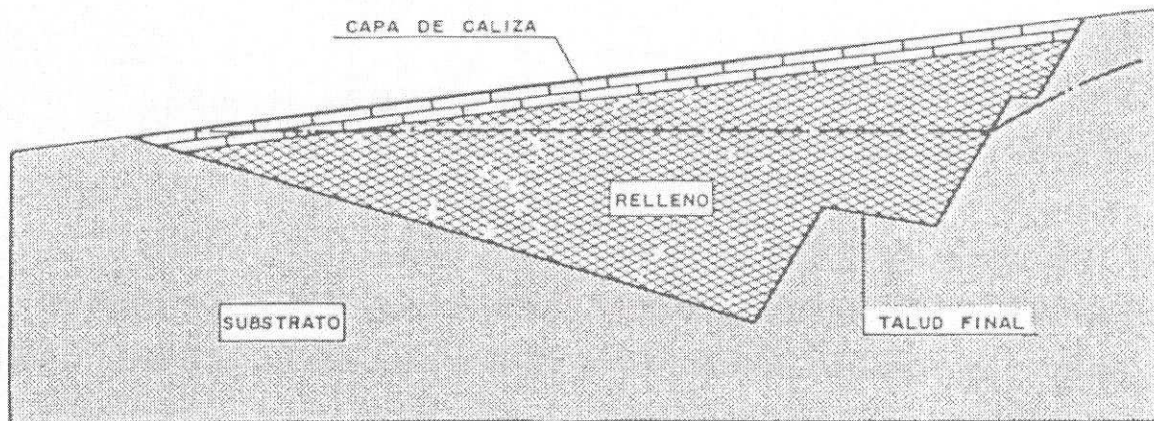


Figura 8: Colocación de lechos de caliza en el relleno

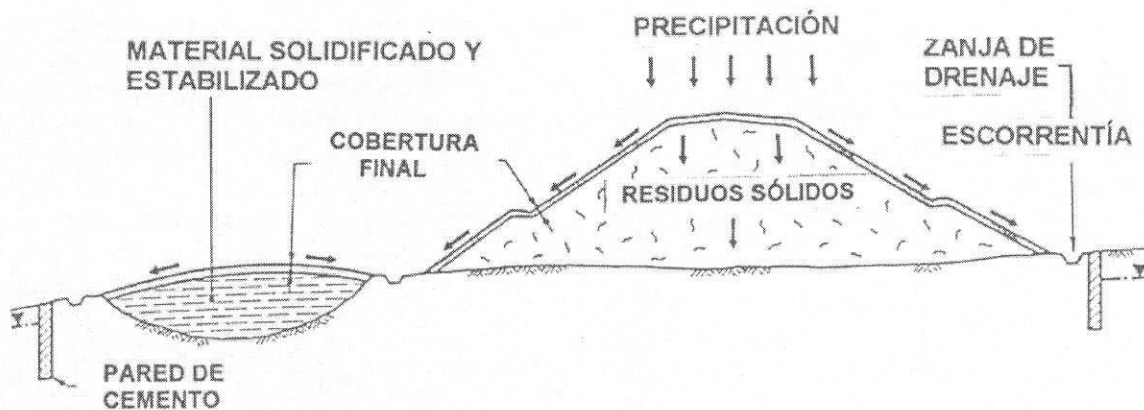


Figura 9: Vertedero de residuos sólidos no regulado: medidas de remediación propuestas

las aguas residuales de esta industria. El intercambio iónico puede tener aplicación en alguna mina concreta, en la cual la toxicidad del agua sea causada por un ión, no precipitable aumentando el pH, que pueda ser extraído de modo selectivo.

Las plantas de ósmosis inversa y tratamiento con *Desulphovibrio desulphicans*, se encuentran en fase experimental, si bien no se trabaja intensamente en su desarrollo. Las plantas de tratamiento con musgo de *Spagnum* están todavía en fase experimental. Parecen idóneas para ser aplicadas en un futuro próximo a minas abandonadas, con pequeños volúmenes de efluentes, situadas en lugares de difícil acceso.

IMPACTO AMBIENTAL DE LAS AGUAS ÁCIDAS DE MINA

Impacto Estético y Recreacional sobre el Ecosistema Fluvial

Las aguas ácidas, de minas abandonadas, se pueden formar tanto en el interior como en la superficie,

por oxidación de la pirita contenida en los taludes de corte, en las escombreras y en las pilas de estéril. En ambos casos esta agua puede acceder al sistema hidráulico subterráneo, contaminando acuíferos, o surgir como efluentes que descargan en cursos de agua superficial. Por el contrario, es poco frecuente que aguas ácidas formadas en escombreras lleguen a contaminar seriamente a un acuífero adyacente.

En el caso de las escombreras, las aguas ácidas se forman en la franja más superficial de las mismas que, en pocos años queda lixiviada por completo. Si la escombrera es suficientemente permeable, las aguas ácidas se infiltran y surgen en su pie, en forma de manantiales ácidos. Por su acidez y toxicidad, impiden el desarrollo de una cubierta vegetal en la escombrera y, en muchos casos, son capaces de destruir una cobertura bien establecida por trabajos de restitución anteriores. El resultado es que, en poco tiempo, las escombreras quedan desnudas y expuestas por completo a la erosión. Se forman en ellas profundas cárcavas, en las que progresa la oxidación hasta alcanzar un estado de difícil solución.

Los cursos de agua superficiales se contaminan por los efluentes procedentes de minas subterráneas o de escombreras. Si la roca es pirítica, la calidad de esta agua será, en general, muy mala. No obstante, si la calidad de las aguas vertidas a los arroyos mejora, en general rápidamente, es debido a varios procesos:

- Dilución de las aguas ácidas por parte de otras aguas, subterráneas y superficiales, menos mineralizadas, que vierten al cauce.
- Precipitación de los cationes metálicos, en forma de hidróxidos y sulfatos, a medida que desciende el pH.
- Adsorción de los cationes metálicos, por parte de sedimentos orgánicos e inorgánicos, y también de algunas plantas acuáticas.

Tras los grandes aguaceros, se producen los momentos más críticos, ya que se lixivian las sales solubles, formadas en la escombrera desde la última precipitación, y la calidad de los efluentes se deteriora mucho. Con frecuencia, la dilución natural de la cuenca no es suficiente, en estos períodos, para mantener calidades adecuadas aguas abajo. Por otra parte, durante las crecidas, las aguas transportan gran cantidad de sólidos en suspensión, procedentes de la erosión de las escombreras e, incluso, se puede producir la avalancha de sus materiales. Esto puede dar lugar al taponamiento de algunos cauces, y a la alteración del esquema de drenaje de la cuenca.

Cuando la dilución de las aguas ácidas no es suficiente, el arroyo queda significativamente contaminado. Se produce la oxidación del hierro ferroso disuelto, a férrico, precipitándose una capa de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ en el fondo del cauce. La deposición de este hidróxido se ve favorecida por la presencia, en las aguas, de bacterias oxidantes del hierro ferroso, pertenecientes a los géneros *Crenothrix*, *Heptothrix*, *Gallionella* y otros. La presencia de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ en el lecho del arroyo, tiene diversas consecuencias negativas:

- Los lechos de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ son de vivos colores, entre amarillo y rojo, predominando los tonos ocres, que producen un efecto estético desagradable. La presencia de hidróxido férrico, en el agua, es detectable a simple vista, incluso cuando su concentración no supera las 5 ppm. Habitualmente, la presencia de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ es el primer indicador de que el agua está contaminada.
- Los cationes ferrosos consumen oxígeno, lo cual reduce la cantidad disponible para el consumo de los organismos acuáticos.
- Gran parte de los organismos bentónicos no puede adaptarse a la vida en estas condiciones. Con su desaparición se altera gravemente la cadena alimenticia, lo cual afecta a los organismos superiores que actúan como depredadores.
- Se ve impedido el desove de numerosas especies de peces, alterando su ciclo reproductivo. Esto, unido a la disminución del alimento disponible, suele conducir a la destrucción de poblaciones de peces

tan cotizados como las truchas. Los salmónidos no pueden desovar en aguas de pH inferior a 5.

- Unas pocas especies de algas e invertebrados se adaptan a las nuevas condiciones del cauce y, ante la falta de competencia, pueden llegar a constituir una plaga.
- Las aguas transportan cationes metálicos que se acumulan en los tejidos de los organismos, concentrándose finalmente en los depredadores superiores, con riesgos para el consumo humano. Por otra parte, se producen mortandades de peces cuando, tras las avenidas, las concentraciones de cationes aumentan. En este sentido, el cobre parece ser especialmente tóxico.

Degradación de Aguas Potables e Industriales

De manera casi general, las aguas de los arroyos contaminados por efluentes ácidos de minas, no son potables, y en este sentido hay que tener en cuenta que la depuración de las aguas, para consumo humano, se encarece con la degradación de su calidad original. Por ello, el empeoramiento de la calidad del agua puede causar graves perjuicios económicos a las industrias que las utilizan, e incluso puede forzar la búsqueda de un abastecimiento alternativo.

Casos muy graves, de contaminación de aguas potables, se producen cuando las aguas ácidas, almacenadas en minas subterráneas abandonadas, deterioran acuíferos empleados en abastecimientos rurales o urbanos. Los contenidos de sulfatos comprendidos entre 700 y 3.500 mg/l y elevadas concentraciones de Fe, Zn y Mg, pueden causar:

- Serios problemas digestivos entre los consumidores humanos (diarreas).
- Fuerte disminución de la producción lechera.

Envenenamiento Lento de Lagos

Cuando las aguas ácidas de mina, cargadas de cationes metálicos, vierten en un lago, se produce su neutralización y la precipitación de los metales que, en parte, pasan a integrarse en los limos y sedimentos del fondo y, en parte, son absorbidos por organismos bentónicos, que los transmiten a los depredadores que actúan sobre ellos. Los metales pesados acaban concentrándose en los tejidos de los seres vivos, que pueblan el lago, el cual, por su carácter de ecosistema cerrado, acaba envenenado. El consumo humano de estos peces presenta un problema adicional.

BIBLIOGRAFÍA

FERNÁNDEZ-RUBIO (1986).- Abandono de minas. Impacto hidrológico. Instituto geológico y minero de España, E.T.S. de Ingenieros de minas, 20-41p.

MENDASOCIATE PROJECT (1995).- Hydrogeology of

waste rock dumps. Canada centre for mineral and energy technology, British Columbia mineral development agreement, 14, 16, 39, 73 p.

LLOPIS LLADÓ (1970).- *Hidrogeología cárstica*. Editorial Blume.

WATSON B. (1995).- Hydrology, an environmental approach.

HAAS C., VAMOS R. (1995).- Hazardous and industrial waste treatment. Ed. Prentice Hall, Inc., New Jersey, p. 21, 41, 105.

ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE RUPTURA DE LOS SISMOS OCURRIDOS EN 1990 Y 1991 EN EL VALLE DEL ALTO MAYO (MOYOBAMBA-PERÚ)

Hernando TAVERA¹, Elisa BUFORN², Isabel BERNAL¹ & Yanet ANTAYHUA¹

¹Instituto Geofísico del Perú, Centro Nacional de Datos Geofísicos – Sismología

²Departamento de Geofísica, Universidad Complutense de Madrid

E-mail: jtavera@geo.igp.gob.pe

RESUMEN

El proceso de ruptura de los sismos ocurridos el 30 de mayo de 1990 y 4, 5 de abril de 1991 en el Valle del Alto Mayo (VAM) es analizado, a fin de conocer las características de la importante deformación superficial que se produce en esta zona. El VAM se ubica en la Zona Subandina de la región Norte de Perú y es la fuente sismogénica continental de mayor importancia por su alto índice de sismicidad y deformación. Los parámetros focales de los sismos son obtenidos a partir de la polaridad de la onda P y modelado de ondas de volumen a distancias telesísmicas (registros sísmicos de banda ancha). Los resultados muestran mecanismos focales de tipo inverso con planos nodales, en promedio, orientados en dirección paralela a la Cordillera Andina y ejes de presión (P) orientados en dirección NE-SW y NW-SE que sugieren la presencia de procesos complejos de deformación asociados probablemente a la curvatura de la Cordillera Andina a la latitud de 6°S (deflexión de Cajamarca) y a la subsidencia del Escudo Brasileño. Los registros de estos sismos son complejos y su modelado ha permitido definir la presencia de funciones temporales para la fuente sísmica (STF) que se caracterizan por presentar una serie de dos y tres pulsos asociados a igual número de rupturas aleatorias en periodos de tiempo menores a 10 segundos. El sismo del 5 de abril, fue generado por dos rupturas importantes sobre el mismo plano de falla, pero con diferente ángulo de deslizamiento. Los focos sísmicos se distribuyen, en profundidad, sobre una línea con pendiente de 35° hacia el Oeste y que tiende a ser horizontal si la profundidad de los sismos aumenta. Esta característica permite configurar la geometría de una falla de tipo lítrica, propuesto por muchos autores para explicar el estilo de deformación en la Zona Subandina. Finalmente, se presenta un modelo sismotectónico que explicaría el origen de los sismos que se producen en esta zona debido a la subsidencia del Escudo Brasileño bajo la Cordillera Oriental.

ABSTRACT.- ANALYSIS OF RUPTURE PROCESSES DURING THE 1990 AND 1991 EARTHQUAKES OCCURRED IN VALLE DEL ALTO MAYO (MOYOBAMBA, PERU)

The rupture processes of 30 May of 1990 and 4-5 April of 1991 earthquakes in the "Valle Alto Mayo" (VAM) are analyzed in order to know characteristics of the important superficial deformation in this zone. The VAM is located in Subandean zone of northern Peru and is a seismogenic continental source of greater importance, due to its high seismicity and deformation. The focal parameters of the earthquakes are obtained from P-wave polarity and body wave inversion to teleseismic distances (broad band seismic records). The results show inverse focal mechanisms with nodal planes, oriented roughly parallel to the Andean Cordillera, and pressure axes (P) oriented in NE-SW and NW-SE directions. This distribution suggests a complex process of deformation associated probably with the curvature of Andean Cordillera in latitude 6°S (Cajamarca deflexion) and with underthrusting of Brazilian shield under the Andean Cordillera. The records of these earthquakes are complex and body wave inversion has permitted to define their source time function (STF) that are characterized by series of two and three pulses associated with equal number of random ruptures in periods of time less than 10 seconds. The April 5 earthquake was generated by two important ruptures on the same fault plane, but with different slip angle. The seismic foci are distributed, in-depth, on a line dipping 35° westward and tending to be horizontal at increasing depths. This characteristic permits to configure the geometry of a thrust fault type proposed by many authors to explain the deformation style in Subandean Zone. Finally, we present a seismotectonic model that would explain the origin of the earthquakes that are produced in this zone due to the underthrusting of the Brazilian Shield under the Cordillera Oriental.

INTRODUCCION

En Perú, el borde Este de la Cordillera Andina es conocida como "Zona Subandina" y se constituye, de

Norte a Sur, como una banda estrecha sísmica y tectónicamente activa, la misma que controla el alto grado de deformación actual en esta zona. Desde el punto de vista sísmico, la zona Subandina es la principal fuente

sismogénica continental y sus características han sido ampliamente discutidas y analizadas por diversos autores (Suárez et al., 1983; Dorbath et al., 1990; Dorbath et al., 1991; Cahill y Isacks, 1992; Lindo, 1993; Tavera y Buforn, 1998; Tavera y Buforn, 2001). En la región norte de Perú, la Zona Subandina presenta un mayor índice de sismicidad, en comparación con las regiones centro y sur. Suárez et al (1983) y Tavera (1998) sugieren que en esta región, el proceso de subcendencia del Escudo Brasileño bajo la Cordillera Oriental se realiza a mayor velocidad, lo que explicaría la presencia de un mayor número de fallas geológicas. Sin embargo, en esta región, la ocurrencia de sismos de magnitud moderada es poco frecuente ($m_b \sim 6$) y cuando ocurren producen gran destrucción y pérdidas económicas. La historia sísmica de esta región registra la ocurrencia de hasta ocho sismos con magnitudes m_b entre 6 y 7 antes de la última década (Silgado 1978), siendo los ocurridos en 1968 los mejor evaluados y estudiados (Martínez, 1968; Kuroiwa y Deza, 1968). En esta región, el Valle del Alto Mayo fue afectado en 1990 y 1991 por tres sismos con magnitudes m_b del orden de 6.5 y que a diferencia de los anteriores, cuentan con mayor información.

El Valle del Alto Mayo (VAM) se ubica en la Zona Subandina de la región norte de Perú, próximo a la zona de transición de los Andes hacia la selva amazónica, cuyas

aguas discurren de Noroeste a Sureste hasta desembocar en el río Huallaga. Los principales rasgos geomorfológicos de la región lo constituyen el VAM y las montañas circundantes al mismo, tal como se muestra en la Figura 1. El VAM se ubica a 600 m s.n.m. y corresponde a una cobertura sedimentaria lacustre y fluvial del Cuaternario. Las montañas circundantes forman dos cadenas orientadas en dirección NNW-SSE, siendo una de ellas el Macizo de Pucatanbo presente en la vertiente oriental de la Cordillera Oriental con altitudes de 3000 a 4000 m; mientras que, la Cordillera de Cahuapanas, con elevaciones de 2000 a 2500 m s.n.m, se ubica al Este del valle con relieves moderadamente ondulados, típicos de colinas subandinas (Figura 1). Desde el punto de vista geológico, las montañas que circundan al VAM están constituidas por rocas sedimentarias de origen continental y marino-deltaicas, con edades que van del Jurásico al Cretáceo Superior y rocas continentales del Terciario (Macharé y Martínez, 1991). Estas montañas deben su origen a una tectónica de pliegues y sobrescurrimientos, tal como lo indica Monge (1991) y Caldas (1990). Estructuralmente, la Zona Subandina de la región norte de Perú, está constituida por un gran número de pliegues y fallas inversas de alto ángulo que forman sistemas imbricados (Montoya, 1991). Estos sistemas pueden disminuir su inclinación en profundidad para dar origen a fallas lítricas o estructuras en "thrust and fold belt" (Megard, 1978).

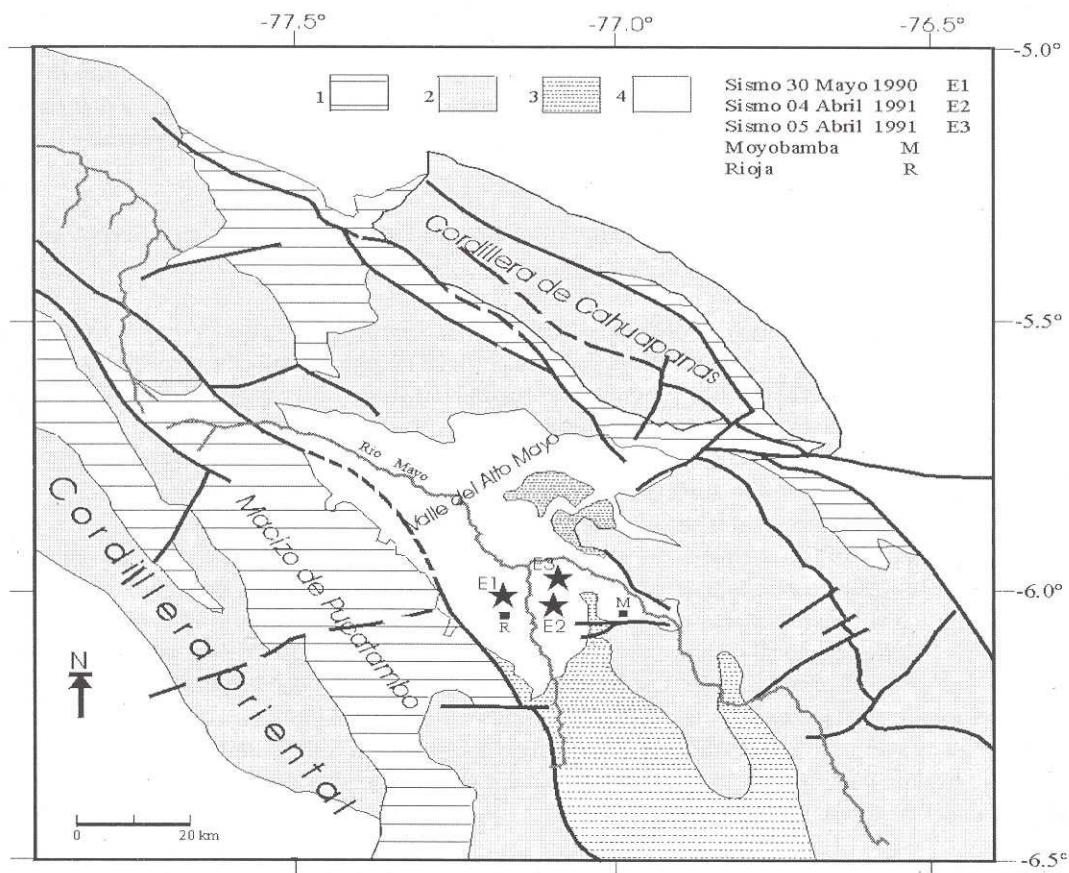


Figura 1.- Mapa geológico generalizado para la Zona Subandina de la región Norte de Perú según Caldas (1990). Las estrellas indican la ubicación epicentral de los sismos ocurridos en 1990 y 1991 en el VAM. Los trazos gruesos corresponden a las fallas inversas mayores y los discontinuos a los tramos inferidos. R, localidad de Rioja y M, Moyobamba. 1: Jurásico, 2: Cretácico, 3: Terciario, 4: Cuaternario.

Muchas de las fallas ubicadas en esta región presentan en superficie trazas claras que sugieren la presencia de actividad reciente (Figura 1). Así, las fallas que se ubican al Este del VAM y sobre el Macizo de Pucatumbo, presentan escarpes longitudinales y rasgos morfológicos característicos de fallas transcurrentes activas (Soulas, 1987). Asimismo, en los flancos montañosos, al Norte y Sur de la localidad de Moyobamba, se observa la presencia escapares rectilíneos que corresponderían a fallas normales activas (Macharé y Martínez, 1991).

Los patrones de deformación y distribución de esfuerzos en la Zona Subandina, no ha podido ser determinado con exactitud por la falta de información geológica regional, que en el caso de los sismos, estos permitirían conocer en detalle los procesos complejos de deformación presentes en esta zona. Desde la instalación de la red sísmica mundial en la década de los años 60, los pocos sismos de magnitud moderada ($m_b < 6.5$) ocurridos en esta región, no fueron registrados o localizados correctamente debido a que no se disponía de mucha información y por tanto, difícil de analizar la génesis de la fuente que los originó. Con el desarrollo de la sismometría e informática, a partir de los años 80, el tipo de registro de la red mundial pasa a ser digital con la consecuente mejora en la calidad de la información. Desde entonces, la red sísmica mundial cuenta con estaciones digitales de banda ancha, cuya característica principal es que su umbral de registro se encuentra entre 0.008 a 50 Hz aproximadamente. En estas nuevas condiciones, los sismos ocurridos en mayo de 1990 y abril de 1991 en el VAM, fueron registrados por un buen número de estaciones digitales de la red mundial, proveyendo información de calidad para la evaluación de estos sismos. En este estudio, se analiza los procesos de ruptura de los sismos ocurridos en el VAM a partir de las características del primer impulso de la onda P y del modelado de ondas de volumen (P y SH). Asimismo, esta información y métodos permitirán conocer el tamaño de los sismos, determinar la orientación de la fuente (mecanismo focal), las características de la función temporal de la fuente sísmica (STF) y ajustar la profundidad de los focos. Parte de estos resultados fueron previamente presentados por Tavera (1995), Tavera y Buforn (1998), Tavera y Buforn (2001); sin embargo, en este estudio se realiza un análisis más detallado de los procesos de ruptura de los sismos, así como una interpretación sismotectónica de carácter local a fin de identificar la orientación de los esfuerzos locales y proponer un modelo sismotectónico que explique el origen de los sismos que ocurren en el VAM y en la zona Subandina de la región norte de Perú.

MECANISMO FOCAL

Metodología

Los parámetros de la fuente sísmica de los sismos ocurridos en 1990 y 1991 en el VAM, son determinados a partir de la distribución del sentido del primer impulso de la onda P (polaridad) y del modelado de ondas de volumen

a distancias telesísmicas. Los datos utilizados corresponden a registros analógicos de algunas estaciones sísmicas de Sudamérica y digitales de la red sísmica mundial. Inicialmente, el mecanismo focal es determinado siguiendo la metodología desarrollada por Brillinger et al. (1980) y la polaridad de la onda P identificada en estaciones sísmicas localizadas a distancias $\Delta > 10^\circ$. Los ángulos de incidencia y acimut fueron generados a partir de los parámetros hipocentrales de cada sismo (Tabla 1) y el modelo de velocidad propuesto por Dorbath et al. (1991) para el borde oriental de la Cordillera Andina.

Tabla 1.- Parámetros hipocentrales de los sismos ocurridos en el VAM y estudiados en este trabajo según el National Earthquake Information Center (NEIC). Los asteriscos indican los sismos ocurridos en 1968 según Suárez et al (1983).

Fecha (d- m- a)	Hora Origen (h-m-s.s)	Localización		Prof. (km)	Mag. (mb)
		Latitud	Longitud		
30051990	023405.8	-6.016°	-77.229°	24	6.1
04041991	152320.7	-6.038°	-77.130°	20	6.0
05041991	041949.5	-5.982°	-77.094	19	6.5
19061968*	081334.6	-5.570°	-77.130°	16	6.2
20061968*	02383818	-5.530°	-77.220°	19	5.8

Por otro lado, la orientación de la fuente (mecanismo focal), la profundidad del foco (h), la función temporal de la fuente sísmica (STF) y el momento sísmico escalar (M_0) son obtenidos a partir del modelado de la amplitud y forma de las ondas P y SH registradas en estaciones sísmicas localizadas en el campo lejano ($30^\circ \leq \Delta \leq 90^\circ$) y siguiendo la metodología desarrollada por Nabelek (1984). Este método, permite ajustar mediante la técnica de mínimos cuadrados el grado de correlación existente entre los registros observados y teóricos generados para una fuente puntual cuya orientación es definida previamente; es decir, el proceso iterativo pretende hacer mínima la desviación estándar de los residuos de la correlación entre los registros observados y teóricos, el mismo que es evaluado a partir del "error cuadrático medio" (RMS) del ajuste. Los sismogramas teóricos son construidos a partir de las fases directas P y S combinadas con las reflejadas en la superficie libre (pP, sP y sS) y cuyas amplitudes son corregidas por los factores de expansión geométrica y atenuación usando el operador de Futterman. A fin de facilitar el modelado de las ondas de volumen, las amplitudes de los sismogramas han sido normalizadas a una amplificación de 5000 y a una distancia epicentral de 40° . El procedimiento seguido durante el modelado es similar al de Taymaz et al. (1990), Tavera y Buforn (1998) y Tavera y Buforn (2001), el mismo que permite ajustar la orientación de la fuente (mecanismo focal), la profundidad del foco, el momento sísmico escalar y la función temporal de la fuente sísmica construida por una serie de triángulos isósceles cuyo número y duración son definidos a priori. El proceso de modelado de cada sismo, se inicia considerando como orientación para la fuente, la obtenida a partir de la polaridad de la onda P y

los parámetros hipocentrales reportados por el NEIC (Tabla 1). Como parte de la rutina, inicialmente la orientación de la fuente es fijada; mientras que, los valores para la profundidad del foco y la función temporal de la fuente sísmica varían de manera independiente hasta lograr obtener un valor mínimo para el RMS del ajuste entre los sismogramas observados y teóricos.

Análisis del umbral de incertidumbre

La determinación del mecanismo focal de sismos que ocurren en el borde Oeste de Sudamérica, presenta como principal problema la ausencia de estaciones sísmicas por la presencia del Océano Pacífico. El problema de cobertura azimutal para el Perú, ha sido ampliamente discutida por Stauder (1975), Suárez et al. (1983) y Tavera (1995). Así, el rango de incertidumbre presente en la determinación del mecanismo focal a partir de la metodología de Brillinger et al. (1980), dependerá del número de datos disponibles para cubrir el total de la esfera focal. En este estudio, el total de los datos permitieron controlar la orientación de al menos uno de los planos nodales, aunque las desviaciones típicas de cada parámetro del mecanismo focal, permitieron observar que estos variaban con valores máximos de 46° en el caso del acimut, 22° en el buzamiento y 51° en el ángulo de deslizamiento; sin embargo, en todos los casos, la proporción de aciertos obtenida para cada solución fue mayor a 0.90. Este último parámetro cuantifica la solución obtenida en este estudio.

Los parámetros focales obtenidos a partir de la metodología de Nabelek (1984), fueron evaluados de manera individual mediante una serie de tests a fin de buscar ajustar correctamente la correlación entre los registros observados y teóricos. Para iniciar el modelado se procedió a fijar alguno de los parámetros de la fuente, por ejemplo su orientación obtenida a partir de la polaridad de la onda P y se deja libre los otros hasta encontrar el mejor ajuste en la solución, evaluado a partir de su RMS y

del análisis visual que se realiza sobre el ajuste entre los registros observados y teóricos. Una vez conseguida la mejor solución, se procedió a fijar otros parámetros como la profundidad, el momento sísmico o la función temporal de la fuente sísmica a fin de repetir el proceso. Asimismo, cada uno de los parámetros que definen la orientación del mecanismo focal (acimut, buzamiento y ángulo de deslizamiento) fueron evaluados independientemente, con el propósito de mejorar la solución final. La longitud del registro seleccionado para el modelado fue suficiente para incluir las fases directas y reflejadas en la superficie libre (pP, sP, sS); por lo tanto, el momento sísmico escalar y la profundidad del foco pudieron ser determinados correctamente.

Sismo del 30 de mayo de 1990

El epicentro del sismo del 30 de mayo fue localizado a 27 km al Oeste de la ciudad de Moyobamba (Figura 1), siendo las intensidades máximas observadas de VII en MM y sentido en un radio de 300 km. Este sismo produjo la muerte de 135 personas y más de 800 heridos (Huaco et al., 1990). El sismo presentó una magnitud mb de 6.0 y sus parámetros hipocentrales son presentados en la Tabla 1. Estudios preliminares realizados por Vásquez et al. (1990) ubican el epicentro del sismo a 20 km al SW de Moyobamba. Asimismo, estos autores realizan la localización de 83 réplicas ocurridas durante los primeros 25 días, pero indican que debido a problemas de cobertura azimutal de las estaciones sísmicas, no ha sido posible cuantificar los resultados por ellos obtenidos. Un análisis de la distribución de las intensidades y daños producidos por el sismo pueden ser encontrados en Vásquez et al. (1990) y Torres et al. (1990).

La calidad de los registros sísmicos obtenidos para este sismo (relación señal/ruido mayor a 150), permitió analizar y evaluar la complejidad de la onda P, tal como se observa en la Figura 2 y cuyos registros corresponden a estaciones de la red sísmica mundial. En esta figura, se

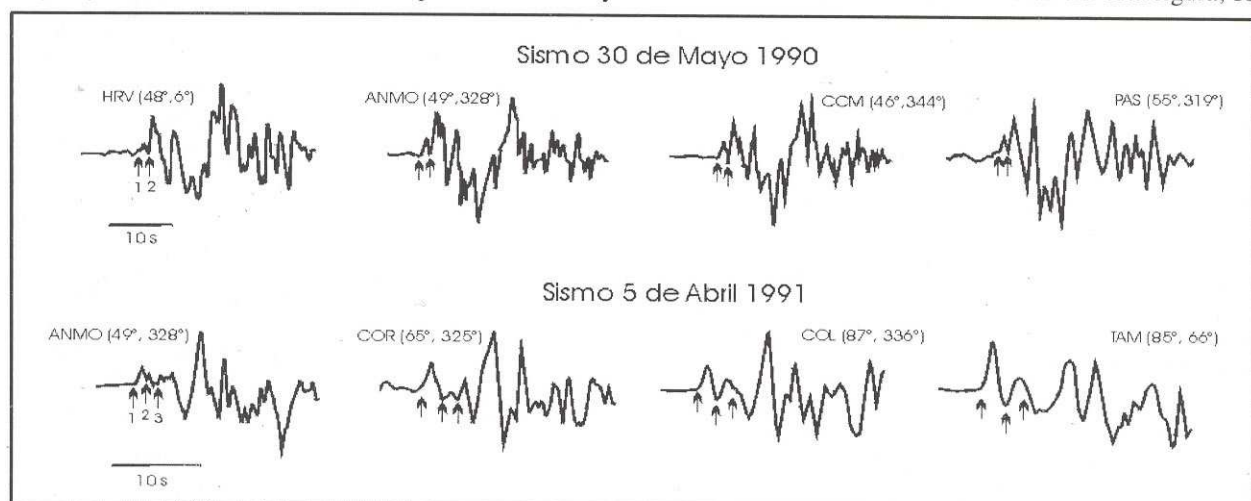


Figura 2.- Registros digitales de banda ancha, en velocidad, correspondientes a los sismos del 30 de mayo de 1990 y 5 de abril de 1991. En cada registro, las flechas indican el inicio de los posibles eventos que han producido dos y tres rupturas aleatorias con cada sismo. En la parte superior se indica el código de la estación de la red sísmica mundial y entre paréntesis la distancia epicentral y acimut en grados.

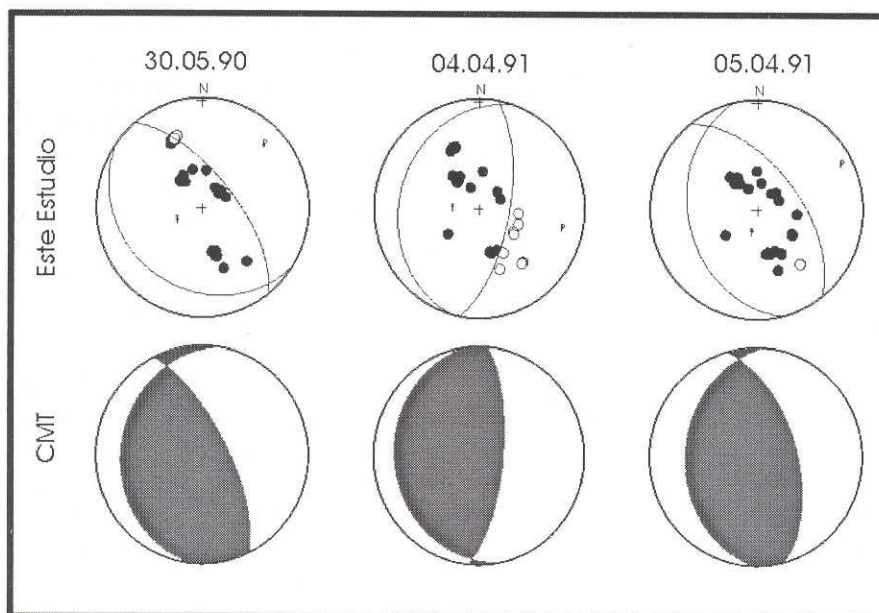


Figura 3.- Mecanismos focales obtenidos en este estudio para los sismos del VAM a partir de la distribución de la polaridad de la onda P y por el CMT. Se ha representado el hemisferio inferior de la esfera focal. Los círculos y áreas en negro corresponden a las compresiones y los blancos a las dilataciones. T y P representan los ejes de tensión y presión.

observa que los registros presentan al inicio de la señal, un pulso de amplitud pequeña y cuyo origen podría deberse a la ocurrencia de un sismo precursor dos segundos antes del principal. Asimismo, los registros muestran que la orientación del primer pulso de la onda para el sismo precursor y principal son similares, lo cual sugiere que ambos eventos presentarían fuentes sísmicas con orientación similar. Esta característica sugiere que el sismo del 30 de mayo se inició con un evento precursor. En general, la presencia de eventos de magnitud pequeña, segundos antes del registro del sismo principal, es causa de incertidumbre; sin embargo, esta característica ha sido observada en registros de otros sismos con diferentes regímenes tectónicos (Bezzeghoud et al., 1989; Ruff y Miller, 1994; Campos et al., 1994 y Fuenzalida et al., 1997).

El mecanismo focal para el sismo del 30 de mayo obtenido a partir del primer impulso de la onda P es mostrado en la Figura 3, que corresponde a un mecanismo de tipo inverso con uno de sus planos nodales cerca de la vertical y el otro casi horizontal, ambos orientados en dirección NW-SE. A fin de evaluar esta solución, se procedió a realizar el modelado de ondas de volumen de 9 registros de la onda P y 6 de la onda SH distribuidos en su mayoría en el primer y segundo cuadrante de la esfera focal (registros en velocidad). Según el procedimiento descrito anteriormente, el mejor ajuste entre los sismogramas observados (Obs) y teóricos (Teo) fue obtenido para un RMS de 0.39 y cuya solución se presenta en la Figura 4. En esta figura se observa que el mecanismo focal corresponde a una falla inversa con planos nodales orientados en dirección NW-SE, buzando uno de los planos 26° hacia el SW y el otro 65° hacia el NE respectivamente. Esta solución para el mecanismo focal, a diferencia de la obtenida a partir de la polaridad de la onda P, ha permitido modelar correctamente el primero

pulso de la señal correspondiente al sismo precursor. En general, la correlación obtenida entre los registros observados y teóricos es buena; sin embargo, la amplitud del grupo de la onda P en los registros de TAM y TOL están parcialmente ajustados y probablemente sea debido a la distancia epicentro-estación, la misma que facilita el registro de la fase PcP y aumenta la amplitud del registro, pero que no resta validez a la solución.

Asimismo, en la Figura 4 se observa que la función temporal de la fuente sísmica es compleja (área sombreada, STF) y muestra que durante los 8 segundos de duración de la ruptura, la energía se ha liberado en tres etapas y por fuentes distribuidas sobre el mismo plano de falla. La primera fuente, corresponde a un sismo pequeño con una duración de 1.5 segundos; mientras que, el sismo principal esta compuesto por dos fuentes que se inician inmediatamente después de la primera y tienen duraciones de 3 y 3.5 segundos. El modelado de ondas ha permitido estimar la profundidad del foco del sismo en 23 km y obtener un momento sísmico escalar total de 5.2×10^{18} Nm.

En la Tabla 2 se presenta el resumen de los resultados obtenidos en este estudio para el sismo del 30 de mayo, además del calculado por la Universidad de Harvard a partir del método del "Centroid Moment Tensor" CMT (Figura 3). La orientación del mecanismo focal obtenido a partir de la polaridad de la onda P y modelado, varían únicamente en la orientación del plano nodal que buza hacia el SW (acimut), con una diferencia de 42° en el sentido del movimiento de las agujas del reloj. Esta diferencia ha permitido modelar correctamente las formas de onda del sismo precursor y sismo principal identificados a priori (Figura 2). Esta nueva solución para la fuente sísmica, sugiere que el proceso complejo de ruptura del sismo del 30 de mayo, ha sido debido a tres fracturas sobre un único plano de falla y no a dos como sugiere Tavera (1995). La orientación del mecanismo focal

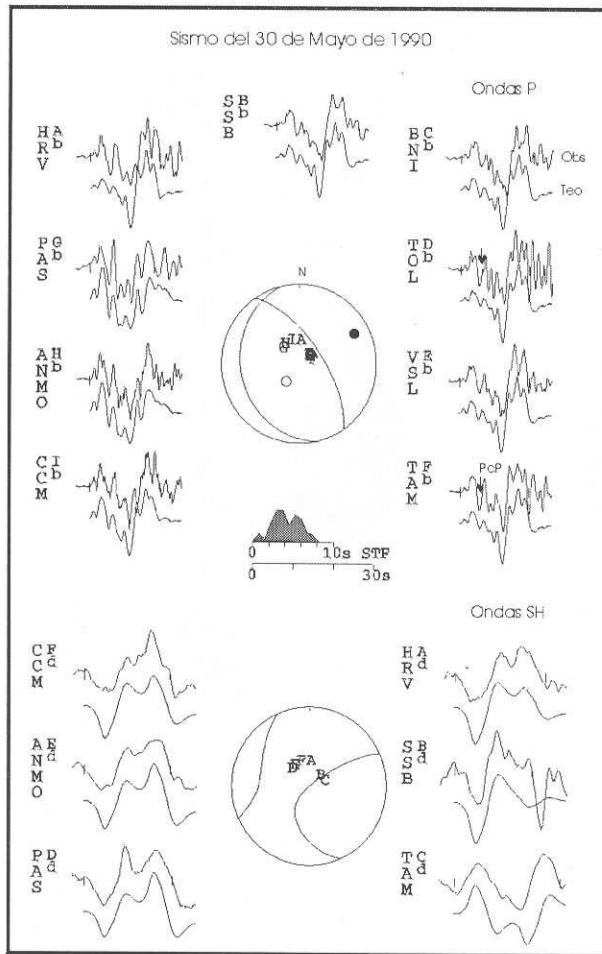


Figura 4.- Modelado de ondas P y SH para el sismo del 30 de mayo de 1990. En la parte superior se muestra los registros observados en velocidad (Obs) y en la inferior los teóricos (Teo). El código de la estación se muestra a la izquierda de cada registro seguidas de una letra en el extremo superior derecho que identifica su posición sobre la esfera focal. Los ejes T y P en la esfera focal, están representados por un círculo en negro y otro en blanco. En la parte central de la figura se presenta la función temporal de la fuente sísmica (STF) y debajo la escala horizontal en segundos para los registros utilizados. Las amplitudes de los registros han sido normalizadas a una magnificación de 5000 y a una distancia epicentral de 40°. Las flechas indican el registro de la fase PcP.

Tabla 2.- Parámetros del mecanismo focal del sismo del 30 de mayo de 1990. ϕ° , acimut; δ° , buzamiento; λ° , ángulo de deslizamiento; M_0 , momento sísmico escalar en Nm; M_w , magnitud de momento. Los valores del mecanismo focal, obtenidos a partir de la polaridad de la onda P, están acompañados de sus desviaciones típicas.

Método	Orientación planos nodales			Prof. (km)	Mo ($\times 10^{18}$)	Mw
	ϕ°	δ°	λ°			
Polaridad onda P	A: 124 \pm 17	25 \pm 7	105 \pm 32			
	B: 321 \pm 10	65 \pm 7	97 \pm 20			
Modelado	A: 166	25	71	23 \pm 2.5	5.3	6.4
	B: 325	66	99			
C.M.T.	A: 188	24	122	24	7.7	
	B: 333	70	77			

según el CMT (Figura 3), difiere de la obtenida en este estudio en el acimut y en el ángulo de deslizamiento del plano nodal que buza hacia el SW con diferencias de 22° y 51° respectivamente. La profundidad del foco ha sido correctamente ajustada en 23 km similar a la calculada por el CMT ($h=24$ km). El momento sísmico escalar de 5.3×10^{18} Nm, es igual al calculado por Tavera (1995) y del mismo orden que el obtenido por el CMT (7.7×10^{18} Nm).

Sismo del 4 de abril de 1991

El sismo del 4 de abril de 1991 se produjo después de casi un año en la misma región del ocurrido el 30 de mayo de 1990, aunque su epicentro fue localizado a 22 km al Oeste de la ciudad de Moyobamba (Figura 1). Para este sismo, el mecanismo focal obtenido a partir de la polaridad de la onda P corresponde a una falla inversa con planos nodales orientados en dirección N-S buzando 24° y 66° hacia el Oeste y Este respectivamente (Figura 3). Asimismo, el modelado de ondas de volumen se realiza con 7 registros de onda P y 5 de onda SH (registros en velocidad), distribuidos en el primer y segundo cuadrante de la esfera focal (Figura 5). El mejor ajuste entre los sismogramas observados y teóricos ha sido obtenido para un RMS de 0.38 y la solución para el mecanismo focal es igual a la calculada a partir de la polaridad de la onda P, tal como se muestra en la Figura 5. Asimismo, en esta figura se observa que las fases principales (pP, sP y sS) están bien correlacionadas y han permitido ajustar correctamente la profundidad del foco; sin embargo, los registros de TAM y TOL presentan complejidades en el registro de la fase P y cuyo origen puede ser atribuido a la llegada de la fase PcP («delta» >80°). La función temporal de la fuente sísmica presenta dos pulsos con una duración de 6 segundos (área sombreada) y muestra que la energía se ha liberado en su mayor parte durante los primeros 4 segundos de fractura y en menor porcentaje durante los dos últimos. La profundidad del foco ha sido estimada en 22 km y el momento sísmico escalar en 2.3×10^{18} Nm.

En la Tabla 3 se presenta los resultados obtenidos en este estudio para el sismo del 4 de abril de 1991 e incluye los calculados por el CMT (Figura 3). La orientación del mecanismo focal obtenida a partir de la polaridad de la onda P y modelado de ondas de volumen son idénticas, pero ambas son diferentes a la calculada por el CMT en la orientación del plano nodal que buza hacia el Oeste con valores de 26° para el acimut, 4° para el buzamiento y de 19° para el ángulo de deslizamiento, los mismos que se encuentran dentro de las desviaciones estándares obtenidos para estos parámetros. Asimismo, se observa que la profundidad del foco de 22 km obtenido en este estudio, difiere en 5 km a la calculada por el CMT ($h=27$ km); mientras que, las dimensiones del momento sísmico escalar (2.4×10^{18} Nm) es prácticamente la mitad del calculado por el CMT (5.0×10^{18} Nm). Estas diferencias pueden ser debidas a que se ha utilizado diferentes fases sísmicas y métodos para la estimación de los parámetros focales del sismo.

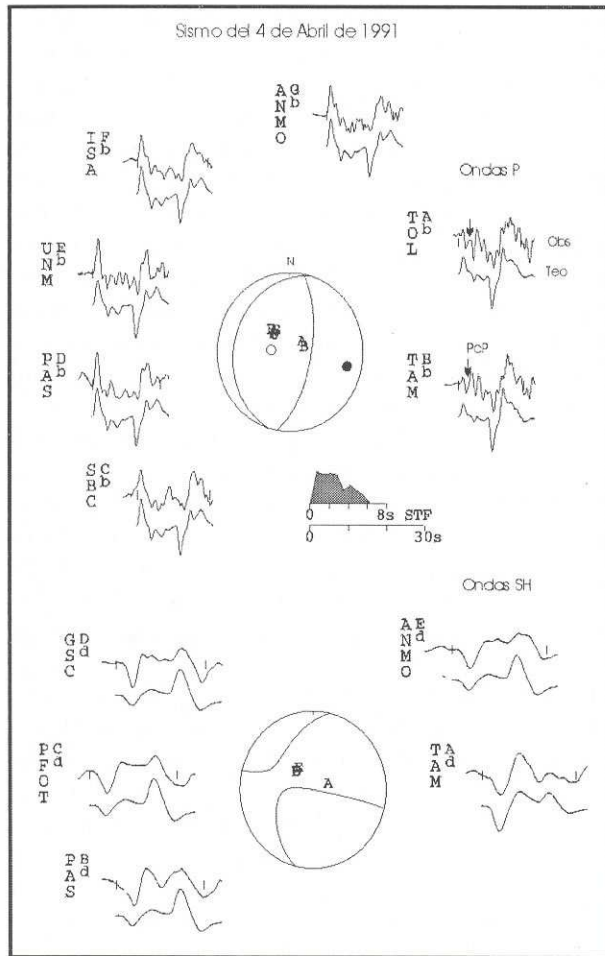


Figura 5.- Modelado de ondas P y SH para el sismo del 4 de abril de 1991. Otros, ver Figura 4.

Sismo del 5 de abril de 1991

El 5 de abril de 1991, 13 horas después de ocurrido el sismo del 4 de abril, se produce un nuevo sismo en esta región con epicentro localizado a 18 km al Oeste de la ciudad de Moyobamba (Figura 1). Este sismo, de mayor magnitud que los dos anteriores ocurridos en la misma zona, produce la muerte de 53 personas, 252 heridos y daños de consideración en 8000 viviendas de las ciudades de Rioja, Moyobamba y Nueva Cajamarca. Las intensidades máximas observadas fueron de VII MM en el área de Moyobamba y Rioja, y fue sentido en un radio de 300 km aproximadamente (Huaco et al, 1992). Una descripción detallada de los efectos del sismo en el terreno y viviendas puede ser encontrado en Macharé y Martínez (1991) y Cuadra y Chang (1991).

Al igual que para el sismo del 30 de mayo, los registros obtenidos para este sismo permitieron analizar la complejidad de la señal e identificar a priori la posible ocurrencia de al menos tres eventos, tal como se observa en la Figura 2. En general, este tipo de registros sísmicos siempre está asociado a procesos de ruptura compleja de gran duración y han sido característicos de sismos debidos a procesos de subducción y deformación continental (Campos et al., 1994; Fuenzalida et al., 1997; Tavera, 1998)

Para este sismo, la orientación del mecanismo focal obtenido a partir de la polaridad de la onda P (Figura 3) corresponde a una falla inversa con planos nodales orientados en dirección NNW-SSE buzando uno de ellos 35° hacia el Oeste y el otro 57° hacia el NE. A fin de confrontar estos resultados, se realiza el modelado de 7 registros de onda P y 4 de onda SH (registros en velocidad) distribuidos en el primer y segundo cuadrante de la esfera focal (Figura 6). La rutina para el modelado permitió inicialmente ajustar de manera correcta los primeros 2 segundos de señal y así evaluar la variación del ángulo de deslizamiento y la profundidad del foco hasta converger a un valor mínimo para el RMS de 0.52 (Figura 6). Para modelar el total del registro, se consideró la existencia de una segunda fuente que explique las formas de onda más allá de los primeros dos segundos de señal. La orientación del mecanismo focal, la profundidad y la función temporal de la fuente sísmica para la primera fuente fueron fijadas y para la segunda, se consideró un mecanismo focal con orientación igual a la obtenida a partir de la polaridad de la onda P. Después de las primeras iteraciones se observó que la orientación del plano nodal que buza hacia el Oeste no mostraba mayor variación, por lo que se procedió a fijar su azimut y buzamiento. Nuevas iteraciones permitieron obtener una mejor correlación entre los registros teóricos y observados con un valor mínimo para el RMS de 0.41 (Figura 6). La solución final describe la ocurrencia de un sismo complejo formado por dos fuentes con diferente orientación y profundidad para el foco sísmico. Los mecanismos focales corresponden a fallas inversas con uno de los planos nodales común para las dos fuentes y orientado en dirección NNW-SSE (plano con buzamiento hacia el Oeste). La orientación del segundo plano varía desde NW-SE para la primera fuente, hasta NE-SW para la segunda.

La Figura 7 muestra el resumen de los tests realizados para modelar el sismo del 5 de abril. En la primera fila se muestra 5 registros seleccionados del total utilizado en el modelado (3 ondas P y 2 ondas SH) y la solución corresponde a la obtenida en este estudio. En la segunda fila se muestra la solución obtenida con la primera fuente y en la tercera con la segunda. La cuarta fila corresponde a la solución proporcionada por el mecanismo focal calculado mediante el CMT (Figura 3). Para las soluciones de las tres últimas filas, todos los parámetros fueron fijados

Tabla 3.- Parámetros del mecanismo focal del sismo del 4 de abril de 1991. Otros, ver Tabla 2.

Método	Orientación planos nodales			Prof.	Mo	Mw
	ϕ°	δ°	λ°	(km)	($\times 10^{18}$)	
Polaridad onda P	A: 197±43	24±5	84±39			
	B: 10±13	66±5	93±17			
Modelado	A: 197	24	84	21±2	2.4	6.2
	B: 10	66	93			
C.M.T.	A: 171	20	103	27	5.0	
	B: 5	70	85			

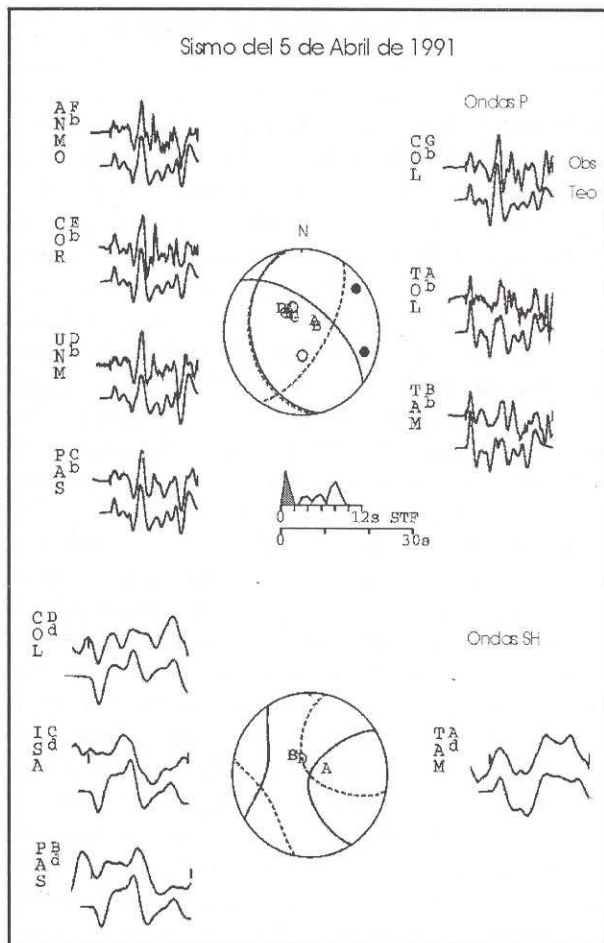


Figura 6.- Modelado de ondas P y SH para el sismo del 5 de abril de 1991. La interlínea sobre el mecanismo focal y la función temporal de la fuente sísmica en blanco, corresponden al segundo evento sísmico. Otros, ver Figura 4.

la excepción de la función temporal de la fuente sísmica. En general, en la segunda fila se observa que la correlación entre los registros observado-teórico es correcto para el primer impulso de la onda P y SH respectivamente, siendo el resto de la señal no modelada; mientras que, en la tercera fila la correlación entre los registros, después de los dos primeros segundos, es bastante buena. La suma de ambas soluciones permite obtener la solución mostrada en la primera fila. En la cuarta fila, se observa que el ajuste entre los registros teóricos-observados para la onda P y especialmente para la onda SH, es muy pobre si se considera el mecanismo focal calculado por el CMT para este sismo.

Asimismo, en la Figura 6 se observa que la función temporal de la fuente sísmica muestra la complejidad del proceso de ruptura del sismo del 5 de abril (área sombreada). La duración total de la ruptura es de 10 segundos con un momento sísmico escalar de 5.9×10^{18} Nm. La función fuente para el primer evento es simple y está formada por un triángulo con una duración de 2 segundos y momento sísmico escalar de 1.9×10^{18} Nm. El segundo evento ocurre 2.5 segundos después del primero, tiene una duración de 8 segundos, un momento sísmico escalar de 4.0×10^{18} Nm y está separado del primero

por una distancia de 11 km en dirección N226°. El proceso de ruptura de la segunda fuente se inicia con una lenta liberación de la energía durante los primeros 5 segundos, para luego liberar en los 3 últimos la mayor cantidad de la misma. La profundidad de la primera y segunda fuente ha sido estimada en 16 y 23 km respectivamente.

Los resultados finales para el sismo del 5 de abril se presentan en la Tabla 4, además de los calculados por el CMT (Figura 3). El análisis realizado a priori sobre los registros del sismo, permitió considerar la ocurrencia de al menos dos eventos durante su proceso de ruptura. Esta observación ha permitido modelar con éxito la forma de onda de los registros seleccionados. La orientación del mecanismo focal obtenida a partir de la polaridad de la onda P y la modelización para la primera y segunda fuente, tienen en común la orientación del plano nodal que buza hacia el Oeste ($\phi=167^\circ$, $\delta=35^\circ$ y $\lambda=69^\circ$); mientras que, la orientación del segundo es diferente en cada solución. Así, la variación en el acimut y el ángulo de deslizamiento del primer y segundo evento es mayor en comparación con la solución obtenida a partir de la polaridad de la onda P (Figura 4). La orientación del mecanismo focal calculada por el CMT está más cerca de la obtenida a partir de la polaridad de la onda P con diferencias menores de 22° para el acimut, 2° para el buzamiento y 5° para el ángulo de deslizamiento (Figura 4). Sin embargo, para modelar el total de los registros sísmicos ha sido necesario considerar dos fuentes y cuyas soluciones permiten explicar el proceso de ruptura de este sismo. La profundidad estimada para la primera y segunda fuente ($h=16$ y 23 km) son menores a la calculada por el CMT ($h=40$ km); mientras que, el momento sísmico escalar obtenido en este estudio (5.9×10^{18} Nm) es 5 veces menor que el calculado por el CMT (3.0×10^{19} Nm). Estas diferencias podrían deberse a que se ha hecho uso de diferentes metodologías y fases sísmicas para estimar los mismos parámetros.

MECANISMOS FOCALES Y ESTADO DE ESFUERZOS

En la Zona Subandina de la región norte de Perú, son pocos los sismos para los cuales se ha elaborado mecanismos focales, debido a que los sismos de magnitud moderada ($m_b \leq 6.5$) no son muy frecuentes. Sin embargo,

Tabla 4.- Parámetros del mecanismo focal del sismo del 5 de abril de 1991. Otros, ver Tabla 2.

Método	Orientación planos nodales			Prof. (km)	Mo ($\times 10^{18}$)	Mw
	ϕ°	δ°	λ°			
Polaridad onda P	A: 167±46	35±19	69±51			
	B: 322±37	57±22	104±39			
Modelado	A1: 167	35	57	16±1.5	1.9	6.5
	B1: 308	61	111			
	A2: 170	33	127	23±2.5	4.0	
	B2: 32	64	68			
C.M.T.	A: 183	33	74	40	30.0	
	B: 344	58	100			

para los sismos ocurridos en 1968 con magnitudes mb de 5.8 y 6.0, Suárez et al. (1993) obtiene los mecanismos focales a partir del modelado de registros de período largo de la red mundial, siendo éstos del tipo inverso y describen un patrón compresivo con ejes de presión (P) orientados en dirección E-W y WNW-ESE. Estos sismos tendrían su origen en los diferentes sistemas de fallas activas distribuidos en el extremo norte del VAM, tal como se muestra en la Figura 8. En esta misma figura se presenta los mecanismos focales obtenidos en este estudio para los sismos ocurridos en 1990 y 1991 en el VAM, los mismos que en general, corresponden a fallas inversas con planos nodales orientados en dirección NNW-SSE (sismo del 30 de mayo) y N-S para el sismo del 4 de abril; mientras que, el sismo del 5 de abril presenta dos mecanismos focales con planos orientados en direcciones NNW-SSE y N-S aproximadamente. De acuerdo a las características sismotectónicas de la región, discutidos anteriormente, los planos de falla se orientan paralelos a la Cordillera Andina y buzamiento hacia el Oeste; por lo tanto, en los mecanismos focales obtenidos en este estudio (Figura 8), los planos nodales con buzamiento al Oeste y Suroeste corresponderían a los planos de falla y estos tendrían ángulos de inclinación del orden de 33° .

En la Figura 8 se presenta además, la proyección horizontal de los ejes de presión (P) obtenidos para los sismos ocurridos en el VAM a partir de los mecanismos focales (flechas en blanco) y los obtenidos por Suárez et al. (1983) para los dos sismos ocurridos en 1968 (flechas en gris). En esta figura se observa que los ejes P se concentran principalmente entre las localidades de Rioja y Moyobamba con orientaciones que van desde NE-SW a NW-SE; es decir, la orientación del eje P varía en el

orden de 90° y muestran la complejidad de los esfuerzos causantes de los procesos de deformación en esta área. La orientación de los ejes P para los sismos ocurridos en 1968 muestran similares orientaciones, lo cual confirma lo indicado anteriormente. Tal como sugiere Tavera (1998), esta complejidad podría ser generada por la curvatura que sufre la Cordillera Andina al pasar de una orientación NW-SE a N-S a la altura de la latitud de 6°S , conocida como la deflexión de Cajamarca. En general, los sismos ocurridos en el VAM presentan ejes P que buzando con ángulos menores a 25° y ponen en evidencia un proceso compresivo que coincide con el estilo de colisión existente entre el Escudo Brasileiro y la Cordillera Andina. En esta situación, los ejes de tensión (T) serían casi verticales en respuesta a las fuerzas que llevan al Escudo Brasileiro hacia abajo y que producen el cabalgamiento de la Cordillera Andina. La colisión de tipo continental, existente en esta zona, contribuye de manera importante en la topografía andina. Según Tavera (1998) y Tavera y Buforn (2001), la orientación de los ejes P para sismos que ocurren frente a la costa de Perú y en la Zona Subandina, muestran que la fosa peruano-chilena y la Cordillera Andina controlan la distribución de los esfuerzos regionales en el Perú.

MODELO SISMOTECTÓNICO

El modelado de ondas de volumen, ha permitido ajustar correctamente la profundidad de los focos de los sismos ocurridos en el VAM. Así, la profundidad estimada para el sismo del 30 de mayo fue de 23.0 ± 2.5 km, para el sismo del 4 de abril de 21 ± 2.0 km y de 16 ± 1.5 y 23 ± 2.5 km para los dos sismos del 5 de abril. La distribución de estos sismos, en función de la profundidad de sus focos y según

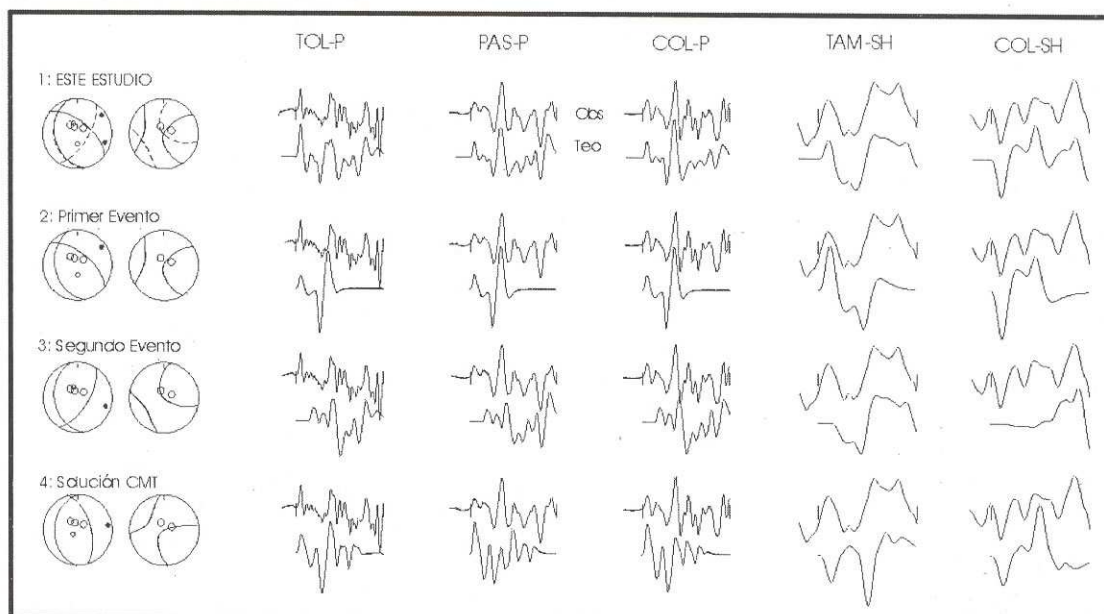


Figura 7.- Registros seleccionados para evaluar la solución obtenida, a partir del modelado de ondas de volumen, para el sismo del 5 de abril de 1991. En la parte superior se indica el código de la estación que identifica al registro en cada columna, además el tipo de onda utilizada (P y SH). Los círculos vacíos sobre la esfera focal indican la posición de las estaciones seleccionadas. Cada fila corresponde a: 1: solución obtenida en este estudio, 2: solución para el primer evento, 3: solución para el segundo evento y 4: solución obtenida a partir de los parámetros del CMT.

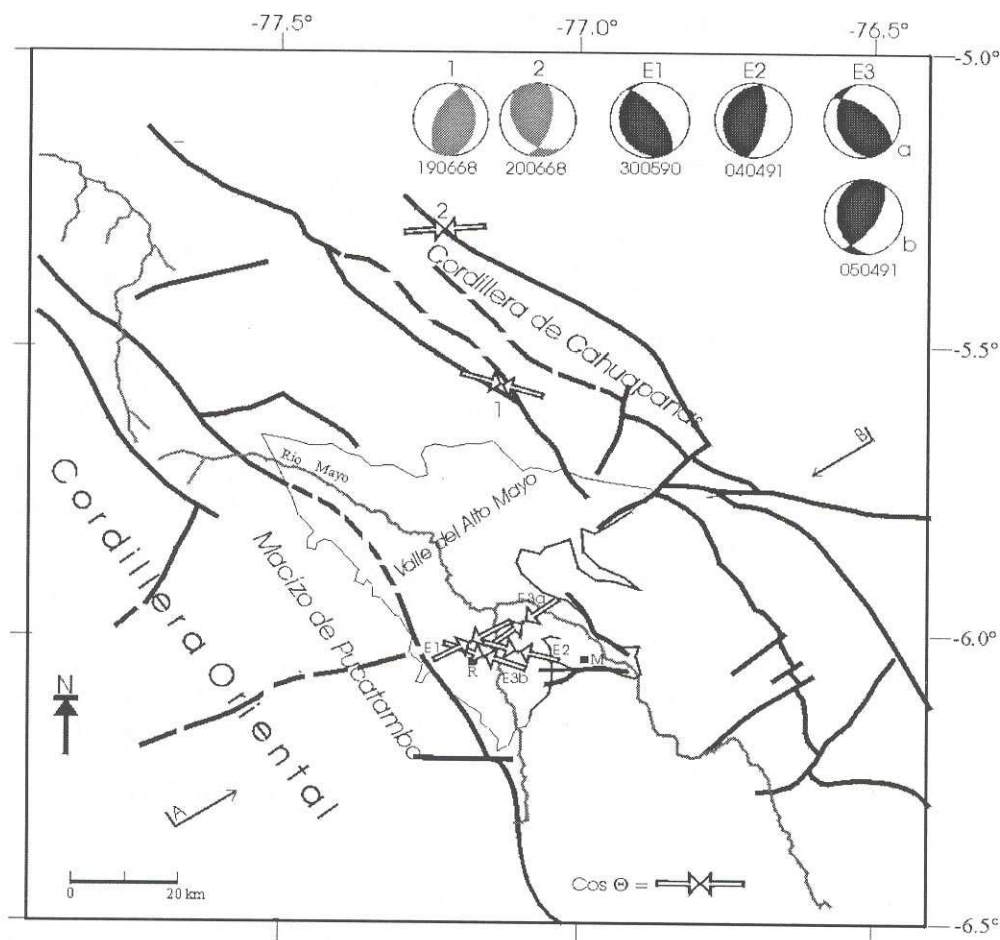


Figura 8.- Proyección horizontal de los ejes de presión (P) para los sismos ocurridos en 1990 y 1991 en el VAM (flechas en blanco) y en 1968 (flechas en gris), según Suárez et al. (1983). Se incluye los mecanismos focales obtenidos para los sismos indicados. Otros ver Figura 1.

la dirección A-B indicada en la Figura 8, se muestra en Figura 9a. En esta figura se observa que los sismos se distribuyen, en profundidad, sobre una línea con pendiente del orden de 35° a la profundidad de 15 km para luego disminuir a mayor profundidad y hacerse casi horizontal a una profundidad del orden de 23 km. Esta distribución para los focos sísmicos, permite configurar la geometría de fallas de tipo lístrica, las mismas que fueron propuestas por muchos autores para explicar la geometría, en profundidad, de los diferentes sistemas de fallas presentes en la Zona Subandina de la región norte de Perú. Una distribución similar siguen los sismos ocurridos en 1968, la misma que podría corresponder a otro sistema de fallas con orientación paralela a la que produjo los sismos de 1990 y 1991 (Figura 9a). El tipo de deformación que sugiere la distribución de los sismos, es coherente con la orientación de los ejes de presión (P). En la Figura 9b, se presenta un esquema sismotectónico que permite explicar el tipo de deformación presente en la Zona Subandina de la región norte de Perú como producto de la subsidencia del escudo brasileño bajo la Cordillera Oriental, el mismo que ha permitido la formación de plegamientos con altitudes y longitudes diferentes, además de estar bordeados por fallas inversas que buzan hacia el Oeste y que se orientan en dirección paralela a la Cordillera Andina.

CARACTERÍSTICAS DE LA FUNCION TEMPORAL DE LA FUENTE SISMICA (STF)

Muchos autores han mostrado que la función temporal de la fuente sísmica (STF), obtenida a partir del modelado de ondas de volumen, es una representación fiel del carácter simple o complejo de los procesos de ruptura de los sismos; es decir, la STF esta formada por una serie de uno, dos o más pulsos que representan la heterogeneidad de los procesos físicos que tienen lugar en el foco sísmico (Deschamps et al., 1982; Beck y Ruff, 1984; Bezzeghoud et al., 1986). Dos modelos de ruptura han sido propuestos a fin de buscar explicar estas heterogeneidades, el modelo de Barreras y el de Asperezas, los mismos que han sido ampliamente descritos y discutidos por Das y Aki (1977), Kanamori y Stewart (1978) y Tavera (1992). De estos modelos, el de asperezas es frecuente utilizado para explicar los procesos de ruptura en las zonas de subducción; mientras que, el de barreras explicaría las rupturas de la corteza en zonas continentales. En este modelo, los sismos son producidos por las fracturas de muchas áreas que están separadas por otras denominadas "barreras" que permanecen irrompibles después del sismo. Finalmente, el sismo estaría formado

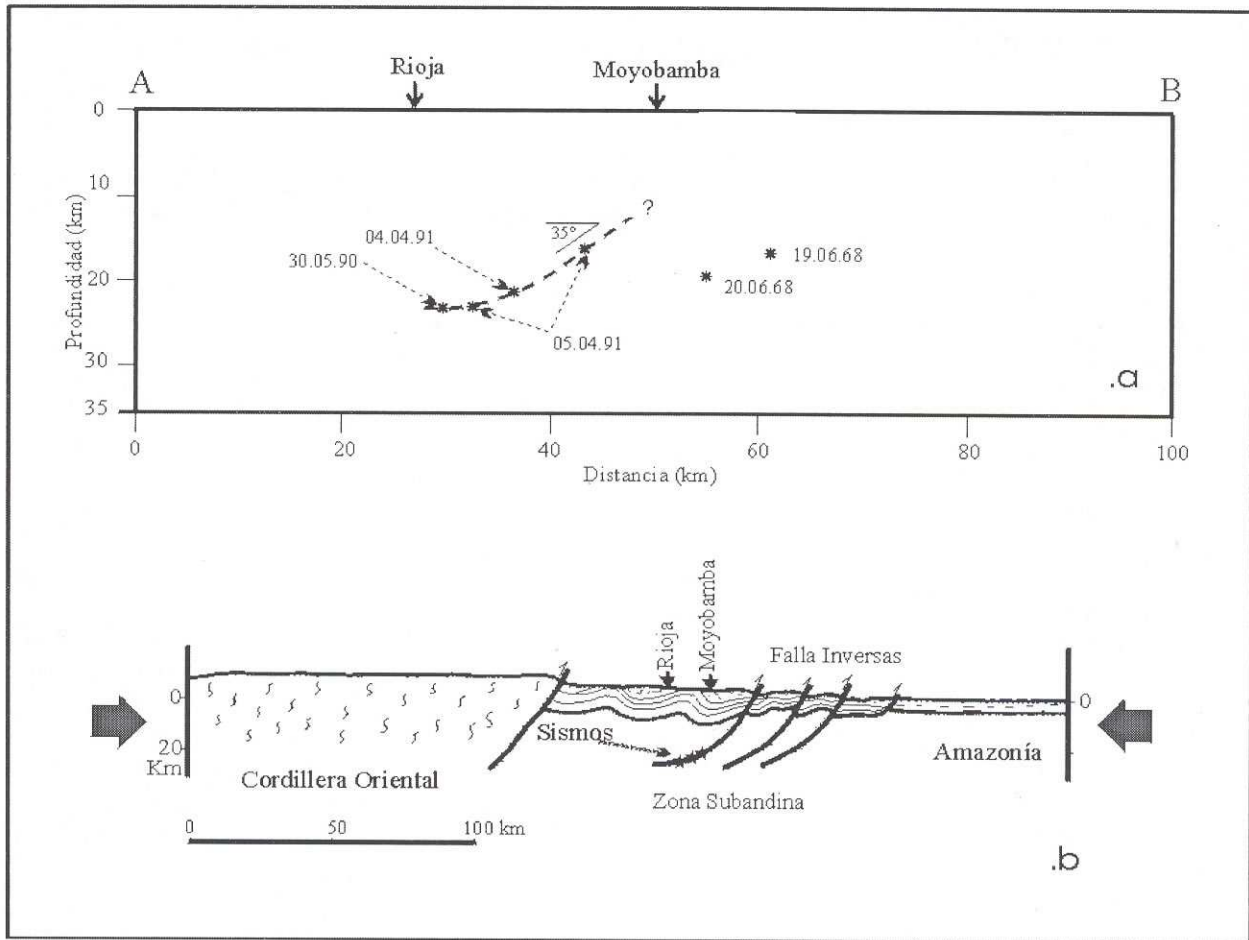


Figura 9.- a). Perfil vertical de los sismos ocurrido en 1990 y 1991 en el VAM y 1968 según la línea A-B de la Figura 8. b). Esquema sismotectónico para la Zona Subandina de la región Norte de Perú mejorado del propuesto por Vasquez et al. (1990). Obsérvese la alineación de los sismos en profundidad y de las fallas del tipo listricas formadas a consecuencia de la subducción del Escudo Brasileño bajo la Cordillera Oriental.

por la superposición de muchas fracturas o eventos sísmicos.

En la Figura 10, se presenta las STF obtenidas en este estudio para los sismos ocurridos en el VAM, las mismas que presentan más de un pulso y sugieren a priori la ocurrencia de rupturas complejas. En esta figura se observa que la SFT para el sismo del 30 de mayo presenta tres pulsos equivalentes a igual número de rupturas que ocurren de manera aleatoria en un período de tiempo de 8 segundos. De estos pulsos, el primero es de duración y amplitud menor que los dos restantes y representan el 7%, 48% y 45% del total del momento sísmico escalar (5.2×10^{18} Nm). El sismo del 4 de abril presenta una SFT compuesta por dos etapas de liberación de energía durante un período de tiempo de 6 segundos y en este caso, la última es de menor duración y corresponden al 70% y 30% del momento sísmico escalar (2.3×10^{18} Nm). La STF para el sismo del 5 de abril es más compleja y describe dos procesos de ruptura asociados a diferentes eventos ocurridos sobre el mismo plano de falla. El primer evento tiene una SFT compuesta por un pulso simple de dos segundos de duración ($M_0 = 1.9 \times 10^{18}$ Nm) y el segundo por tres segundos, siendo los dos primeros de menor duración (2.5 segundos cada uno) y el tercero de 4 segundos,

equivalentes al 17%, 20% y 63% del momento sísmico escalar total (4.0×10^{18} Nm).

Estos resultados muestran que los procesos de ruptura de sismos intraplaca con magnitudes mb de 6.0 o más, presentan SFT complejas y casi siempre están acompañados de réplicas en respuesta a la heterogeneidad del material que se rompe. La complejidad de las STF de los sismos ocurridos en el VAM, es menor de los que frecuentemente se observa en sismos debidos a procesos de subducción. Por lo tanto, debe suponerse que sismos con magnitudes mb menores a 6.0 presentan SFT simples y tengan menor duración, tal como lo señala Tavera (1998). Sin embargo, las STF de sismos con focos superficiales son más complejas que los que corresponden a sismos de profundidad intermedia o profunda. Asimismo, si se considera que las características de las STF están directamente relacionadas con las dimensiones del área de fractura, STF de mayor duración indican áreas grandes de ruptura con relación a las de corta duración. En términos del modelo de barreras, estos resultados sugieren que la liberación total de la energía está asociada a la ruptura aleatoria de barreras de diferentes dimensiones y propiedades físicas en períodos cortos de tiempo, de ahí las variaciones en tamaño y duración, de cada pulso de la STF.

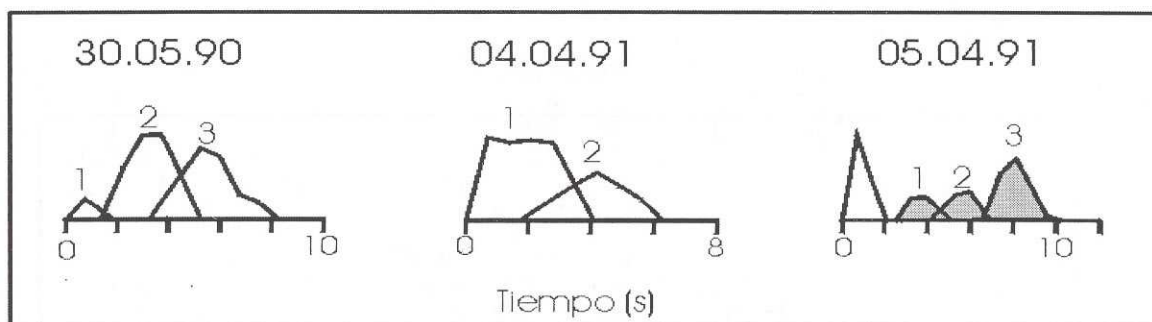


Figura 10.- Características de la función temporal de la fuente sísmica (STF) obtenidos a partir del modelado de ondas para los sismos ocurridos en 1990 y 1991 en el VAM. Los números indican las diferentes rupturas aleatorias para cada sismo y las áreas en gris, la ocurrencia de una ruptura con diferente orientación que la primera. La amplitud de cada STF está normalizada al valor del momento sísmico obtenido para cada sismo.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente estudio muestran que los procesos de deformación en la Zona Subandina de la región norte de Perú, son por demás complejos. La complejidad de estos procesos fue analizada y evaluada a priori a partir de la forma de los registros de los sismos ocurridos en 1990 y 1991 en el VAM. Para estos sismos, se ha identificado la ocurrencia de hasta tres posibles rupturas aleatorias en períodos cortos de tiempo. Apreciaciones que posteriormente fueron cuantificadas con el modelado de ondas de volumen.

La geometría de las fallas presentes en la Zona Subandina y descritos en diversos estudios de geología y tectónica, fue puesta en evidencia a partir del estudio de tres sismos ocurridos en el VAM. Los mecanismos focales de estos sismos sugieren la presencia de fallas inversas con planos de falla (plano nodal con buzamiento hacia el Oeste) paralelos a la Cordillera Andina y buzamientos menores a 35° en dirección Oeste y Suroeste, coherentes con la tectónica de la región.

La complejidad de la deformación en la Zona Subandina es posiblemente generada por la diversidad existente en la orientación de los ejes de presión (P), los mismos que varían de NE-SW a NW-SE con inclinaciones menores a 25° y cuyo origen podría ser asociado a la curvatura de la Cordillera Andina a la altura de la latitud de 6°S (deflexión de Cajamarca) como producto de las fuerzas que controlan el proceso de subducción en el borde Oeste de Sudamérica.

El modelado de ondas de volumen ha permitido calcular correctamente la profundidad de los focos de los sismos del VAM. En profundidad, siguen una alineación que permite configurar la geometría de las fallas lístricas, las mismas que son coherentes con el tipo de deformación superficial como producto de la subcendencia del Escudo Brasileño bajo la Cordillera Oriental y cuyos plegamientos y fallas se deslizarían sobre una base cristalina que se ubicaría a una profundidad del orden de 25 km. Se propone un esquema sismotectónico a fin de explicar el origen de los sismos que ocurren en la Zona Subandina de la región Norte de Perú.

Los procesos complejos de ruptura de los sismos

ocurridos en 1990 y 1991 en el VAM, son puestos nuevamente en evidencia a partir de las características de las STF obtenidas en el modelado de ondas de volumen. Estas STF muestran que los sismos ocurridos el 30 de mayo y 4 de abril se debieron a 3 y 2 rupturas aleatorias sobre el mismo plano de falla durante períodos de tiempo de 6 y 8 segundos. Contrariamente, el sismo del 5 de abril, presenta dos rupturas principales sobre el mismo plano de falla pero con deslizamientos en diferente dirección, siendo la segunda ruptura asociada a tres pequeñas durante un período de 8 segundos. El momento sísmico obtenido para cada sismo permite obtener magnitudes M_w de 6.4 (30 de mayo), 6.2 (4 de abril) y 6.5 (5 de abril).

La Zona Subandina de Perú constituye la fuente sismogénica continental más importante, siendo las regiones Norte y Centro donde se han producido el mayor número de sismos de magnitud pequeña y moderada, a diferencia de la región Sur y cuyo origen puede estar relacionado con la topografía y geometría de la Cordillera Andina, la misma que acondiciona el modo de la subcendencia del Escudo Brasileño bajo la Cordillera Oriental.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al profesor M. Bezzeghoud por su apoyo en el modelado de ondas de volumen y al Ing. J. Gómez por sus comentarios y críticas. La atenta y correcta revisión del Dr. Rodolfo Ayala permitió mejorar este artículo. Publicación No.007-2001-CNDG-IGP.

BIBLIOGRAFIA

BECK S. & RUFF, L. (1984).- The rupture process of the great 1979 Colombia earthquake: Evidence for the asperity model. *J. Geophys. Res.* **89**, 9281-9292.

BEZZEGHOUD M., DESCHAMPS A. & MADARIAGA R. (1989).- Broad-band P wave signals and spectra from digital stations. En: R. Cassinis, G. Nolet and G. Panza (eds). *Digital Seismology and Fine Modeling of the Lithosphere*. Plenum Press, Londres., 351-374.

- BRILLINGER D., UDIAS A. & BOLT B.** (1980).- A probability model for regional focal mechanism solutions. *Bull. Seism. Soc. Am.* **70**, 1479-1485.
- CAHILL T. & ISACK B.** (1992).- Seismicity and shape of the subducted Nazca Plate. *J. Geophys. Res.* **97**, 17503-17529.
- CALDAS J.** (1990).- Mapa geológico de la zona subandina del norte del Perú. Inédito, Petroleos del Perú.
- CAMPOS J., MADARIAGA R., NABELECK J., BUKCHIN B. & DESCHAMPS A.** (1994).- Faulting process of the 1990 June 20 Iran earthquake from broadband records. *Geophys. J. Int.* **118**, 31-46.
- CUADRA C. & CHANG L.** (1991).- El sismo de Moyobamba del 4 de Abril de 1991. Ediciones CISMID, 44 pp.
- DAS S. & AKI K.** (1977).- Fault planes with barriers: A versatile earthquake model. *J. Geophys. Res.* **82**, 5648-5655
- DESCHAMPS A., GAUDEMER Y. & CISTERNAS A.** (1982).- The El Asnam complex of October 10, 1980 multiple-source mechanism from long period records. *Bull. Soc. Seism. Am.* **72**, 111-128
- DORBATH C., DORBATH L., CISTERNAS A., DEVERCHERE J. & SEBRIER M.** (1990).- Seismicity of the Huancayo Basin (Central Peru) and the Huaytapallana fault. *Journal of South American Earth Sciences.*, **3**, 21-29
- DORBATH L., DORBATH C., JIMENEZ E. & RIVERA L.** (1991).- Seismicity and tectonics deformation in the eastern cordillera and the sub-andean zone of central Peru. *Journal of South American Earth Sciences.*, **4**, 13-24.
- FUENZALIDA A., DORBATH L., CISTERNAS A. & RIVERA L.** (1997).- Mechanism of the 1992 Erzincan earthquake and aftershocks, tectonics of the Erzincan Basin and decoupling on the North Anatolian fault. *Geophys. J. Int.* **129**, 1-28.
- HUACOP, VASQUEZ M., MARIN G. & MONTESINOS V.** (1990).- Intensidades regionales asociados al sismo del 30 de Mayo de 1990 en el Departamento de San Martín (Perú). *Informe Interno*. Instituto Geofísico del Perú. Lima, Perú. 30 pp.
- HUACO P., PONCE L., MARIN G., GOMEZ J. & FERNADEZ E.** (1992).- Intensidades sísmicas en áreas urbanas y regionales del Sismo del 5 de Abril de 1991 en el Departamento de San Martín (Perú). *Informe Interno*. Instituto Geofísico del Perú. Lima, Perú. 36 pp.
- KANAMORI H. & STEWART G.** (1978).- Seismological aspects of the Guatemala earthquake of February 4, 1976. *J. Geophys. Res.* **83**, 3427-3434.
- KUROIWA J. & DEZA E.** (1968).- Daños causados en Moyobamba por el sismo del 19 de Junio de 1968. Informe Inédito, 30 pp.
- LINDOR.** (1993).- *Seismotectonique des Andes du Pérou Central: Apport des donnés sismologiques de haute precision*. Tesis Doctoral. Universidad Louis-Pasteur de Strasbourg, Francia.
- MACHARE J. & MARTINEZ J.** (1991).- El sismo del Alto Mayo, Perú, 5 de Abril de 1991. DST, Instituto Geofísico del Perú, Informe Interno, 28 pp.
- MARTINEZ A.** (1968).- Geología y geotecnia de Moyobamba y alrededores (después del sismo de 19-6-68). Ediciones LGGA, Univ. Nac. Ingeniería, Lima, 59 pp.
- MÉGARD F.** (1978).- Etude geologique des Andes du Pérou Central. *Mem. ORSTOM.* **86**, 310 pp.
- MONGE F.** (1991).- Efectos geologicos del terremoto del 29 de Mayo de 1990 en el departamento de San Martin, Informe Interno, Insituto Geofísico del Perú, Lima, 14 pp.
- MONTOYA M.** (1991).- Estilos estructurales en la cuenca del Oeriente peruano. VII Congreso Peruano de Geología, Lima, V-1, 339-344.
- NABELECK J.** (1984).- *Determination of earthquake source parameters from inversion of body waves*. Tesis Doctoral. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 361 pp.
- RUFF L. & MILLER A.** (1994).- Rupture process of large earthquake in the northern Mexico subduction zone. *Pageoph.* **142**, 101-171.
- SÉBRIER M., MERCIER J., MEGARDF., LAUBACHER G. & CAREY-GAILHARDIS E.** (1985).- Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in the central Andes of Peru. *Tectonics.* **4**, 739-780.
- SILGADO E.** (1978).- Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú, 1513-1974. *Instituto Geológico Minero del Perú*. Lima, Perú. 131 pp.
- SOULAS J.** (1987).- Curso de Neotectónica para fines de riesgo sísmico. UNDRO-EPN, Quito, Notas inéditas.
- STAUDER W.** (1975).- Subduction of the Nazca plate under Peru as evidenced by focal mechanisms and by seismicity. *J. Geophys. Res.* **80**, 1058-1064.
- SUAREZ G., MOLNAR P. & BURCHFIEL B.** (1983).- Seismicity, fault plane solution, depth of faulting and active tectonics of the Andes of Peru, Ecuador y southern Colombia. *J. Geophys. Res.* **88**, 10403-10428.

- TAVERA H. & BUFORN E.** (2001).- Source Mechanism of Earthquake in Peru. *Journal of Seismology* (en prensa).
- TAVERA H. & BUFORN E.** (1998).- Sismicidad y Sismotectónica de Perú. En: Sismicidad y Sismotectónica de Centro y Sudamérica; Buforn, E. y Udias A. (eds.), *Física de la Tierra*, Univ. Complutense de Madrid, 10, 187-219.
- TAVERA H.** (1998).- *Mecanismo focal de terremotos en Perú y Sismotectónica*. Tesis PHD, Universidad Complutense de Madrid, España, 400 p.
- TAVERA H.** (1995).- Mecanismo focal de terremotos en Perú: 30 de Mayo de 1990 y 18 de Abril de 1993. Tesis de Maestría. Universidad Complutense, Madrid, 81 pp.
- TAVERA H.** (1992).- El proceso de ruptura sísmica: Barrera o aspereza?. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, N° 83, 61-66.
- TAYMAZ T., JACKSON J. & WESTAWAY R.** (1990).- Earthquake mechanism in the Hellenic Trench near Crete. *Geophys. J. Int.* **102**, 695-731.
- TORRES R., ISHIYAMA Y., ALVA J., FUKUMOTO, S. & CHARIASE V.** (1990).- Terremoto de Rioja, 29 de Mayo de 1990. Informe Preliminar, UNI, CISMID, Lima, Peru, 28 pp.
- VASQUEZ M., TAVERA H., MACHARÉ J. & CHANG M.** (1990).- Informe Sismológico del Terremoto del Nororiente Peruano del 30 de Mayo de 1990. DST, Instituto Geofísico del Perú, Informe Interno, 30 pp.

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL SISMO DE CALACOA (OMATE-MOQUEGUA) DEL 6 DE MAYO DE 1999 (MW=4.0)

Víctor AGUILAR¹, Hernando TAVERA², Isabel BERNAL², Héctor PALZA¹ & Roberto KOSAKA¹

¹ Instituto Geofísico de la Universidad Nacional San Agustín de Arequipa

² CNDG-Sismología del Instituto Geofísico del Perú

E-mail: vaguilar@ec-red.com; jtavera@geo.igp.gob.pe

RESUMEN

En este estudio se analiza y evalúa los parámetros hipocentrales del "Sismo de Calacoa" ocurrido el 6 de Mayo de 1999 (Mw=4.0), sus características y los efectos del mismo. La información a utilizarse proviene de una red sísmica temporal compuesta por tres estaciones portátiles del Instituto Geofísico de la UNSA (IGUNSA) y cuatro digitales de la Red Sísmica Nacional (RSN) a cargo del Instituto Geofísico del Perú (IGP). El sismo de Calacoa ha sido localizado a 7 km al NE de la localidad del mismo nombre y sobre la proyección en esa dirección, de la falla de Calacoa. El foco del sismo presenta una profundidad de 6.5 km y una magnitud de 4.0 Mw. La intensidad máxima de IV-V ha sido evaluada en las localidades de Calacoa, Cuchumbaya, Bellavista y Quebaya. A partir del análisis espectral se ha obtenido un momento sísmico escalar de 2×10^{22} dina-cm y un radio de fractura de 1000 metros. La distribución espacial y en profundidad del sismo de Calacoa y de algunas réplicas, sugiere un área de ruptura de 8×13 km; sin embargo, no se ha observado en superficie ninguna traza de falla. El sismo de Calacoa y sus réplicas, tuvieron su origen en los procesos de deformación superficial del tipo extensivo, los mismos que frecuentemente se producen en las zonas altas de la Cordillera Andina.

ABSTRACT.- ANALYSIS AND ASSESSMENT OF THE CALACOA EARTHQUAKE (OMATE, MOQUEGUA) OF MAY 6TH, 1999 (Mw=4.0)

In this study we analyze and evaluate the focal parameters of the "Calacoa Earthquake" occurred on May 6th, 1999 (Mw=4.0), their characteristics and effects. The information comes from a temporary seismic network composed by three portable stations of the Geophysical Institute of the UNSA (IGUNSA) and four digital stations of the National Seismic Network (RSN) Geophysical Institute of the Peru (IGP). The Calacoa Earthquake has been located 7 km to the NE of the locality of the same name and on the projection, in that direction of the Calacoa fault. The hypocenter had a depth of 6.5 km and a magnitude of 4.0 Mw. A maximum intensity of IV-V occurred in the localities of Calacoa, Cuchumbaya, Bellavista and Quebaya. From spectral analysis, we obtained a seismic moment of 2×10^{22} dina-cm and a fracture radio of 1000 meters. The space and depth position the Calacoa earthquake and of some aftershocks suggests a rupture area of 8×13 km; however, no evidence of fault has been observed in surface. The Calacoa earthquake and its aftershocks had their origin in the shallow deformation processes of the extensive type that are frequently produced in the high zones of the Andean Cordillera.

INTRODUCCION

La actividad sísmica de Perú tiene su origen en el proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana, presente de Norte a Sur en su borde Oeste, con una velocidad relativa del orden 8–10 cm/año (Minster y Jordan, 1978). Como resultado de este proceso continuo, en el continente se ha formado la Cordillera Andina en diferentes etapas orogénicas. La alta velocidad de acoplamiento existente entre estas dos placas, puede ser evaluada si se cuantifica la ocurrencia frecuente de sismos de magnitud elevada a lo largo de su contacto (entre la fosa y la línea de costa) y en el interior del continente, aunque la periodicidad y tamaño de estos últimos, sea menor a los primeros.

En la región Sur de Perú, la Cordillera Andina presenta una altura del orden de 5,000 m y un ancho de aproximadamente 450 km. Según su geomorfología, esta región puede ser dividida en cinco unidades paralelas a la cordillera (Mégard, 1978; Suárez et al, 1983; Tavera y Buforn, 1998): la zona costera, la Cordillera Occidental, el Altiplano, la Cordillera Oriental y la Zona Subandina. Esta morfología controla el alto índice de sismicidad, presente a diferentes niveles de profundidad y cuyas características principales han sido analizadas y discutidas anteriormente por diversos autores (Stauder, 1975; Barazangi y Isacks, 1976; Cahill y Isacks, 1992; Tavera y Buforn, 1998; Aguilar et. al., 2000; Tavera y Buforn, 2001).

La sismicidad relacionada directamente con la

deformación de la corteza continental en la región Sur de Perú, presenta focos superficiales ($h \leq 60$ km) y magnitudes mb menores a 6.5. En la Figura 1, se observa que el número de sismos con foco superficial es mayor frente a la línea de costa, los mismos que podrían estar asociados principalmente al proceso de subducción; mientras que en el interior del continente, el número es menor y aunque estos se distribuyen de manera dispersa, en general son debidos a la reactivación esporádica de algunos sistemas de fallas distribuidos en los Altos Andes (más de 3,000 metros de altura) y en la zona Subandina (Suárez et al., 1983; Sébrier et al., 1987; Macharé y Leureyro, 1991) En los Altos Andes los sismos alcanzan profundidades menores a 30 km, siendo la frecuencia de ocurrencia de los mismos (magnitud moderada, ~ 5.0 mb), menor con relación a otras zonas de mayor índice de sismicidad (zonas de subducción y Subandina). En la región Sur de Perú, los sismos de foco superficial se distribuyen principalmente próximos o sobre algunos sistemas de fallas localizados en los departamentos de Tacna, Moquegua, Arequipa y Apurímac (Figura 1). En los alrededores de la localidad de Calacoa, no se observa la presencia de sismos con foco superficial y magnitud moderada; sin embargo, no se descarta el hecho de que ocurran sismos de magnitudes pequeñas, los mismos que debido a la falta de redes sísmicas locales no pueden ser registrados ni localizados. En general, los sismos con foco superficial presentan frecuentemente magnitudes menores y como son debidos a fallas locales, sus efectos en superficie suelen ser tan grandes como los producidos en la zona de costa por sismos asociados al proceso de subducción.

El 6 de Mayo de 1999, a las 23 horas y 04 minutos (hora local), ocurrió un sismo de foco superficial y magnitud moderada en las proximidades de la localidad de Calacoa, distrito de San Cristobal, provincia de Mariscal Nieto, departamento de Moquegua. Este sismo, denominado "Sismo de Calacoa", afectó principalmente a las localidades de Calacoa y Cuchumbaya, siendo originalmente un sismo típico de los que ocurren en los Altos Andes de Perú; es decir, magnitud moderada y alto grado de destrucción. Además de su magnitud moderada, el sismo presentó características importantes como estar asociado a la posible reactivación de una falla local, la profundidad superficial de su foco y un área restringida de intensidad máxima. Después de ocurrido el sismo de Calacoa y durante un período de 8 días, se produjo un importante número de réplicas que generaron pánico y desesperación en la población de la localidad de Calacoa y alrededores. En este estudio se analiza y evalúa los parámetros hipocentrales del "Sismo de Calacoa", sus características y efectos. La información utilizada proviene de una red sísmica temporal compuesta por tres estaciones portátiles del IGUNSA y cuatro digitales de la Red Sísmica Nacional (RSN) a cargo del IGP.

CARACTERÍSTICAS SISMOTECTÓNICAS

La región Sur del Perú se caracteriza por ser la de mayor potencial sísmico y su máxima expresión en superficie se pone en evidencia con la presencia de algunas fallas geológicas, de diferentes longitudes, distribuidas en el interior del continente y cuyas características

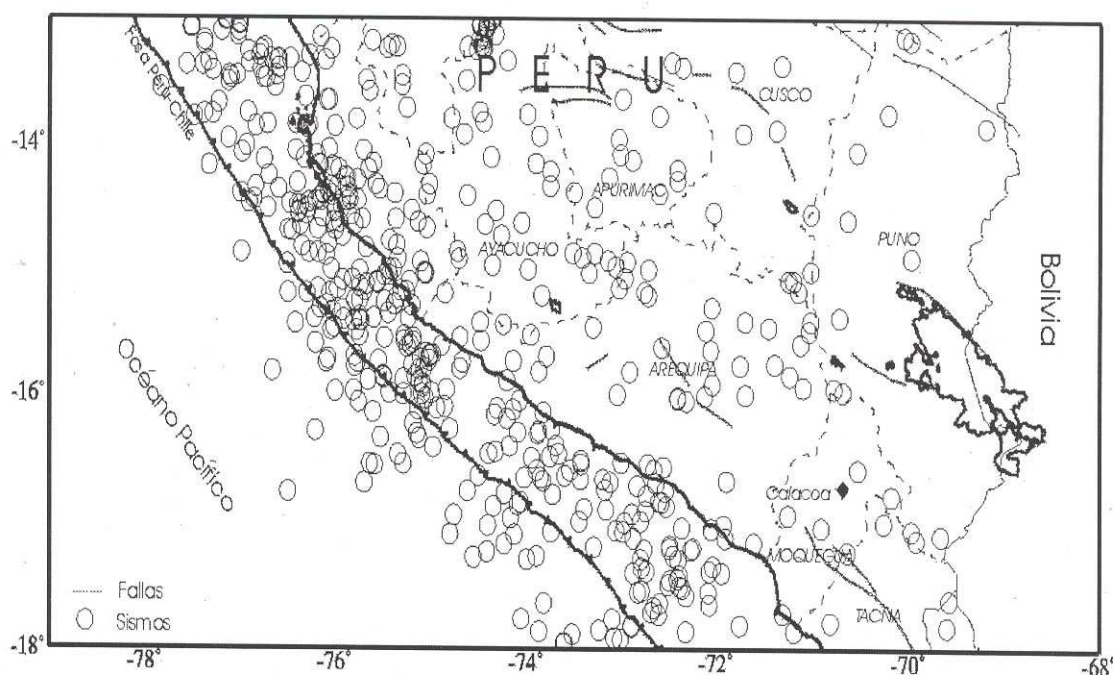


Figura 1.- Sismicidad superficial ($h \leq 60$ km) presente en la región Sur de Perú para el período 1970-2000 ($mb \geq 4.0$) según el Catálogo Sísmico del IGP. Las trazas de falla corresponden a Macharé y Leureyro (1991).

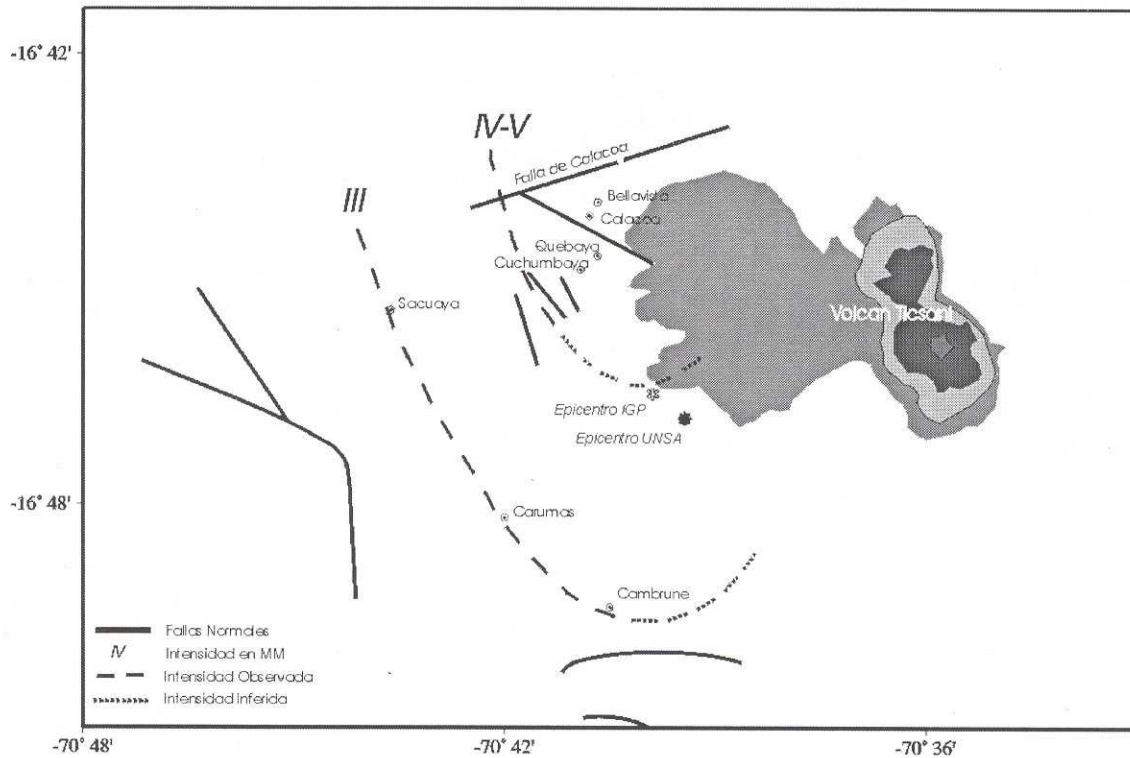


Figura 2.- Principales elementos tectónicos presentes en el área de Calacoa y del volcán Ticsani. Las líneas discontinuas indican las intensidades en la escala Mercalli Modificada. Las estrellas indican el epicentro preliminar del sismo de Calacoa obtenido por el IGP (en blanco) y por el IGUNSA (en negro).

dependen del tipo de esfuerzo actuante (compresión o tensión). En esta región, el área de Calacoa ha sido afectada por deformaciones pequeñas asociadas al lento levantamiento de la Cordillera Andina, el mismo que ha producido en superficie la formación de fallas de corta longitud (Figura 2). En general, estas fallas producen sismos de magnitud pequeña; es decir, prácticamente imperceptibles para la población, pero también pueden generar sismos de magnitud moderada o enjambres sísmicos en períodos de tiempo muy cortos afectando en gran porcentaje a las viviendas débiles, las mismas que son típicas de estas regiones (viviendas de quincha y piedra).

En la Figura 2, se observa que en el área de Calacoa las fallas de corta longitud, en general, corresponden a procesos extensivos propios de zonas o áreas ubicadas en los Altos Andes. De estas fallas, la de Calacoa se ubica a 1 km al Norte de la localidad del mismo nombre con una orientación NE-SW y una longitud de 7 km. Asimismo, parte de este sistema se ubica a 0.3 km, al Sur de Calacoa con orientación NW-SE sobre una longitud de 4 km aproximadamente, la misma que corta a la anterior en su extremo SW. Otros sistemas de fallas están ubicados al SW de la localidad de Cuchumbaya con una orientación NW-SE y longitudes de 0.8, 1.7 y 1.9 km. Cerca a las localidades de Sacuaya, Cambrune y Carumas, puede identificarse 2 sistemas de fallas de longitud mayor, las mismas que no tiene relación con las deformaciones locales presentes en los alrededores de Calacoa. La reactivación de estas fallas, debido a la ocurrencia de sismos, es poco

frecuente; sin embargo, debido a la longitud de las mismas y a su proximidad a algunas localidades, cuando ésta ocurre produce destrucción y algunas veces pérdidas humanas.

EL SISMO DE CALACOA DEL 6 DE MAYO DE 1999

Parámetros Hipocentrales

El epicentro del sismo de Calacoa fue localizado por el IGP y por el IGUNSA a 5 y 6 km al SSE de la localidad del mismo nombre, distrito de San Cristóbal, provincia de Mariscal Nieto, departamento de Moquegua (Figura 2). Este sismo de carácter local, tuvo una magnitud moderada del orden de 3.8 mb (IGP) y 4.1 M_L (IGUNSA). Las localizaciones epicentrales obtenidas por el IGP y el IGUNSA se presentan en la Tabla 1, siendo estas bastante relativas debido a que fueron obtenidas a partir de la diferencia de tiempos de llegada T_s-T_p (distancia epicentral) y de las características del movimiento de la partícula del suelo utilizando la información de las estaciones TOQ (IGP) y ARE (IGUNSA), ambas de 3 componentes (Z, N-S y E-W). Por lo tanto, la confiabilidad de los resultados depende básicamente de las características del registro del sismo en las tres componentes de la estación y de la amplitud de la primera onda (P) que llega a la misma. Al no existir mayor información, el IGP y el IGUNSA utilizaron ambas localizaciones en las evaluaciones preliminares del sismo de Calacoa.

Tabla 1.- Parámetros hipocentrales del sismo de Calacoa del 6 de Mayo de 1999.

Hora Local	Latitud	Longitud	Prof. (km)	Mag.	Institución
23 04 59.40	-16.780°	-70.660°	Superficial	4.1 M _L	IGUNSA
23 04 58.10	-16.775°	-70.665°	Superficial	3.8 mb	IGP
23 04 42.58	-16.728°	-70.612°	6.5	4.0 Mw	Este estudio

Intensidades Sísmicas

La evaluación de las intensidades producidas por el sismo de Calacoa, fue realizada mediante encuestas por teléfono inmediatamente después de ocurrido el sismo. La información fue proporcionada por personal de las municipalidades, puestos de salud, policiales y personas naturales de las localidades de Carumas, Calacoa, Cuchumbaya, Sacuaya, Quebaya, Bellavista y Cambrune. La información recopilada fue interpretada utilizando la Escala Mercalli Modificada (MM), la misma que presenta las siguientes características:

Intensidad IV-V. Las localidades de Calacoa, Cuchumbaya, Bellavista y Quebaya fueron las más afectadas en sus viviendas debido a que estas, en su mayoría, estuvieron construidas con material rústico (adobe y piedras). Las personas salieron a las calles llenas de pánico debido al movimiento continuo del suelo.

Intensidad III. En las localidades de Cambrune, Carumas, y Sacuaya se observó menor daño en las viviendas; sin embargo, en algunos tramos de la carretera Carumas-Calacoa se produjo el desprendimiento de algunos bloques de piedras de diferentes tamaños.

Intensidad II. El sismo fue sentido suave por algunas personas en las ciudades de Arequipa y Tacna.

En la Figura 2, se presenta el mapa de intensidades del sismo de Calacoa, elaborado a partir de la información descrita anteriormente. En la figura se observa que las isosistas presentan, de manera aproximada, una forma elíptica y sugieren que el epicentro del sismo se ubicó al norte de las localidades de Calacoa y Bellavista.

Momento Sísmico Escalar y Radio de Fractura

Debido al tamaño moderado del sismo de Calacoa, éste fue registrado por pocas estaciones de la Red Sísmica Nacional a cargo del IGP, siendo la ubicada en la localidad de Toquepala (TOQ) la que presenta registros de buena calidad (distancia epicentral 64 km). Los registros del sismo obtenidos de esta estación, fueron utilizados para estimar el momento sísmico escalar y el radio de fractura del sismo de Calacoa a partir del espectro de amplitud del desplazamiento de la onda P. Para la aplicación de esta metodología debe suponerse que el proceso de ruptura obedece a una cizalla y si se considera una fractura de tipo circular, la parte plana del espectro será equivalente al momento sísmico escalar ($\Omega_0 = M_0$) y la frecuencia esquina (f_c), inversamente proporcional a las dimensiones de la fuente (Aki, 1967; Brune, 1970).

En la Figura 3 se presenta el espectro obtenido

para onda la P a partir de su registro en las componentes vertical (Z) y horizontal (NS) de la estación TOQ. Una vez identificada la parte plana del espectro (Ω_0) y la frecuencia esquina (f_c), el momento sísmico escalar es calculado utilizando la relación definida por Keilis-Borok (1960) y Stavrakakis et al, (1991) en 2×10^{22} dina-cm (M_0); mientras que, el radio de fractura es estimado en 1000 metros (r_0) a partir de la relación de Brune (1970).

Conocidos el momento sísmico escalar y el radio de fractura, la caída de esfuerzos ($\Delta\sigma$), el desplazamiento medio (Δu) y la magnitud energía (M_w) fueron calculados a partir de las relaciones establecidas por Brune (1970) y Kanamori (1977). Así, para el sismo de Calacoa se obtiene una caída de esfuerzos de 8 bars, un desplazamiento medio de 2 cm y una magnitud energía de 4.0 Mw.

Red Sísmica Temporal

El sismo de Calacoa, al igual que otros sismos de carácter superficial, fue seguido de un gran número de sismos de magnitudes pequeñas comúnmente llamados réplicas. A fin de registrar estas réplicas, el IGP procedió a instalar una red sísmica temporal compuesta por tres estaciones sísmicas portátiles en los alrededores de la localidad de Calacoa y del volcán Ticsani, tratando en lo posible de triangular la zona epicentral probable (identificada a partir de la ubicación preliminar y la intensidad máxima del sismo de Calacoa). Los puntos seleccionados para la instalación de las estaciones sísmicas se presentan en la Figura 4, éstas fueron del tipo portátil con sismómetros de período corto de una sola componente (sensor vertical SS-2) y registro analógico a razón de 120 mm/minuto (papel ahumado). El control de tiempo se realizó con un reloj interno previamente calibrado con la Hora Universal GMT en el IGPUNSA.

Las estaciones sísmicas portátiles funcionaron de manera ininterrumpida durante los días 12, 13 y 14 de Mayo de 1999, tiempo después del cual fueron retiradas debido a que la frecuencia de los sismos disminuyó considerablemente. Contrariamente, las estaciones sísmicas de la región Sur (permanentes) y que integran la Red Sísmica Nacional se encontraron operativas durante todo el período de crisis sísmica; sin embargo, debido a que estas se ubican en puntos alejados del área de interés, no pudieron registrar el total de las réplicas (Figura 4). La información obtenida de esas estaciones, ha sido utilizada básicamente para evaluar las características del sismo principal. Las coordenadas geográficas y características de las estaciones sísmicas portátiles y digitales se presentan en la Tabla 2.

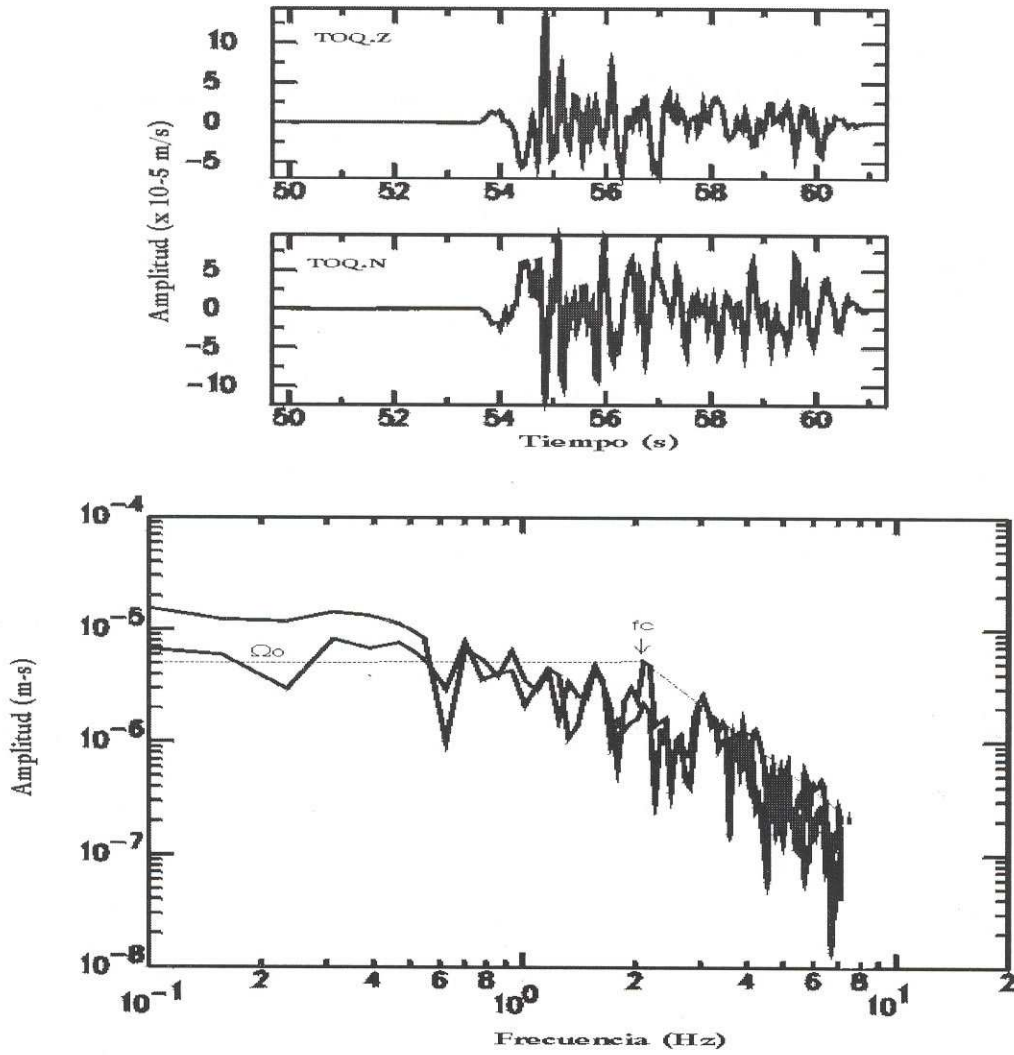


Figura 3.- Registros del sismo de Calacoa en la estación de Toquepala (TOQ) y espectro de amplitud de la onda P para las componentes vertical (Z) y horizontal (N-S).

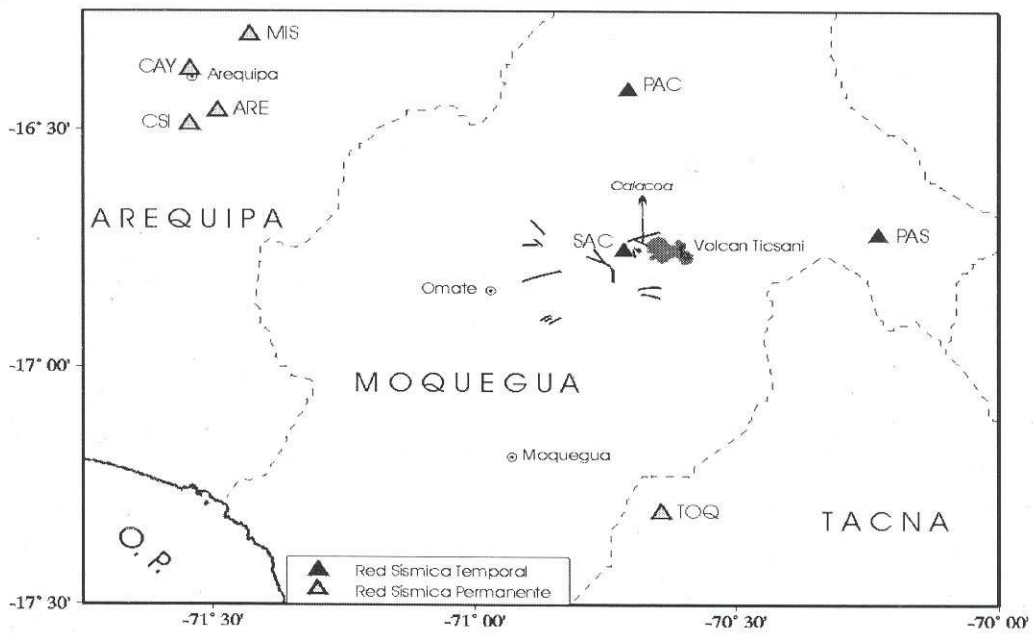


Figura 4.- Distribución de las estaciones sísmicas que integran la red sísmica temporal del IGUNSA (triángulos en negro) y la Red Sísmica Nacional a cargo del IGP (triángulos en gris). O.P., indica Océano Pacífico.

Tabla 2.- Coordenadas geográficas y características de las estaciones sísmicas temporales y permanentes utilizadas en el estudio del sismo de Calacoa.

Estación y Código	Latitud	Longitud	Tipo	Tipo-Registro	Institución
Sacuaya, SAC	-16.757°	-70.715°	PS-2	Analógico	IGUNSA
Pachas, PAC	-16.416°	-70.707°	PS-2	Analógico	IGUNSA
Pasto Grande, PAS	-16.725°	-70.230°	PS-2	Analógico	IGUNSA
Arequipa, ARE	-16.462	-71.491	Benioff	Analógico 3C	IGUNSA
Toquepala, TOQ	-17.307°	-70.643°	BB	Digital 3C	IGP
Misti, MIS	-16.301°	-71.430°	BB	Digital 3C	IGP
Cayma, CAY	-16.376°	-71.545°	SP	Digital SP	IGP
Cerro San Ignacio, CSI	-16.494°	-71.547°	SP	Digital SP	IGP

3C = Tres componentes

SP = Periodo Corto

BB = Banda Ancha

Réplicas

El análisis preliminar del total de las réplicas registradas en la estación sísmica ARE (IGUNSA), permitió observar que entre los días del 6 al 13 de Mayo, el número mayor de réplicas se produjo en los días 7 y 10; mientras que, en días posteriores la frecuencia de las mismas fue totalmente irregular, tal como se muestra en la Figura 5. El número de réplicas registradas por esta estación es similar al reportado por el Instituto Geofísico del Perú (Tavera y Perez-Pacheco, 2000). Algunas de estas réplicas, fueron sentidas en las localidades de Carumas, Pachas y Sacuaya con intensidades menores a III en MM.

A fin de calcular los parámetros hipocentrales de las réplicas del sismo de Calacoa, se procedió a realizar la lectura de las fases P y S de todos los eventos sísmicos registrados por las estaciones portátiles del IGUNSA y por la Red Sísmica Nacional para el período comprendido entre los días del 6 al 15 de Mayo de 1999. La lectura de los tiempos de llegada de las fases P y S, necesarios para la localización del sismo, ha sido realizada con errores del orden de 0.1 y 0.3 segundos respectivamente, siendo este mayor para la onda S debido a los rápidos cambios en la frecuencia de la señal, lo cual dificultó su identificación. La correlación de los tiempos de llegada del total de las fases sísmicas correspondientes a las réplicas registradas

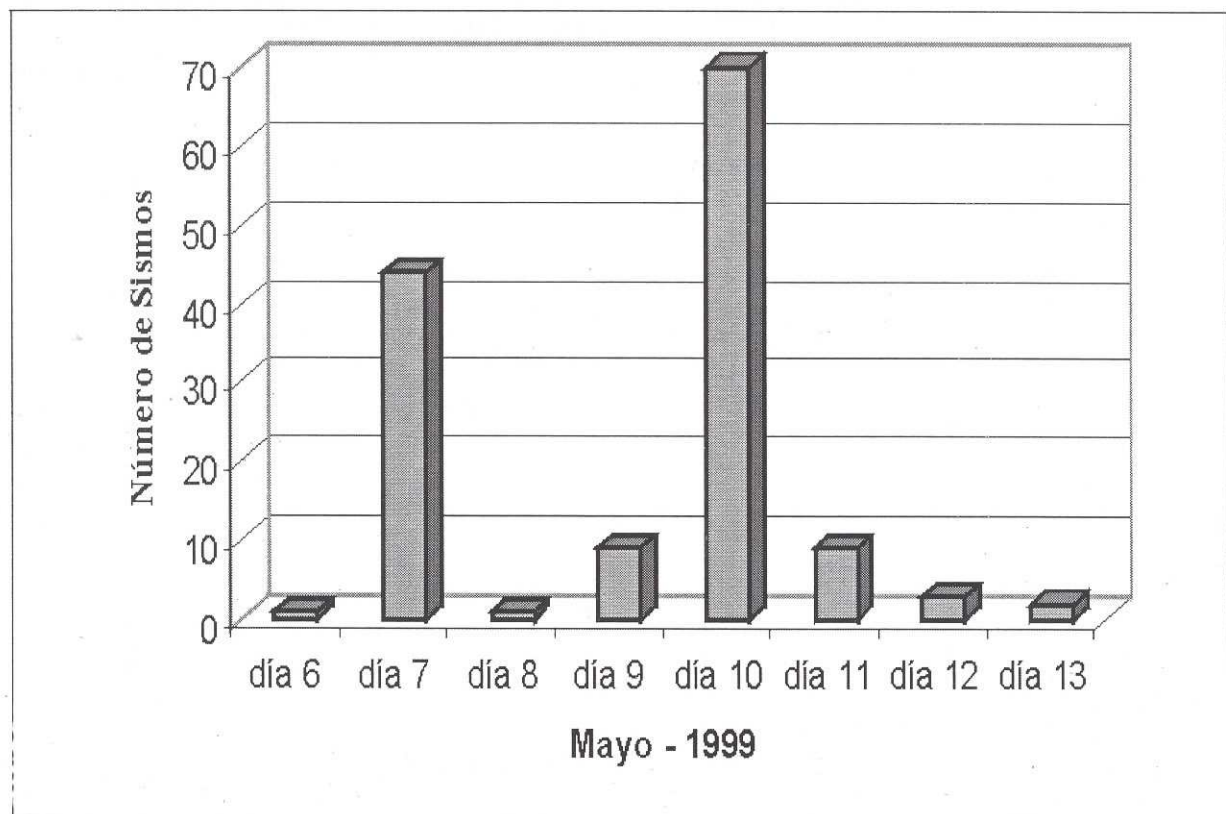


Figura 5.- Histograma del número de réplicas del sismo de Calacoa registradas en la estación sísmica ARE del IGUNSA.

por ambas redes, ha permitido seleccionar únicamente 6 sismos, los mismos que presentan 3 lecturas de onda P y al menos 2 para la onda S. El resto de los sismos fueron registrados en una o dos estaciones; por lo tanto, debido a la falta de un número mayor de fases, no pudieron ser localizados.

Para la localización de las réplicas se utilizó el algoritmo EPI (Rodríguez, 1994) y el modelo de velocidad propuesto por Dorbath et al., (1986) y Lindo (1993), el mismo que ha sido ampliamente utilizado en estudios de microsismicidad realizados en la región andina del Perú Central (Tabla 3). A fin de corregir la velocidad de las ondas S, se ha construido la curva de Wadatti con las lecturas del total de las réplicas registradas en las estaciones del IGUNSA y del IGP (Figura 6), siendo el

valor de $V_p/V_s = 1.77$ similar al obtenido por Dorbath et al., (1986) y Lindo (1993). Los parámetros hipocentrales de las réplicas analizadas en este estudio se presentan en la Tabla 4.

Para estimar la magnitud de las réplicas, se ha procedido a leer la duración de sus registros en las estaciones de la red sísmica portátil a fin de utilizar la ecuación definida por Klein (1978),

$$M_L = -1.1 + 2 * \text{Log} (D) + 0.0007 (\Delta)$$

donde, M_L es la magnitud local, D la duración del registro del sismo en segundos y Δ la distancia epicentro-estación. Las 6 réplicas, consideradas en este estudio, presentaron magnitudes locales menores a $3.5 M_L$.

Tabla 3.- Modelo de distribución de velocidades utilizado en este estudio.

Vp (km/seg.)	Profundidad (km)
6.0	0-25
6.8	25-55
8.0	> 55

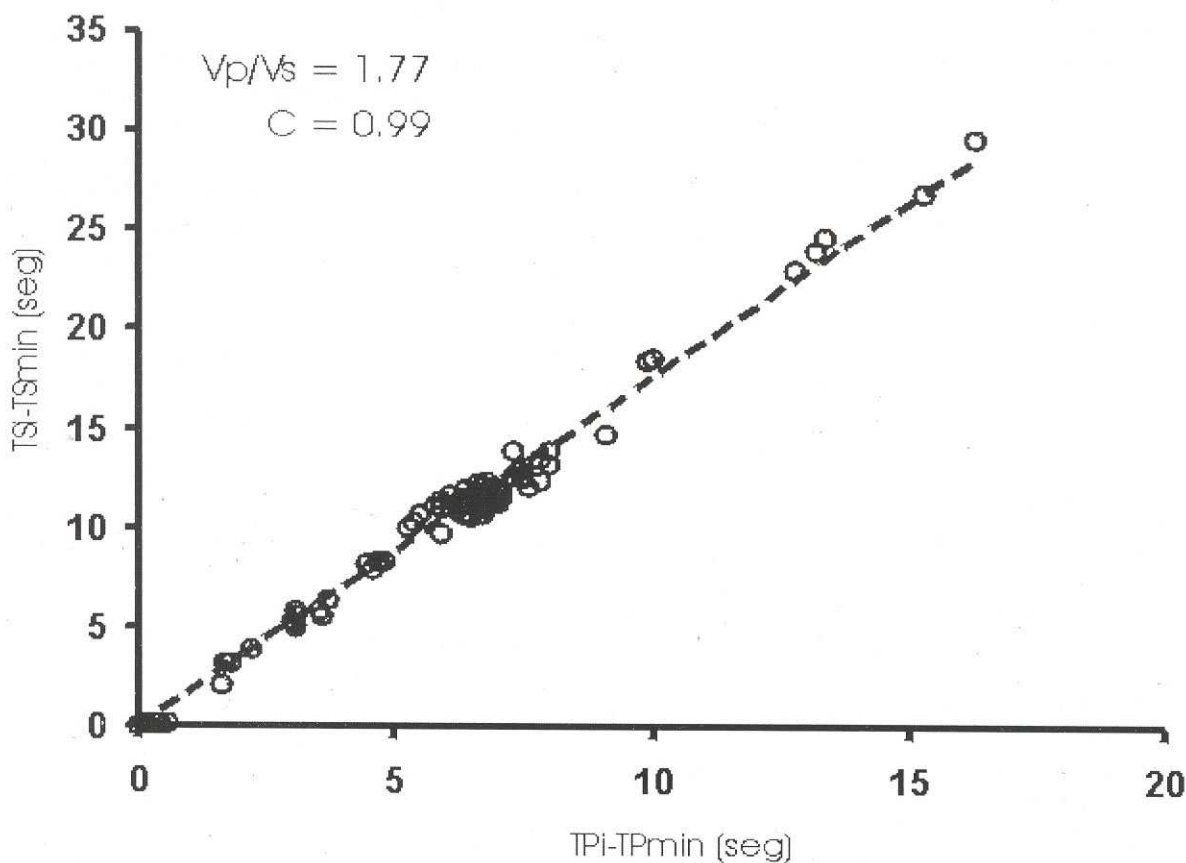


Figura 6.- Curva de Wadatti construida con el total de las réplicas del sismo de Calacoa registradas por las estaciones temporales de la UNSA y permanentes del IGP. V_p/V_s corresponde a la relación de velocidades y C el coeficiente de correlación del ajuste.

Tabla 4.- Parámetros hipocentrales de las réplicas analizadas y localizadas en este estudio.

Fecha .dd mm.aa	Hora Origen .hh mm ss.ss	Latitud	Longitud	Prof. (km)	Mag. (M _L)
13 05 1999	00 39 33.39	-16.6815°	-70.4217°	6.0	3.5
13 05 1999	03 00 26.24	-16.7337°	-70.6325°	11.5	2.8
13 05 1999	03 02 31.20	-16.6937°	-70.6036°	4.6	2.1
13 05 1999	05 21 20.47	-16.6767°	-70.6116°	3.0	1.9
13 05 1999	15 42 48.43	-16.6765°	-70.6117°	4.5	2.1
14 05 1999	06 51 50.47	-16.6828°	-70.6087°	4.0	2.1

Relocalización del Sismo Principal

Tal como se describió anteriormente, el sismo de Calacoa fue registrado por las estaciones de la red sísmica permanente (MIS, CSI, CAY, TOQ y ARE), todas ubicadas en la región Sur y si se considera la distribución azimutal de estas estaciones, así como sus distancias epicentrales (estación-zona epicentral), prácticamente sería imposible localizar el sismo utilizando esta información y los algoritmos tradicionales (Figura 4). A fin de evaluar la localización preliminar obtenida para el sismo de Calacoa por el IGP y el IGUNSA, a continuación se sigue dos procedimientos simples utilizando información de la Red Sísmica Nacional y temporal.

El primer procedimiento considera analizar y evaluar el movimiento de la partícula de la onda P en el registro del sismo en tres direcciones: Z, N-S y E-W. En general, las ondas de volumen contienen un alto grado de polarización lineal y el movimiento de la partícula a la llegada de una onda coincide con el azimut de propagación de la energía contenida en las ondas de compresión (onda P). Esta característica permitiría determinar el azimut si se analiza el registro de la onda en sus tres componentes (Z, NS y EW). Si se asume que $u_j = (u_{jN}, u_{jE}, u_{jZ})$ es el movimiento de la partícula en el instante j para la onda P, el azimut estación-epicentro puede ser determinado con la composición en el plano N-E de los distintos puntos u_{jN} , u_{jE} obtenidos para diferentes instantes de tiempo j para la misma fase, formándose una recta que puede ser ajustada por mínimos cuadrados. Evidentemente, el vector resultante tiene dos sentidos y produce una ambigüedad de 180° en la solución, la misma que puede ser salvada si se utiliza información de estaciones sísmicas literalmente opuestas, tal como es el caso del presente estudio y para el cual no es necesario calcular la distancia epicentral (Ts-Tp), debido a que la intersección de los vectores indicaría la ubicación del epicentro del sismo. A fin de aplicar este procedimiento, se ha utilizado el registro del sismo de Calacoa en las tres componentes de las estaciones MIS y TOQ (Z, NS, EW), ambas ubicadas en los extremos Norte y Sur de la zona epicentral y a distancias de 90 y 64 km respectivamente (Figura 4). En la Figura 7, se muestra los gráficos correspondientes a la polarización de la onda P en las componentes horizontales de estas estaciones, así como la orientación de los vectores estación-epicentro

para las estaciones MIS y TOQ. Obsérvese que dichos vectores se cortan en un punto ubicado en las coordenadas -16.68° y -70.58°; es decir, a 11 km al NE de la localidad de Calacoa, próximo a la falla del mismo nombre, lo cual sugiere que el sismo podría haber tenido su origen en la reactivación de esta falla.

Un segundo procedimiento para localizar el sismo de Calacoa, permite considerar los tiempos Ts-Tp de las réplicas registradas por las estaciones sísmicas temporales y digitales, además de la información obtenida de las estaciones MIS, CSI, CAY y ARE para el sismo principal (Figura 4). Del total de las réplicas, únicamente la ocurrida el 13 de Mayo a 03 horas y 00 minutos fue registrada por las estaciones del IGUNSA (SAC, PAC y PAS) y del IGP (TOQ). Para esta réplica, las diferencias entre el tiempo de llegada de las fases S y P (Ts-Tp) a las estaciones SAC, PAC y PAS son de 1.8, 4.3 y 5.8 segundos respectivamente, similar al promedio obtenido para el Ts-Tp de las 6 réplicas localizadas previamente. Asimismo, en el registro de la estación de TOQ la misma réplica presenta una diferencia Ts-Tp de 7.5 segundos, prácticamente igual a la observada en el registro del sismo de Calacoa. A fin de proceder a recalculer el hipocentro del sismo, al algoritmo EPI se le adicionó una subrutina que permite generar los tiempos teóricos de llegada de las ondas P y S, desde un hipocentro hipotético a las estaciones SAC, PAC y PAS a partir del tiempo origen del sismo principal y del valor Ts-Tp obtenido para la réplica del 13 de Mayo (03h00m). El hipocentro teórico presenta una profundidad de 10 km y sus coordenadas corresponden a un punto que indica la ubicación promedio del total de las réplicas localizadas en este estudio. Una vez creada la base de datos, se le adicionó la información obtenida de las estaciones MIS, CSI, CAY y ARE. El algoritmo EPI reinicia el proceso de localización realizando un número mayor de iteraciones a fin de buscar reducir los valores en las residuales de las ondas P y S, especialmente para las estaciones SAC, PAC y PAS. Una vez obtenidos los valores mínimos para las residuales, el algoritmo procede a realizar el cálculo de los parámetros hipocentrales del sismo y entregar la solución final en función del mínimo valor de ajuste para la raíz media cuadrática (RMC). Así, el resumen de la mejor solución obtenida para el hipocentro del sismo de Calacoa se presenta en la Tabla 5 y en la Figura 8. Según estos

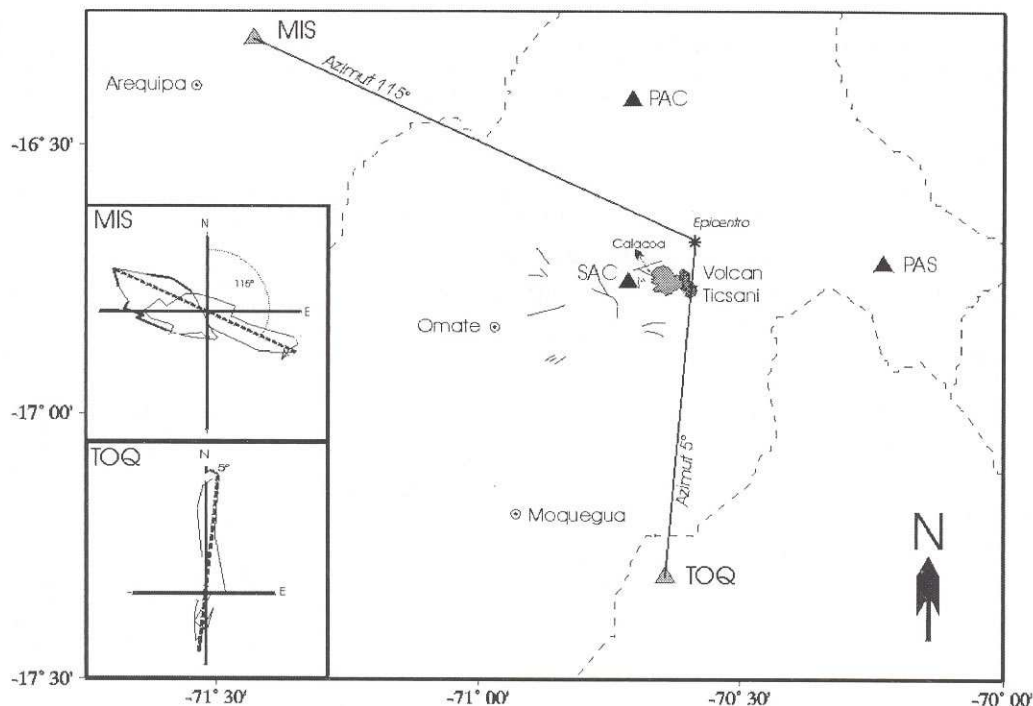


Figura 7.- Cálculo del acimut estación_epicentro del sismo de Calacoa a partir del movimiento de la partícula de la onda P registrada en las estaciones MIS y TOQ. La intersección de los vectores indica la ubicación del epicentro del sismo (estrella).

resultados, el epicentro se localizaría a 7 km al NE de la localidad de Calacoa; es decir, próximo al punto definido por la intersección de los vectores de azimut estación-epicentro (Figura 7) y totalmente opuesto a la ubicación epicentral obtenida inicialmente por el IGP y el IGUNSA. El foco del sismo se ubicaría a una profundidad de 6.5 km.

INTERPRETACION

Los sismos que ocurren en el interior del continente y específicamente en los Altos Andes (> 3,000 m s.n.m.), se deben principalmente a procesos de deformación superficial de carácter local, de ahí que la longitud de las fracturas o fallas visibles en superficie sean de longitudes pequeñas. El “Sismo de Calacoa” tiene su origen en este tipo de procesos y a la falta de redes sísmicas locales, este y otros sismos similares frecuentemente no son registrados por estaciones que integran redes regionales y si lo son, la información no es de buena calidad y útil para localizar el sismo. En este caso, el uso de redes sísmicas temporales permiten registrar sismos de menor tamaño (microsísmicidad y réplicas), los mismos que en general ayudan en la interpretación de los procesos complejos que acompañan a este tipo de deformaciones. Asimismo, en los Altos Andes, los sismos se producen cerca de la superficie y de ahí que a pesar de su magnitud moderada, puedan ser sentidos con intensidades relativamente altas. Este es el caso del “sismo de Calacoa”.

Las réplicas del sismo de Calacoa, localizados en este estudio (Figura 8), así como del sismo principal (estrella), se ubican en el extremo derecho de la estructura

de mayor longitud del sistema de fallas de Calacoa, sugiriendo que estos se habrían producido debido al fracturamiento o reactivación de esta falla sobre una longitud de 8 km en dirección NE. De las 6 réplicas localizadas, cuatro se ubican en el extremo oriental de la falla reactivada indicado la posible parada de la ruptura; mientras que, las otras dos sugieren la continuidad en la ruptura de la falla de Calacoa.

Los métodos utilizados en este estudio para relocalizar el sismo de Calacoa, permitieron ubicar el epicentro a 7 y 11 km al NE de la localidad del mismo nombre, sobre la prolongación de la traza de la falla de Calacoa. Estas localizaciones epicentrales, son totalmente opuestas a la obtenida por el IGP y el IGUNSA. De acuerdo a la información utilizada y procedimientos seguidos en este estudio para relocalizar el hipocentro del sismo de Calacoa, se asume que los valores obtenidos con el segundo método definen mejor la ubicación del epicentro del sismo de Calacoa. Esta nueva ubicación es coherente con las máximas intensidades observadas y con la distribución de las réplicas en dirección NE. El momento sísmico ($M_0=2 \cdot 10^{22}$ dina-cm) y la magnitud energía ($M_w=4.0$) obtenidos a partir del análisis espectral ponen en evidencia el tamaño moderado del sismo de Calacoa (Figura 3); mientras que, los valores para la caída de esfuerzos (8 bars) y desplazamiento medio (2 cm) son coherentes con los estimados para sismos de magnitudes similares ocurridos en zonas de deformación continental (Tavera et al, 2000; Tavera et al, 2001).

En el extremo superior de la Figura 8, se muestra una sección vertical con el total de las réplicas y sismo principal localizados en este estudio, según la línea AA´.

Tabla 5.- Parámetros hipocentrales del sismo de Calacoa del 6 de Mayo de 1999. GMT= Tiempo Universal, Esta = código de la estación, Distan=distancia epicentral, Azm=azimut estación-epicentro, TPCal=tiempo teórico onda P, P/S-Seg=tiempo de llegada de la onda P/S, P/S-Res=residual onda P/S, W=peso de la lectura.

Sismo Calacoa										
Fecha: 07 Mayo 1999 Hora Origen (GMT): 04h 04m 42.58s										
Latitud: $-16.728^{\circ} \pm 0.1$ km										
Longitud: $-70.612^{\circ} \pm 0.0$ km										
Profund: 6.5 km ± 0.2 km										
Esta	Distan	Azm	Ain	TPCal	P-Seg	P-Res	W	S-Seg	S-Res	W
TOQ	64.6	183	114	11.2	53.8	0.00	62.4	-0.00		
CAY	106.9	291	113	18.5	61.1	0.00	75.3	-0.00		
CSI	103.1	285	113	17.8	60.4	-0.00	0.0	0.00		
MIS	99.3	298	113	17.2	59.8	0.00	0.0	0.00		
ARE	98.3	287	113	17.0	59.6	0.00	72.7	0.00		
SAC	11.0	256	127	2.3	44.8	-0.00	46.7	0.00		
PAC	36.0	343	115	6.3	48.9	-0.00	53.8	-0.00		
PAS	40.4	90	115	7.1	49.7	0.00	55.2	0.00		
rmc = 0.02										

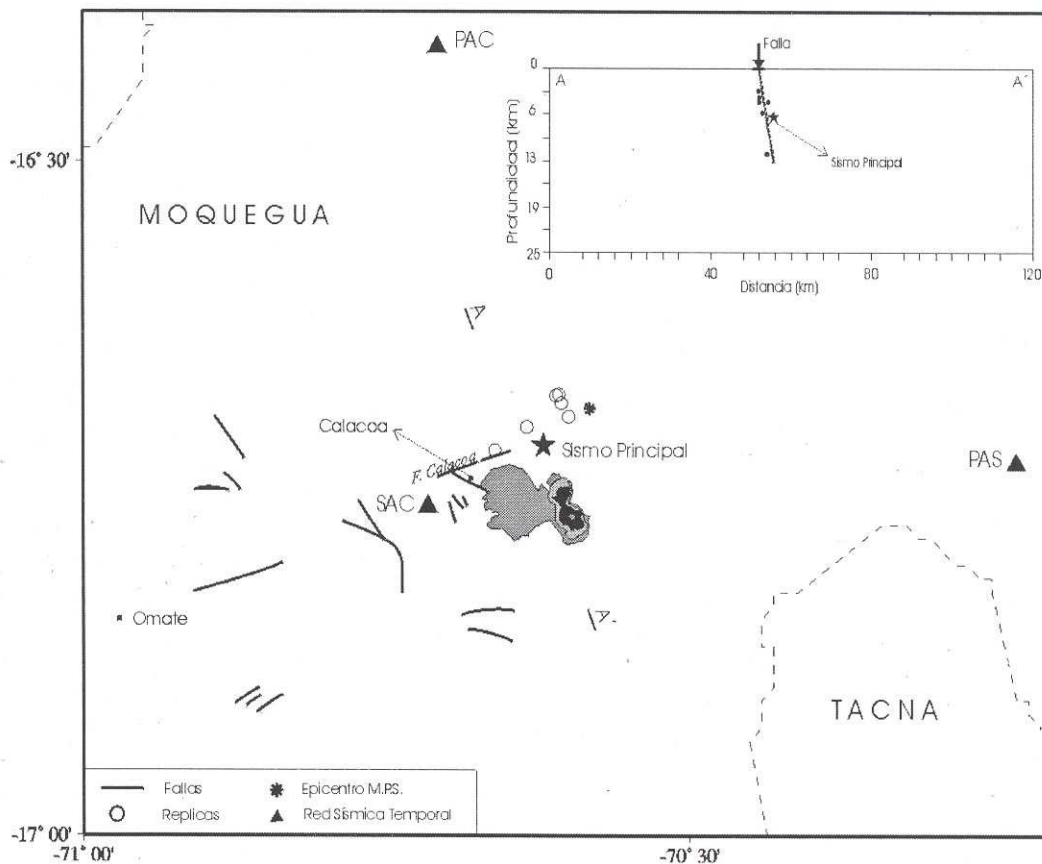


Figura 8.- Principales elementos tectónicos en el área de Calacoa, distribución de las replicas (círculos) y del sismo de Calacoa del 6 de Mayo de 1999 (estrella). El asterisco indica el epicentro obtenido a partir del movimiento de la partícula de la onda P (M.P.S.). En la parte superior se muestra una sección vertical en función de la profundidad de los focos sísmicos según la dirección A-A'.

Obsérvese que las réplicas se distribuyen siguiendo una línea de pendiente alta en dirección SE hasta alcanzar una profundidad del orden de 13 km, siendo el sismo principal localizado en la parte media del total del área afectada por la ruptura. Estos resultados ponen en evidencia el carácter superficial de las deformaciones presentes en esta zona.

Los resultados obtenidos en este estudio, son un ejemplo de la importante deformación superficial presente en áreas relativamente pequeñas, las mismas que producen sismos de magnitud moderada con la consecuente ocurrencia de un número importante de réplicas durante períodos de tiempo muy cortos. Asimismo, estas deformaciones puntuales permiten que las intensidades máximas se concentren en áreas pequeñas, siendo prácticamente imperceptibles a distancias mayores.

Actualmente, es difícil prevenir a las poblaciones afectadas por el sismo de Calacoa sobre la recurrencia de este tipo de fenómeno, debido a que se requiere de instrumentos de alta sensibilidad instalados cerca de la zona de interés. Al igual que Tavera y Perez-Pacheco (2000), los resultados obtenidos en este estudio, permiten descartar totalmente la posibilidad de que esta sismicidad haya sido producida por la reactivación del volcán Ticsani, tal como se difundió en su momento por los medios informativos y por los pobladores de las localidades afectadas.

CONCLUSIONES

El análisis y evaluación de las características del sismo de Calacoa, así como de algunas de sus réplicas utilizando información obtenida de una red sísmica temporal (IGUNSA) y de la Red Sísmica Nacional (IGP), han permitido llegar a las siguientes conclusiones:

El sismo de Calacoa fue de carácter netamente local y foco superficial ($h = 6.5$ km), de ahí su magnitud moderada (4.0 Mw) y área pequeña de intensidad máxima (IV-V en MM). Este sismo fue localizado a 7 km al NE de la localidad del mismo nombre sobre la proyección, en esa dirección, de la falla de Calacoa. El sismo presenta un momento sísmico escalar equivalente a 2×10^{22} dina-cm.

La distribución espacial de las réplicas localizadas en este estudio, sugiere que la ruptura presentó una longitud de 8 km en dirección NE y una profundidad del orden de 13 km. La distribución de las réplicas en función de la profundidad de sus focos, es sobre un plano de ruptura ligeramente inclinado en dirección SE.

Se descarta totalmente la posibilidad de que el sismo y sus réplicas hayan sido debidos a la reactivación del volcán Ticsani.

Los parámetros finales del sismo de Calacoa son:

Fecha:	06 de Mayo de 1999
Hora Origen:	23:04:42.85 (Hora Local)
Latitud Sur:	-16.728
Longitud Oeste:	-70.612
Profundidad:	6.5 km

Magnitud:	4.0 Mw
Momento Sísmico:	2×10^{22} dina-cm
Io Máxima:	IV-V en MM
Desplazamiento medio:	2 cm
Caída de Esfuerzos:	8 bars
Radio de Fractura:	1000 metros

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Director Técnico del IGP, Dr. Hernán Montes por el apoyo brindado a fin de poder realizar el presente estudio, así como facilitar la estancia de uno de los autores (V.A.) en el CNDG-Sismología. A la Sra. Ivonne Perez-Pacheco por realizar el análisis de las de réplicas del sismo de Calacoa registrados por las estaciones de la Red Sísmica Nacional y al Ing. J. Gómez por sus comentarios y sugerencias. Finalmente, al personal del Instituto Geofísico de la UNSA que participaron en los diversos trabajos de campo. Publicación N°006-2001-CNDG-IGP.

BIBLIOGRAFIA

AGUILAR V., ESCALANTE C., MINAYA A., TICONA, J., BERROCAL J. & FERNANDEZ C. (2000).- Estructura y Actividad del Volumen Sísmico en la zona de Subducción en el Sur del Perú (13°S – 18.5°S). 31 International Geological Congress, Agosto – 2000, Rio de Janeiro, Brasil.

AKI K. (1967).- Scaling law of energy spectrum. *J. Geophys. Res.*, 72, 1217-1231.

BARAZANGI M. & ISACK L. (1976).- Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca Plate beneath South America. *Geology*, 4, 686-692.

BRUNE J. (1970).- Tectonics stress and spectra of seismic shear waves. *J. Geophys. Res.*, 75, 4997-5009.

CAHILL T. & ISACKS B. (1992).- Seismicity and shape of the subducted Nazca Plate. *J. Geophys. Res.*, 97, 17503-17529.

DORBATH C., DORBATH L., CISTERNAS A. & DEVERCHÉRE J. (1986).- On crustal seismicity of the Amazonian foothill of the Central Peruvian Andes. *Geophys. Res. Lett.*, 13, 1023-1026.

DORBATH L., DORBATH C., JIMENEZ E. & RIVERA L. (1991).- Seismicity and tectonics deformation in the eastern cordillera and the sub-andean zone of central Peru. *Journal of South American Earth Sciences*, 4, 13-24.

GARCÍA W. (1978).- Geología e los cuadrángulos de Puquina, Omate, Huatire, Mazo Cruz y Pizacoma. *Boletín N° 29, INGEMMET, Lima-Peru*, 45 p.

- KANAMORI H.** (1977).- The energy release in great earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 82, 2981-2987.
- KEILIS-BOROK V.** (1960).- Investigation of the mechanism of earthquakes. *Soc. Res. Geophys.*, 4, 29.
- KLEIN F.** (1978).- Hypocenter location program Hypoinverse., *U.S. Geological Survey, Open File Report.*, 78-694.
- LINDO R.** (1993).- *Seismotectonique des Andes du Pérou Central: Apport des données sismologiques de haut precision.* Tesis Doctoral. Universidad Louis-Pasteur de Strasbourg, Francia, 300 p.
- MACHARÉ J. & LEUREYRO J.** (1991).- Mapa Neotectónico del Perú. Instituto Geofísico del Perú y Centro Regional de Sismología para América del Sur.
- MÉGARD M.** (1978).- Etude géologiques des Andes du Pérou Central. *Mem. ORSTOM*, 86, 310 pp.
- MINSTER J. & JORDAN T.** (1978).- Present-day plate motions. *J. Geophys. Res.*, 83, 5331-5334.
- RODRIGUEZ S.** (1994).- EPI, programa de cálculo epicentral., Instituto Geofísico del Perú, Informe Interno, 12 p.
- SÉBRIER M., MERCIER J., MACHARÉ J., BONNOT D. & CABRERA J.** (1985).- Quaternary normal and reverse faulting and state stress in the central Andes of southern Peru. *Tectonics.*, 4, 739-780.
- STAUDER W.** (1975).- Subduction of th Nazca under Peru as evidenced by focal mechanisms and by seismicity. *J. Geophys. Res.*, 80, 1053-1064.
- STAVRAKAKIS G., BLIOMA S. & GOUTIS C.** (1991).- Dynamics sources parameters of the 1981 Gulf of Corinth earthquakes. *Tectonophysics*, 185, 261-275.
- SUAREZ G., MOLNAR P. & BURCHFIEL B.** (1983).- Seismicity, fault plane solution, depth of faulting and active tectonics of the Andes of Peru, Ecuador and southern Colombia. *J. Geophys. Res.*, 88, 10403-10428.
- TAVERA H. & BUFORN E.** (1998).- Sismicidad y Sismotectónica de Perú. En: Sismicidad y Sismotectónica de Centro y Sudamérica; Buforn, E. y Udías A. (eds.), Física de la Tierra, Univ. Complutense de Madrd, 10, 187-219.
- TAVERA H. & PEREZ-PACHECO I.** (2000).- Análisis del enjambre sísmico de Calacoa (Moquegua) de Mayo 1999. X Congreso Peruano de Geología Lima 19-22 de Julio 2000.
- TAVERA H., VILCAPOMA L. & MILLONES J.** (2000).- El Terremoto de Chuschi-Quispillacta (Ayacucho) del 31 de Octubre de 1999 (Mw=4.5). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 89, 13-20.
- TAVERA H., BUFORN E., BERNAL I. & ANTAYHUA J.** (2001).- Análisis de los procesos de ruptura de los terremotos ocurridos en 1990 y 1991 en el Valle del Alto Mayo (Moyobamba-Perú). Enviado al Boletín de la Sociedad Geológica del Perú.
- TAVERA H. & BUFORN E.** (2001).- Source Mechanism of Earthquake in Peru. *Journal of Seismology*, (in press).

LAS DUNAS EN EL LITORAL DEL PERU

Hans KINZL

Artículo publicado originalmente en «Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft in Wien. Festschrift Hans Spreitzer, Tomo 100. Fasc. I/II. Viena 1958. p. 5-17»
Traducción del alemán de Georg Petersen G. †
Con la colaboración de Víctor Benavides Cáceres

Playa y desierto, los dos ambientes principales de la arena eólica, colindan estrechamente en el litoral del Perú. De antemano se esperarían numerosas dunas y ya que la faja del litoral es fácilmente accesible debido a que la Carretera Panamericana atraviesa frecuentemente las zonas de la arena migratoria, deberían haber detallados estudios. En realidad si bien existen áreas extensas de arena, no siempre hay dunas perfectas; la bibliografía sobre estos fenómenos es escasa y se le conoce solo parcialmente en Europa. Por este motivo deseamos citar algunas de las publicaciones pertinentes, agregándoles algunas observaciones propias.

OBSERVACIONES ANTIGUAS

Los arenales y médanos del Perú constituyen fenómenos físico-geográficos, que los historiadores de la conquista española ya mencionan, pero observaciones más exactas se encuentran sólo en relatos de los viajeros de un tiempo muy posterior. Uno de los primeros sería Antonio de Ulloa, quien escribe sobre su viaje a través del desierto de Sechura (1740): “tan solo rompen la monotonía del camino los caprichosos e inestables médanos de arena móvil, que el viento levanta y al mismo tiempo destruye. En este pequeño mar de arena es muy fácil desviarse y perder el camino, pues basta, que sople el viento con alguna fuerza para que borren completamente todos los rastros de los animales”¹: Con mayor frecuencia se observaban antiguamente las dunas en el camino de Mollendo a Arequipa, donde los viajeros tenían que atravesar necesariamente el desierto, que más al norte del país podían evitar haciendo un viaje marítimo mas o menos largo. Por lo general, las informaciones sobre dicho camino se reducen a la mera constatación de las dunas, pero algunas veces proporcionan observaciones notables. Según J.J. Tschudi² las dunas pequeñas se desplazan mas ligero que las grandes; los movimientos y creaciones de

dunas nuevas en el desierto se activan plenamente sólo durante la estación cálida del año porque en la fría, la arena es húmeda y resiste fácilmente al viento; en los cerros las acumulaciones de la arena eólica yacen en su lado meridional, las faldas septentrionales en cambio están cubiertas solo raramente de arena.

Cl. R. Markham³ describe que los médanos cambian a veces de posición y que se sobreponen oblicuamente al camino pero que mantienen en si, su configuración. A.Raimondi⁴ observó las dunas en los alrededores del Tambo de la Joya durante su viaje del año 1863; describe su configuración y dirección y se admira que a pesar de las dunas, la pampa está libre de arena. Parece, “que el viento hubiese acarreado toda la arena de la llanura y acumulado en las dunas”.

Según E.R.Middendorf⁵ los médanos existen en todas las pampas arenosas de la costa, pero en ninguna parte en un número tan grande como en la Pampa de la Joya. Describe las formas y el avance de las dunas y las modificaciones de su configuración; a veces dos médanos colisionan, confundiendo poco a poco en un solo cuerpo, o se separan de nuevo. Sobre su viaje de Pisco a Ica Middendorf (pág.158) dice: “Se ven muchas colinas pequeñas extrañas de arena en donde sobresalen las copas de arbustos casi secos y cuyas raíces atrapan la arena. Cuando el viento arrastra la arena suelta debajo de ellas, quedan formas raras”. Middendorf se refiere a los céspedes tupidos de *Distichlis spicata*, que están aglutinados por costras de sal, y que, cuando el viento elimina la arena, sobresalen hasta varios metros sobre el suelo, produciendo aún en la actualidad tales formas extrañas (ver foto.1).

PUBLICACIONES MODERNAS

En tiempos recientes la fotografía aérea nos proporciona vistas ilustrativas de las formas y la distribu-

¹ Compárese A.Raimondi, *El Perú II*. P.280. Lima 1876.

² *Perú. Reiseskizzen aus den Jahren 1838-1842; I Bd. P.367., St.Gallen 1846.*

³ *Zwei Reisen in Peru. P.222. Leipzig 1865.*

⁴ *El Perú. Itinerarios de Viajes. Primer fascículo p.116, Lima 1929.*

⁵ *Perú. II Tomo. Das Küstenland, p.239, Berlín 1894.*

⁶ *Peru from the Air. Am. Geogr. Soc. Spec. Publ.12. New York 1930.*

† Fallecido el 21 de enero de 1985.



Foto 1. Mata de *Distichlis spicata* que se sobrepone a la sal y es privada de gran parte de su apoyo por el viento.

ción de las dunas en la costa peruana. En primer lugar debe citarse la obra ilustrada de G.R. Johnson⁶ que contiene numerosas y excelentes vistas de médanos. El haber puesto el avión al servicio de la investigación de las dunas en el Perú es mérito de Arnold Heim. El resultado de los vuelos sobre sus "dunas queridas" constituyen vistas aéreas muy ilustrativas que muestran sobre todo las diferentes formas de barcanas⁷.

Además de las dunas regulares y simétricas en forma de hoz o semilunar existen también otras completamente oblicuas; aparte de sencillas, hay otras que están compuestas de manera muy variada; además de dunas muy grandes existen otras pequeñas que se les sobreponen y que avanzan por encima, soldándose con ellas y separándose de nuevo. Un ejemplo magnífico constituye la barcana grande de Purpur cerca de Virú en el norte del Perú que reproduce Arnold Heim en base a una fotografía del Instituto Aereofotográfico del Perú. Esta misma duna se ha reproducido también en la foto aérea inferior de la lámina 23 del libro de E. De Martone Géographie aérienne, París 1948, aunque se le ubica erróneamente en el Sur del Perú.

Una primera reseña sobre los médanos en el litoral peruano ofrece J.A. Broggi⁸ que previa a una descripción geomorfológica y climatológica del paisaje trata del origen de las dunas y en especial de su distribución. En concordancia con los resultados generales de la investigación sobre dunas, también según Broggi, la arena proviene del intemperismo continental; los ríos la transportan al mar y el viento la arrastra de nuevo tierra

adentro a partir de la playa. Los vientos marinos predominantes proceden del sur, favoreciendo el desarrollo de dunas migratorias regulares; los vientos tienen una velocidad de aproximadamente 10 kms por hora, a veces alcanzan también 20 kms, especialmente, en las desembocaduras de los grandes valles donde se transforman en vientos intensos que ascienden el valle. Los campos grandes de dunas tienen su origen en las bahías grandes de contornos tendidos. Allí se produce una deflación de la arena, esparciéndola en forma de un manto, y tierra adentro se transforma en numerosas barcanas que se asocian en forma muy variada. Con el transcurso del tiempo el campo de dunas se convierte más y más en barcanas individuales. El conjunto de los médanos termina nítidamente al pie de los cerros altos. Las chorreras de lluvias y quebraditas en las faldas de los cerros se obstruyen por vallas de arena. La caída de lluvias ocasionales pueden constituir hasta pequeñas lagunas que cuando rebozan, pueden cubrir el pie del cerro con un cono de deyección de lodo.

Frecuentemente la arena se acumula a barlovento de los cerros próximos a la costa a manera de lomadas angostas de arena que luego se desintegran, tierra adentro, en barcanas. De acuerdo con los vientos principales las faldas meridionales se cubren primero de arena, pero a través de los pequeños pasos o abras la arena pasa también hacia el flanco norte donde se deposita a manera de un talud. Visto de lejos parece como si tales faldas estuviesen cubiertas de nieve.

Las dunas no se encuentran de ninguna manera

⁷ Publicado en su libro: "Wunderland Perú". Berna (s.a.) 1948.

⁸ Migración de arenas a lo largo de la costa peruana. Bol. De la Soc. Geol. del Perú. Tomo XXIV. Lima, 1952.

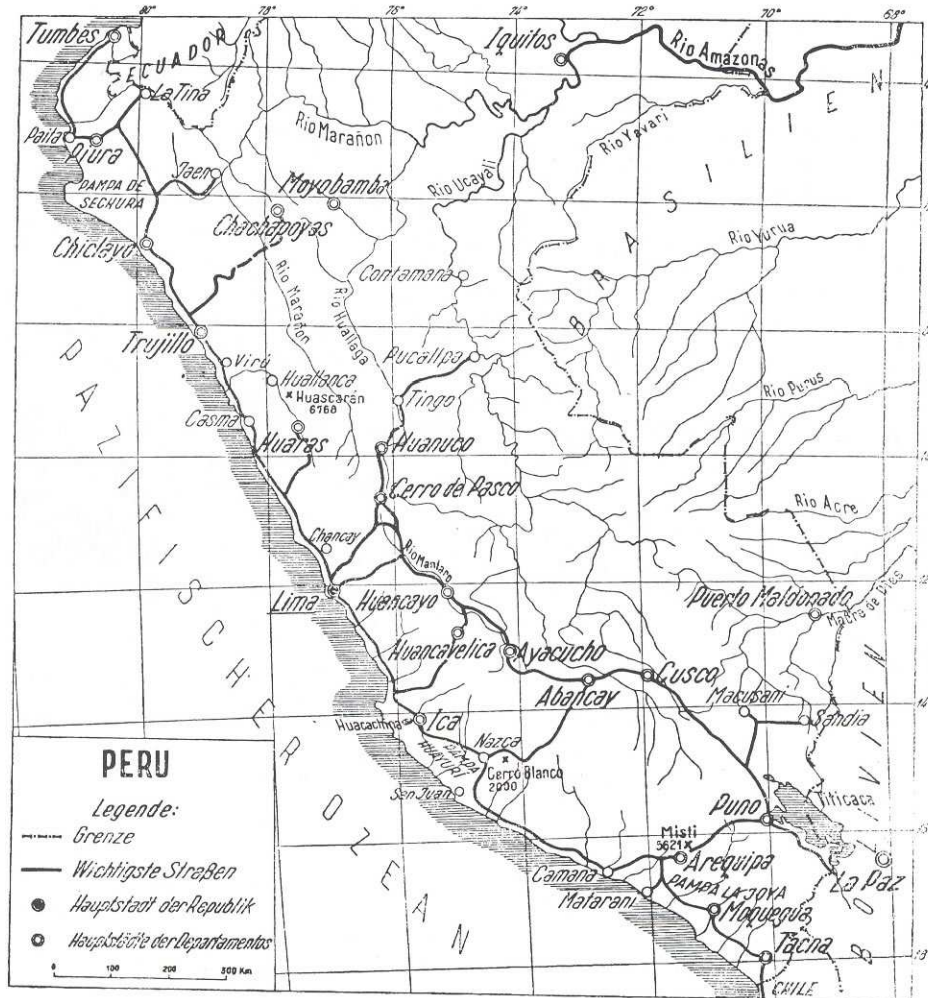


Abb. 1. (Bei einigen Namen des Kärtchens sind versehentlich die Akzente weggeblieben, so bei Jaén, Huarás, Huánuco und Marañón.)

Fig.1. Algunos de los nombres del mapa inadvertidamente, no llevan sus respectivos acentos, por ejemplo Jaén, Huaráz, Huánuco, Marañón.

repartidas irregularmente sino más bien en fajas relativamente largas y angostas correspondiendo a vías especiales del viento al que deben su origen. Broggi habla de chiflones y los describe como corrientes de aire especiales que en ciertos sitios soplan a partir de la costa (Virazón), internándose considerablemente tierra adentro. El viento actúa por lo tanto en el desierto no siempre sobre superficies extendidas sino más bien en fajas, según dijo ya E. Kaiser⁹. Broggi reproduce un ejemplo de chiflón en una foto aérea de la región al sur de Ancón; pero existen también semejantes fajas de dunas en muchos otros sitios, por ejemplo, al sur del río Pisco.

Complementando la exposición de Broggi diremos que se produce una deflación de arena también en costas escarpadas, siempre y cuando que se le anteponga una playa aunque fuera angosta. Según el terreno la arena asciende o en los surcos de la falda empinada o se esparce en forma superficial sobre la pendiente. Cuando esta última es muy pronunciada se producen deslizamientos parecidos a los aludes de nieve según se puede observar en la lámina 80 de la obra de Johnson. Por lo general las lomadas o

crestas y cumbres próximas a la costa están cubiertas de arena sin que se desarrollen dunas.

Los médanos migratorios están separados nítidamente del substrato. Esto se observa mejor donde se presentan aisladamente como por ejemplo en la región al interior de Mollendo. Precisamente las dunas más perfectas se encuentran en las llanuras que no tienen mucha arena, lo que se ha constatado también en otros desiertos.

Sin duda el litoral peruano se distingue por sus barcanas especialmente bonitas; E. De Martone¹⁰ tiene ciertamente razón si se considera las barcana movedizas como forma típicas de dunas para los desiertos sudamericanos. Queda por investigar si cada continente tiene su tipo propio de dunas.

DESCRIPCION DE DUNAS

Se puede prescindir de la descripción de una barcana típica, porque se encuentra en cada libro de texto sobre geomorfología; pero con todo se hace referencia a

⁹ Düsseldorfer Geographische Vorträge und Erörterungen, p. 89 – 1927.

¹⁰ Géographic aérienne, p. 126. París, 1948

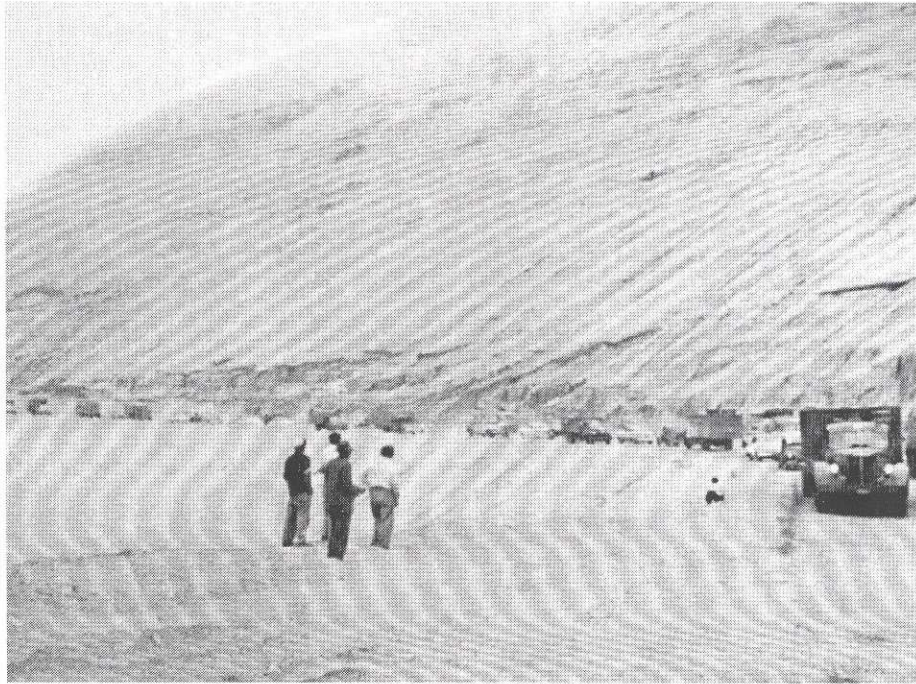


Foto 2. La carretera Panamericana entre Ancón y Chancay, sector de Pasamayo, construída sobre la pendiente de una duna que cae hacia el mar.

una denominación. En alemán se dice duna a manera de hoz (Sicheldüne) o de herraje (Hufeisendüne), mientras que el término duna arqueada (Bogendüne) es demasiado general. Debe rechazarse la palabra duna de casco de caballo que se usa en varias ocasiones hasta en libros de texto; se trata en este caso simplemente de una traducción errónea de la palabra inglesa *horseshoe dune*. Los extremos de la barcana en barlovento se llaman generalmente piernas, brazos, alas o colas de la duna. Mejor es la denominación cuernos, ya que la duna se traslada con ellos a las zonas nuevas y afecta a veces caminos y terrenos de cultivo. A. Raimondi¹¹ habló de las extremidades de la duna, Middendorf¹² ya de cuernos. Lo que llamamos la cresta de la duna, el beduino árabe muy poéticamente la compara por sus formas suaves y lisas con las caderas de una mujer.

LA MIGRACION DE LAS DUNAS

En una región donde las dunas amenazan caminos, poblaciones y cultivos, según es el caso de la costa peruana, la velocidad de su avance tiene especial significado. Oportunidades para observar el avance de la arena, se tienen en cada viaje a través del desierto costero, pues en muchos sitios los médanos estrechan la pista de la vía o aún la cubren íntegramente. Muchos trayectos tienen que limpiarse constantemente, así por ejemplo al interior de Salaverry en el norte del Perú, en la región de Lomas, y en la pampa La Joya al sur del Perú. A lo largo del camino carretero del nuevo puerto de San Juan, donde se embarcan los minerales de hierro de Marcona, hubo

necesidad de construir cercas al sur de la vía para retener la arena. Desde tiempos remotos los habitantes de Chilca (al sur de Lima) protegen sus hoyas de cultivos, construyendo en las lomas de las dunas vecinas, pequeños muros de adobe o de césped en forma similar a lo que hacen los habitantes del Sahara, en situaciones semejantes. Especialmente difícil y costoso es el mantenimiento de la carretera de Ancón a Chancay que se ha construído sobre una falda empinada de dunas con pendiente pronunciada hacia el mar. Este trecho llamado Pasamayo es temido por todos los choferes; constante y especialmente en días calurosos desliza desde arriba arena sobre la pista y produce pequeños conos de arena que dificultan el tránsito (ver foto N°2). No obstante el uso continuo de tractores las interrupciones fastidiosas del tránsito no se pueden evitar del todo. Un trayecto similar se encuentra también al sur de Atico, en el Perú meridional.

A propósito, los Incas ya tenían su dolor de cabeza en sus famosos caminos debido a la arena migratoria. Así informa Cieza de León¹³ que en el norte del Perú los caminos no podrían perfeccionarse debido a la arena. Allí se pusieron de trecho en trecho postes y que cuidarse que aquellos postes tumbados por el viento se levantasen siempre de nuevo.

A pesar de que la migración de las dunas se puede observar en todas partes, no se conoce con qué velocidad se produce; por lo menos, no se ha publicado mucho al respecto. En cuanto se disponga de datos numéricos, estos deben tomarse con cuidado. Ante todo los resultados de mediciones a corto plazo, no se deben extrapolar así no

¹¹ *Itinerarios*, p. 117.

¹² *Perú*. II p.239.

¹³ *Crónica del Perú*, 1553

más para todo el año. La movilidad de la arena es distinta según las estaciones del año; no solo depende de la fuerza del viento sino también de la humedad. Ella es mayor en la estación calurosa del verano sur y es menor durante la época nebulosa de invierno. Las garúas que producen la vegetación de las lomas inmovilizan por completo la arena.

Semejantes diferencias en la movilidad de la arena se observan también en el transcurso del día. Cada automovilista que tiene que atravesar trechos de arena, teme a la arena muerta especialmente al medio día, cuando está seca, porque las ruedas se hunden fácilmente en ella. En la noche o en las primeras horas de la mañana cuando la arena es húmeda, hay menor temor de quedarse atascado. Antes de la construcción de la carretera Panamericana que en la actualidad está afirmada y asfaltada en toda su extensión, los conductores de camiones de carga de la costa peruana eran grandes conocedores de la arena.

Existiendo variaciones en la ocurrencia de las neblinas húmedas, la magnitud de la migración de las dunas no será igual en todos los años. Pero en primer lugar es importante disponer de algunos valores numéricos al respecto.

Los pocos datos que ha visto el suscrito, describen el movimiento de las dunas en forma sumaria, sin decir algo de como y en donde fueron medidas. Así W. S. Barclay¹⁴ indica para el desierto en el interior de Mollendo un valor de 100 yardas igual a 91.4 metros por año; M. Bingham¹⁵ valoriza el traslado de las dunas en 0.30 a 4.0 metros por mes. E. Schweigger¹⁶ menciona 31 metros por año.

Mediciones más exactas las realizaron F. S. Simons y G. E. Ericksen¹⁷ en la duna de Purpur cerca de Virú. Esta barcana gigantesca tiene una altura de 55 metros, la distancia entre los dos cuernos es de 750 a 850 metros. Su forma es asimétrica porque el cuerno occidental es más largo y más ancho, conteniendo mayor cantidad de arena y varias barcanas individuales pequeñas. El diámetro de los granos de arena varía entre 0.104 y 0.295 mm. Sobre la base de la fotografía aérea ya mencionada del año 1942, Simons y Ericksen han medido varios puntos y han podido determinar el movimiento de la duna hasta el año 1951. El declive de sotavento de la duna principal ha avanzado en el intervalo indicado solamente 0.45 metros por año. En cambio una duna pequeña del cuerno occidental que dista 1.4 Kms. de la falda de sotavento de la duna principal avanzó anualmente 9.0 metros. Otra duna pequeña situada a 0.5 Kms. de la misma falda de sotavento de la duna principal se ha desplazado más o menos 5 metros por año. El médano principal por lo tanto es bastante estacionario, mientras que las barcanas pequeñas en los cuernos se movilizan tanto más rápido cuanto más distan de la falda de sotavento de la duna principal. Los dos autores nombrados concluyen que la duna de Purpur disminuye

actualmente en volumen, en verdad tan lentamente que subsistirá algunos siglos. Explican ellos esto con que el viento no acarrea ya mas arena hacia la duna grande desde que el ancho valle del Virú se ha puesto bajo cultivo. Según su opinión el médano debe haberse constituido antes de aquel tiempo. Si fuera cierto, se podría fijar también su edad, pues debería haberse constituido antes de la cultura Gallinazo (300 - 700 DC.), es decir por lo menos 1,600 años o algo más. Simons y Ericksen tienen posiblemente razón con respecto a la gran edad de la duna de Purpur, pero talvez ella se remontaría hasta la época glacial pleistocena, cuando las cadenas marginales de los Andes hoy carentes de glaciares estuvieron cubiertas de grandes ventisqueros de tal manera que el río Virú conduciría también más agua que en la actualidad. Con todo no se puede considerar así no más al médano como una forma del pasado geológico. Aún cuando las barcanas pequeñas individuales se alejan de los cuernos de la duna principal, la cresta de ella tiene tantas barcanas pequeñas que se debe pensar en un aporte continuo de arena nueva. No se observan tampoco vestigios de erosión que indicarían que la duna principal se desgasta. Si esto realmente fuera el caso, se podría esperar que talvez los dos cuernos de arena tuviesen igual desarrollo, si el lado más cercano a la playa muestra mayor cantidad de arena, es seguramente un indicio de que aún sigue creciendo.

La separación de barcanas pequeñas de una duna principal ha sido observada también en el Namib sud africano por E. Kaiser¹⁸, quien la considera como un indicio de que la arena es todavía muy movable.

Cierto indicio sobre el traslado de las barcanas pequeñas de Purpur proporcionan también las huellas de los carros que se extienden por debajo de las dunas frescas de 4 m. de altura y 40 m. de ancho.

Al pie de Purpur yacen muchos tiestos. Talvez se encuentra debajo de ella una huaca.

Unos testimonios sobre la migración de las dunas encontró el suscrito en un viaje que hizo con su amigo, el profesor Dr. H. U. Doering a sus sitios de investigación arqueológica en Tecapa y Jatanca en el desierto de San Pedro cerca de Pacasmayo. Ahí, al sur de la localidad la llanura muestra colinas de arena no muy grandes y de forma semiglobular, que en su lado occidental están cubiertas de arbustos de zapote, mientras el lado de barlovento consiste de pura arena. Mas al este se hallan en la llanura numerosas dunas semi-lunares; las de mayor tamaño tienen una altura de 6 a 8 metros y las mas pequeñas solo de 0.5 a 2 metros. Los médanos guardan entre sí distancias grandes de manera que se puede encontrar un camino entre ellos, sin necesidad de cruzarlos. En la vecindad de Jatanca las dunas alcanzan una altura de 10 metros y un ancho de 100 metros.

En las fajas más anchas entre las dunas grandes

¹⁴ *Sand-dunes in the Peruvian Desert.-Geogr.Journ.p.53-56 Enero 1917*

¹⁵ *Le relief du Perou.-Rev. de Géogr. alpine. p. 179 - 706.- 1925*

¹⁶ *Litoral peruano.- p.25. -Lima, 1948*

¹⁷ *Some desert features of North West Central Perú -Bol. de la Soc.Geol del Perú. t.26, p.229, 246 1953.*

se encuentran muchas pequeñas especialmente bellas. La llanura misma está cubierta de arena gruesa de color pardo; debajo de esta hay arena fina que dificulta el andar. En algunas partes se encuentra suelo arcilloso endurecido. El limo es bien estratificado y en algunos sitios atravesado por grietas de desecamiento. Se trata de sedimentos de corrientes turbulentas o de llapanas. En la parte occidental de la gran llanura se extienden lechos de ripio y cascajo que proceden evidentemente del valle de Cuspinique.

Sendas y huellas de automóvil atraviesan el suelo desértico; entre ellos también el camino que Doering marcó en setiembre de 1953 por medio de pequeños montones de piedras blanqueadas con cal. En febrero de 1954 este camino se hallaba debajo de una duna de 4 metros de alto y 40 metros de ancho. También en otros lugares se hallaba cubierto por médanos. Se puede decir que los cuernos de las dunas se habían desplazado hasta 20 metros en ese intervalo de tiempo. En otro sitio una pequeña duna semilunar se había sobrepuesto sobre la huella. En términos generales se puede deducir de estas observaciones un avance anual de las dunas de más o menos 60 metros, si fuera permitido extrapolar de 4 meses a todo el año. En las ruinas de Jatanca Doering midió un avance de la duna de 22 metros durante un plazo de 6 meses.

PAISAJES NOTABLES DE DUNAS

No es posible ni tenemos la intención de referirnos a todas las áreas de dunas grandes a lo largo de la costa del Perú, lo que solo sería atractivo y rendiría resultados interesantes si se tuviera a la disposición aerofotografías peruanas. Con todo mencionamos algunos lugares.

En el Norte, sobre todo el desierto de Sechura ofrece un amplio campo para observaciones específicas, porque se presentan ahí los tipos más variados de dunas: conjuntos extendidos de médanos especialmente en el lado septentrional de los anchos valles, médanos bien formados de 1 a 6 metros de altura, algunas colinas de arena parcialmente cubiertas de vegetación y lomas alargadas de arena a sotavento de arbustos y otros obstáculos. Mirando de lejos, el espejismo levanta las dunas frecuentemente sobre el horizonte, apareciendo ellas como nubes cirro-cumulus que llaman la atención por su color amarillento. Broggi explica la abundancia de dunas en el desierto de Sechura con el hecho de que la corriente marina transporta en el transcurso de los tiempos la arena cada vez más hacia el norte es decir, hacia el extremo de la zona desértica a lo largo de la costa donde la arena se introduce finalmente al continente y se acumula en médanos cada vez más grandes. Pensando en períodos geológicos, esto es tal vez cierto. Pero por lo pronto, las dunas más grandes se hallan en el sur del país.

En este sitio debe mencionarse el cerro de duna más alto en el Perú, el Cerro Blanco, de 2,000 metros de altura, en las cercanías de Nazca, que constituye una señal

visible desde muy lejos y que se constata también perfectamente viéndolo del avión. El cerro consiste de rocas volcánicas y parcialmente cuarcíticas y en su parte superior ostenta una terraza que está sobrepuesta por un manto potente de arena. Encima de este, en su lado septentrional, se eleva una faja de dunas varias veces seccionada, con pendientes empinadas y una cresta angosta. Hacia el Este las crestas de las dunas individuales buzan en forma tan empinada que no es posible ascender por ese lado. Más fácil es el ascenso al punto más alto subiendo por lado Oeste. A primera vista parece que las masas arenosas del Cerro Blanco pertenecen al período geológico pasado. No existe ninguna duda, sin embargo, que la capa superficial de esta acumulación de arena se constituye aún en la actualidad por el viento. La arena es fresca, no intemperizada y en la cresta más alta no está cubierta de vegetación. En el lado Norte, frente a Nazca, se sobreponen a la cresta principal, médanos más pequeños que son evidentemente modernos. Alrededor del punto más alto, se encuentran restos de diversos objetos que proceden posiblemente del trabajo de un grupo topográfico militar que habría levantado allí una señal de triangulación, que tal vez marcó el punto más alto de entonces; hoy está sobrepasada por una duna fresca de 6 a 8 metros de altura, que oculta la vista hacia Nazca.

Un paisaje igualmente notable de médanos se extiende alrededor de la Laguna de Huacachina, cerca de Ica. Arnold Heim lo ha fotografiado desde el aire, observó que las crestas de este desierto de dunas se extienden en forma irregular, pero que por lo general hacen frente hacia el valle de Ica¹⁹. El viento predominante sopla allí evidentemente, más del noroeste. Una barcana gigantesca, que no se mueve del sitio, protege la pequeña laguna del balneario contra su relleno; en lo demás, la arena se encuentra todavía en un movimiento constante según se puede ver de las numerosas dunas individuales. Según Middendorf existía anteriormente separada de la laguna principal por una cuchilla, otra pequeña que ha desaparecido en la actualidad²⁰, tal vez está tapada por arena migratoria (ver foto I).

En la península Paracas, que tiene fama por sus fuertes vientos, faltan dunas semilunares bonitas. El suelo está cubierto de una arenilla fina de color rojiza que se sobrepone a una capa dura de sal.

Varias llanuras grandes donde se esperaría gran número de dunas, están libres de ellas; así por ejemplo, las grandes terrazas de ripio al norte de Tacna como también la extensa pampa de Huayurí al sur de Ica. No falta ahí arena que procede de los huacos o llapanas episódicas que bajan de los cerros. La carretera Panamericana se cubre en muchos sitios con arena que se extiende hasta el pie de los cerros vecinos constituyendo barras de arena de configuración lisa.

En algunos sitios se presentan también médanos en el interior del país; así cerca de Arequipa en la falda

¹⁹ *Wunderland Perú.- Fig. 14 y pag. 28*

²⁰ *Perú II, p. 164.*

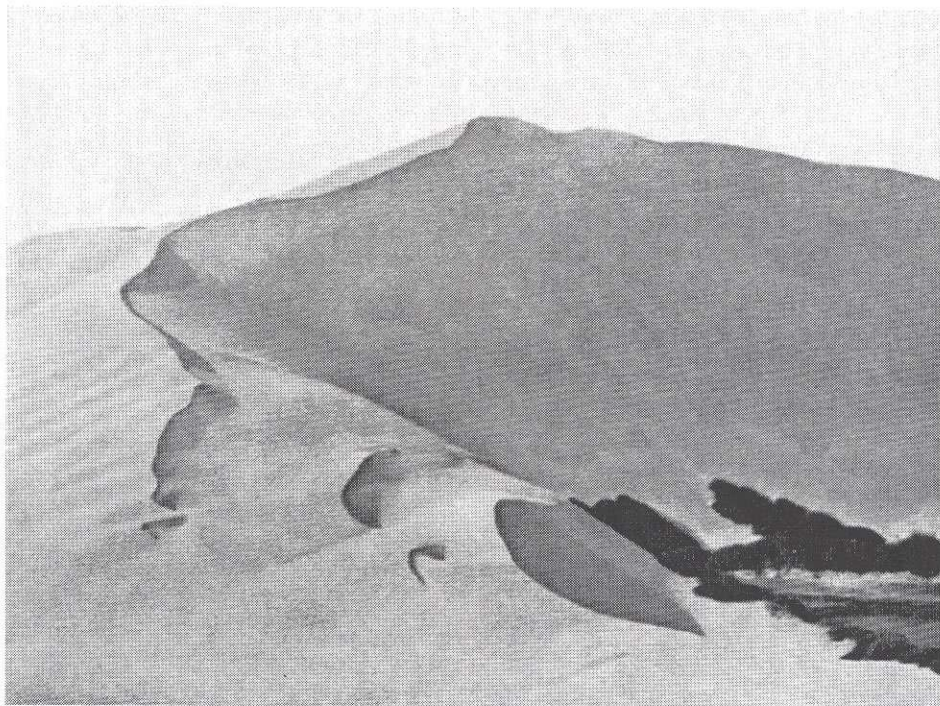


Foto 3. La gran duna en la parte alta al noroeste de la Laguna de Huacachina.

meridional del Misti (5,821 metros), a lo largo del antiguo camino incaico y más arriba aún, la toba oscura volcánica se encuentra acumulada en colinas grandes parecidas a dunas. Médanos típicos aunque de tamaño pequeño, se hallan al pié del Huascarán, la cumbre más alta del Perú en la Cordillera Blanca. En el valle Ulta el 20 de enero de 1938, una laguna glacial se desbordó e inundó el fondo del valle en Huishcashpampa. Las arenas finas depositadas en el fondo de esta laguna fueron más tarde arrastradas por los vientos que bajan de los cerros, y acumuladas en forma de dunas de varios metros de altura, un fenómeno que tiene parecido sólo en las cordilleras asiáticas y no en los Alpes.

DUNAS Y SOLEVANTAMIENTOS DE PLAYAS

Se comprende que los grandes campos de dunas se constituyen especialmente tierra adentro de las grandes bahías marinas poco profundas. Esta correlación no es, sin embargo, tan íntima que se pueda deducir del tamaño de las bahías y de la longitud de la playa la frecuencia de las dunas. Evidentemente intervienen también otros factores como por ejemplo la abundancia especial de arena en la costa alrededor de las desembocaduras de los ríos grandes. Así cree Broggi²¹, que las grandes masas de arena al sur de Pasamayo provienen de los ríos Rímac y Chillón; pero agrega con razón que aún no se conoce casi nada sobre el transporte de la arena en el fondo del mar.

Si ciertos sectores de la costa Peruana son especialmente ricos en arena y dunas, este fenómeno podría relacionarse tal vez con otro, al que nos referimos aún con

cierta reserva y más bien a manera de pregunta, es decir, al solevantamiento de la costa.

Sin referirnos a los tablazos cuyo solevantamiento se inició en el Terciario posterior y subsistiría durante todo el Cuaternario, existen en la costa peruana también sectores con solevantamientos recientes. En lo que se refiere a la bahía de San Juan cerca de Nazca J. A. Broggi y W. Rüegg²² lo han comprobado; igualmente la región al sur de Pisco se encuentra en pleno levantamiento según W. Rüegg. El suscrito ha observado un levantamiento en la costa cerca de La Hacienda Carmelo en la desembocadura del río Virú. En los alrededores de las Salinas al norte de la desembocadura del Santa y la Hacienda Santa Clara la carretera atraviesa varios pequeños cordones litorales.

Tal vez no es mera casualidad, si tierra adentro de estas costas ascendentes las dunas están especialmente bien desarrolladas. Sería ventajoso estudiar con más detención estas relaciones.

DUNAS Y CAMBIOS CLIMATOLÓGICOS

Otra cuestión importante es si de la presencia de la dunas se puede deducir algunas conclusiones con respecto a un cambio de clima. En el norte del Perú, existen evidentemente en varios sitios dos generaciones de médanos: una de color claro y poco cubierta de vegetación y otra de color oscuro densamente cubierta de algas y líquenes. Muchas faldas de arena están cubiertas también enteramente por tillandsias.

²¹ I. c. Pág. 13

²² W. Rüegg, *Geologie zwischen Cañete-San Juan*.-*Geol.Rundschau* pág.775-858; 1956. con una bibliografía amplia.

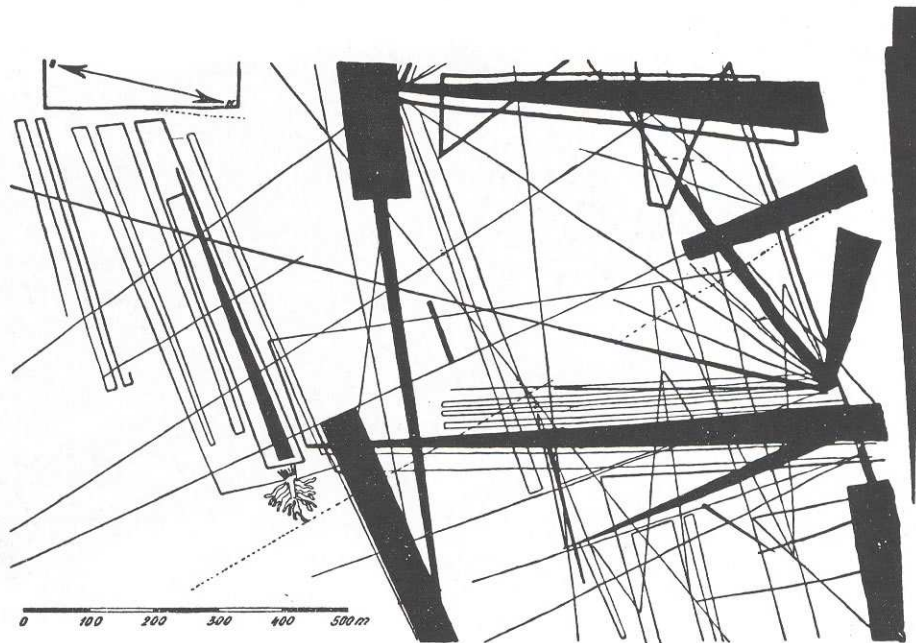


Abb. 2. Die „Sternstraßen“ in der Wüste nördl. von Nazca (nach M. REICHE, *Mystery on the Desert*, Lima 1949).

Fig. 2. La «Vía de estrellas» en el desierto al norte de Nazca (según M. Reiche, *Mystery on the Desert*, Lima, 1949).

Existen fundamentalmente dos opiniones con respecto al cambio de clima en la costa peruana. Varios autores creen en una desecación progresiva durante la época histórica moderna. E. Schweigger²³ considera el clima como más húmedo en la época anterior a la Conquista Española; las antiguas acequias no habrían sido destruidas por los españoles sino más bien porque ya no tenían suficiente agua. H.R. Oehley²⁴ deduce por los adobes de las construcciones antiguas una cobertura de vegetación mucho más extensa, y de las acequias antiguas una mayor abundancia de agua en el pasado. También O.A. Welter²⁵ cree que el clima del pasado ha sido mucho más húmedo. Menciona en ese sentido los fósiles (*Hydrochoerus capivana*) de Cuspinique cerca de Pacasmayo. La edad del período húmedo no se puede fijar exactamente según Welter.

Por otro lado se tiene como un hecho comprobado que la corriente de Humboldt se remonta más allá de comienzo del Cuaternario y que los Andes tuvieron entonces más o menos la misma altura de hoy. Entonces el clima de la costa peruana debería ser muy parecido al actual. La suposición de un mayor caudal de agua en el pasado no está en contradicción con esto, porque los ríos son de origen alóctono y su agua procede de la cordillera. Tampoco una vegetación más abundante en la costa durante el pasado no es un índice de un cambio de clima, ya que los

bosques han sido reducidos recién por la mano del hombre y desgraciadamente la destrucción de los antiguos bosques de huarango continúa hoy en día y muchas masas de arena, que estuvieron retenidas por ellos, se pondrán tal vez recién en movimiento.

Sacar conclusiones de la asimetría de muchas barcanas con respecto al cambio de la dirección predominante de los vientos como lo hacen Simons y Ericksen²⁶ no es aceptable; pues semejante desigualdad depende en primer lugar de la posición de la duna relativa a la fuente de arena.

En general el problema «Dunas y cambios de clima» queda aún sin solución; pero a este respecto sería ventajoso hacer una investigación detallada.

Se podría esperar según Bagnold²⁷ que las dunas de configuración geométrica regular y de avance lento darían tal vez con posterioridad algún indicio para el clima anterior del paisaje en que se encuentran.

PROBLEMAS DE LA INVESTIGACIONES DE LAS DUNAS

La investigación de las dunas en la costa peruana tiene un significado no sólo teórico sino también eminentemente práctico. Basta llamar la atención hacia los peligros para las nuevas carreteras debido a la arena

²³ *Litoral peruano* p. 110

²⁴ *Über die phylogenetische und biogeographische Bedeutung der Anden.* - *Forschungen und Fortschritte*, Marzo de 1948.

²⁵ *Sobre el levantamiento pliocénico cuaternario de los Andes peruanos.* - *Bol de la Soc. Geol. del Perú*. t.20p. 11, 1947.

²⁶ *L.c.* p. 244

²⁷ *The Movement of Desert Sand.* - *Geogr. Journ.* p.363. Abril 1935

migratoria y al hecho de que el ferrocarril de Ancón a Chancay se ha atorado efectivamente en la arena. Tanto más parece necesario aspirar a un mayor conocimiento de la distribución, formas y movimiento de las dunas. Aún más que los glaciares, ellas pertenecen a los fenómenos más inestables, de la superficie de la tierra; pero no se pueden investigar con métodos topográficos sencillos tan exactamente que un levantamiento permita una evaluación morfológica. Felizmente el estudio por medio de la fotografía aérea es relativamente fácil, y no costosa. Si se pudiera repetir tales aerofotografías a ciertos intervalos, se podría fijar los cambios producidos y se podría hacer también mediciones exactas.

De este modo se obtendría una base, no sólo para el conocimiento de las dunas en la costa peruana; sino también para su estudio en general.

El Perú con sus barcanas modélicas, sólo o en conjunto, constituye un campo ideal de estudio. También las condiciones generales son favorables debido a la aeronáutica peruana bien desarrollada. Se presenta aquí un problema científico bonito, ya que según E. Martonne²⁸ el problema de la arena movida constituye todavía la parte menos conocida de los desiertos. Semejantes estudios aerofotogramétricos, físicos y morfológicos darían posiblemente nuevos conocimientos para el estudio del clima y tiempo del Perú, así como para la arqueología é historia peruanas.

PERMANENCIA DEL SUELO DESERTICO

Se ha tratado hasta este punto de la arena en movimiento, pero, antes de terminar, debe llamarse la atención a la resistencia extraña de muchas superficies arenosas contra la acción del viento. Es un hecho bien conocido y confirmado en todos los desiertos que los rastros en el suelo se conservan durante muchos años. La opinión de que el viento o la migración de la arena de las dunas las hace desaparecer, no es cierto. Precisamente en el desierto del litoral peruano se observa que los médanos, como si fuesen fenómenos individuales, se deslizan sobre el suelo sin alterarlo. Huellas de caminos cubiertos por ellos, y sobre todo pedrones, reaparecen después de un tiempo en el dorso de la duna. Este problema en sí no queremos tratar aquí especialmente, pero llamaremos la atención sobre dos fenómenos antropogénicos, que se pueden considerar en esta relación como experimentos impensados .

En uno de los casos se trata de la figura extraña conocida con el nombre de «Tres Cruces» en el lado norte de la península de Paracas. La figura de aspecto de una cruz ramificada ó ciprés, ha sido esculpida con una profundidad de mas de un metro en el suelo algo endurecido de una falda empinada y lisa. Su altura es de más de 180 metros. Si tiene efectivamente 2,000 años como afirma Víctor

Von Hagen²⁹, se podría poner en duda, pero aún si tuviera tan sólo 500 años, sorprende que el viento tan inmediato a la costa no la haya rellenado desde hace tiempo (ver fig. N°4).

De otro tipo son los dibujos no menos misteriosos en el suelo del desierto al norte de Nazca. Principalmente se trata de líneas largas derechas y de fajas, quizá partes de un calendario astronómico gigantesco; además se encuentran figuras grandes de aves, peces, y arañas. Todo esto es muy extraño, puesto que los autores de estas figuras no han podido contemplar íntegramente su obra debido a su tamaño. Recién se puede hacerlo desde el avión.

Estos dibujos han sido confeccionados, removiendo los guijarros revestidos por el lacre del desierto y acumulándolos a los costados. Así se produjeron fajas claras al quedar al descubierto el suelo no intemperizado. María Reiche³⁰ que ha adquirido mucho mérito por la investigación de estos dibujos cree que fueron hechos en el período de 500 a 700 años A.D. (Fig. N° 2). Sea como sea, en el transcurso de algunos centenares de años los trazos de los dibujos no se han cubierto todavía de la costra oscura de meteorización similar a la que ponen en evidencia las áreas no alteradas en el desierto. S. H. Mortensen, S. Pasarge y otros suponen período muy largos para el desarrollo de la pátina del desierto, esta opinión se confirma de una manera espléndida por medio de esta «Vía de estrellas» y figuras de Nazca.

RESUMEN

Las dunas del litoral peruano se conocen todavía en forma incompleta. La mejor idea de ellas la proporcionan las fotografías aéreas publicada por G.R. Johnson y Arnold Heim. Siguiendo ciertos chiflones o vías de viento las dunas se concentran en fajas angostas y alargadas que comienzan en las bahías extendidas de poco fondo y terminan al pie de la cordillera. Con respecto a la velocidad de la migración de las dunas existen solo pocos valores no muy exactos que complementa el suscrito con otros observados por él mismo. Las mediciones más notables son las de F. S. Simons y G. E. Ericksen en la duna grande de Purpur en el valle Virú. Según el tamaño de las dunas y ciertas circunstancias los médanos se trasladan desde pocos metros hasta más de 60 m. por año. El conjunto de dunas más espectacular en el Perú lo constituye el Cerro Blanco de Nazca de 2,000 metros de altura, sobre cuyo núcleo rocoso yace un cerro de arena de un espesor de varios cientos de metros. En algunos sitios el desarrollo de dunas parece ser favorecida por un sollevamiento reciente de la costa. El suscrito propone fotografías aéreas en intervalos determinados, de las regiones más importantes de dunas para poder comparar las variaciones que se han producido entre foto y foto.

La figura extraña a manera de ciprés en la falda

²⁸ l.c. p. 123

²⁹ Heeresstrassen des Sonnengottes. pag. 233. - Viena, 1957

³⁰ Mystery on the Desert. - Lima 1949

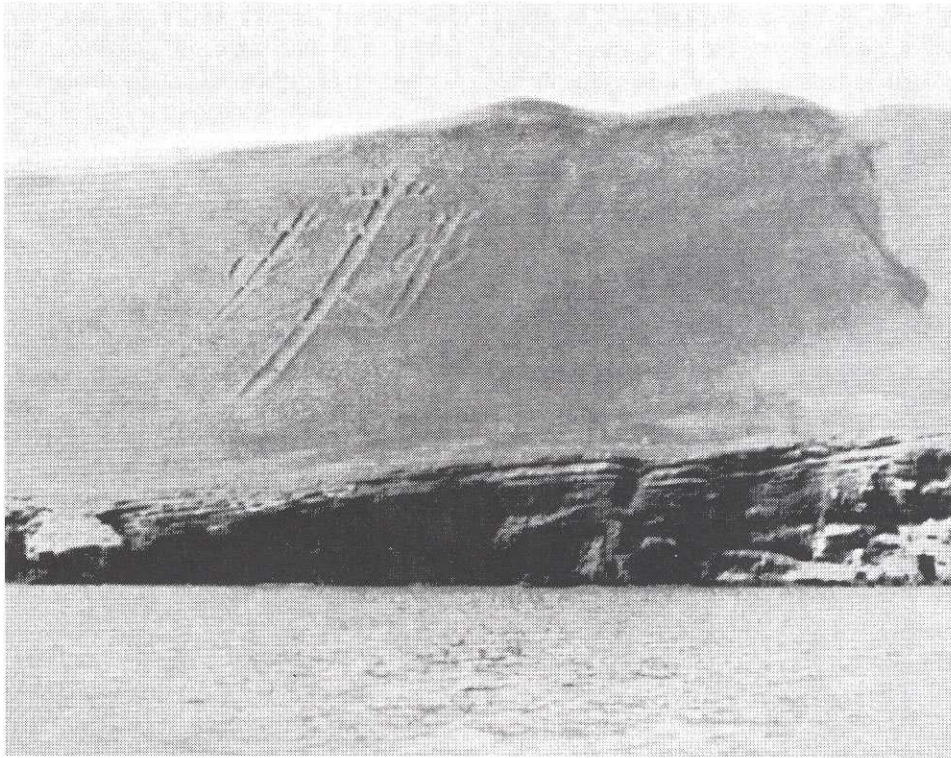


Foto 4. La señal indígena antigua «Tres Cruces» al noroeste de la península de Paracas.

arenosa del lado norte de la península de Paracas, y así como las rayas y figuras gigantes al norte de Nazca demuestran por un lado la gran permanencia del suelo del

desierto y por otro lado el largo tiempo que se requiere para el desarrollo de la pátina sobre las rocas que lo conforman.

NORMAS EDITORIALES DEL BOLETIN DE LA SOCIEDAD GEOLOGICA DEL PERU

El Boletín es el órgano de difusión científica de la Sociedad Geológica del Perú. En él se publican Artículos y Notas breves. El Comité Editorial solicitará especialmente Artículos de reseña sobre algún tema específico e Informes de reuniones. Toda contribución debe corresponder a un trabajo original de los autores y no haber sido publicada anteriormente.

PRESENTACION Y ACEPTACION DE MANUSCRITOS

Se presentará una copia del manuscrito completo ante el Editor Responsable, adjuntando dirección y teléfono del autor a ser contactado. Los trabajos serán enviados a arbitraje por parte de especialistas designados por el Comité Editorial. Las opiniones y sugerencias emitidas por estos últimos serán transmitidas a los autores junto con sus manuscritos, a fin de ser tomadas en cuenta. Luego de la recepción de los trabajos corregidos, el Comité Editorial decidirá sobre su publicación definitiva. En ese momento, se solicitará a los autores 1 diskette conteniendo el archivo informático del texto, una impresión simple del mismo y los originales de las ilustraciones. Los autores indicarán el nombre del archivo y el procesador empleado. Una vez aceptado, el trabajo no podrá ser retirado.

EXTENSION Y ORGANIZACIÓN

Los Artículos no deben exceder 35 páginas mecanografiadas a doble espacio incluyendo bibliografía, e ilustraciones. Como Nota breve se aceptarán hasta 8 páginas mecanografiadas a doble espacio, incluyendo máximo dos ilustraciones..

Todo manuscrito completo debe incluir:

1. **Encabezado.**- Título, nombres de los autores, direcciones institucionales de los autores. Además adjuntar título abreviado para las cornisas.
2. **Resúmenes.**- Se harán por lo menos uno en castellano y uno en inglés. Cada uno no excederá 200 palabras. Ellos deben ser concisos pero informativos y adelantar los resultados dados en el texto.
3. **Texto principal.**- Para su mejor comprensión, el texto debe estar dividido secciones encabezadas por subtítulos. Existen 3 niveles jerárquicos de subtítulos: el primero va en MAYUSCULAS, el segundo en Negritas y tercero en Cursivas, todos ellos pegados al margen izquierdo. Se recomienda seguir el esquema: Introducción, Desarrollo del tema, Discusión, Conclusiones y Agradecimientos.
4. **Referencias.**- Contiene la lista de todos los trabajos citados en el texto. Se hará en orden alfabético por apellidos de autores.
5. **Ilustraciones.**- Se presentarán copias de las ilustraciones reducidas al tamaño que deberán publicarse (ver más adelante). Indicar el número de cada una fuera de su marco. En hoja aparte, colocar los textos de cada pie de ilustración.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Todas las citas bibliográficas hechas en el texto deben aparecer en la lista de Referencias dada al final del mismo y viceversa. Las fichas tendrán los modelos siguientes:

Publicación periódica:

BROGGI J. (1957).- Las terracitas fitogénicas de las lomas de la costa del Perú. *Bol. Soc. Geol. Perú*, 32, 51-64.

Libro:

STEINMANN G. (1929).- *Geologie von Peru*. Carl Winter Univ., Heidelberg, 448p.

Publicación colectiva:

BARREIRO B. (1984).- Lead isotopes and Andean magma genesis. *In: Andean magmatism, chemical and isotopic constraints*; Harmon R.S. & Barreiro B (eds.), Shiva Publ., Nantwich, 21-30.

Tesis:

MEGARD F. (1973).- *Etude géologique d'une transversale des Andes au niveau du Pérou central*. These doct., Univ. Sc. Tech. Languedoc, Montpellier, 263p.

Actas de Congresos, coloquios, cursos, symposia:

RUEGG W. (1968).- Mil kilómetros de geología en la faja Pacífica del Perú meridional. II Jorn. Geol. Argentinas, I, 355-374, Edit. Asoc. Argen. Geol.

ILUSTRACIONES

Las ilustraciones comprenden mapas, gráficos, tablas y fotos. Sus proporciones serán tales que, luego de una reducción máxima al 85% entren en página completa (17 x 27 cm.), fracción de página (17 cm. de ancho) o fracción de una columna (8 cm. de ancho). Los números de figuras NO deben aparecer dentro de las mismas. Tener en cuenta el espacio que ocuparán los pies de figuras.

Las figuras se presentarán impresas en laser blanco/negro o color, sobre papel blanco. En ningún caso los caracteres incluidos en las figuras deberán resultar menores de 2 mm. luego de reducción. Los archivos digitales para las figuras deberán ser grabados con las extensiones CDR., JPG o TIFF.

Las fotos con buen contraste irán montadas en una página blanca. Indicar sus números en fotocopias.

Las tablas no se re-procesarán, por lo cual, deben presentarse impresas en excelente calidad, listas para su reproducción. Sólo se aceptará una figura, foto o lámina en colores por trabajo. Cualquier adicional deberá ser coordinado previamente con el Editor.

Los archivos de imágenes digitales (figuras, gráficos, fotos, etc.) se enviarán vía FTP (File Transfer Protocol) para facilitar su recepción, ya que por su tamaño demoran en ser recibidos por e-mail.

La configuración de la dirección FTP es la siguiente:

Profile Name: sipan.inictel.gob.pe

Host Name: sipan.inictel.gob.pe

User Id: geonoticias

Password: iaxis

Crear un directorio con su nombre, usando Mkdir , y grabar allí sus archivos.

SEPARATAS

Los autores recibirán en total 20 separatas de su artículo.

EL COMITÉ EDITORIAL.

XI Congreso Peruano de Geología

Setiembre 17 - 20, 2002



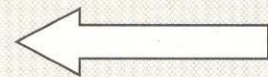
Invitación a Presentación de Trabajos Tecnicos

La Comisión del XI Congreso Peruano de Geología invita a los señores profesionales a la presentación de trabajos tecnicos en el próximo Congreso Peruano de Geología a realizarse en la ciudad de Lima, Setiembre 17 - 20, 2002.

Concurso Poster

Se convoca a todos los miembros de la Sociedad Geológica y amigos a participar en el concurso por el poster que identificará al evento.

Los diseños deben presentarse en formato A2 antes del 31 de Agosto, 2001.



Informes:

Sociedad Geológica del Perú

Arnaldo Marquez 2277 - Jesús María

Tel: 463 3947 - 461 6897. Fax: 461 5272

email: sgp@inictel.gob.pe , geonoticias@inictel.gob.pe