



# **INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU**



## **MICROSISMICIDAD EN EL AREA DE INFLUENCIA DE LA MINA UCHUCCHACUA MINAS BUENAVENTURA S.A.A.**

**Por :**

**Hernando Tavera**

**Minas Buenaventura - IGP  
Lima - Perú  
Diciembre, 2003**

# INDICE

## RESUMEN

### 1.-INTRODUCCION

### 2.- GEODINAMICA GENERAL

2. 1.- Principales Elementos Tectónicos

2.2.- La Cordillera Andina

### 3.- CARACTERISTICAS DE LA SISMICIDAD

3.1.- Sismicidad Histórica

3.2.- Sismicidad Instrumental

3.3.- Distribución de los Sismos en Profundidad

3.4.- Deformación Continental

### 4.- SISMOTECTONICA DEL AREA DE ESTUDIO

4.1.- Principales Sistemas de Fallas

4.2.- Sismicidad Local

### 5.- LA RED SISMICA LOCAL DE LA U. P. UCHUCCHACUA

5.1.- Características de las Estaciones Sísmicas

### 6.- LOS SISMOGRAMAS

6.1.- Registro de Sismos Regionales

6.2.- Registro de Microsismos

6.3.- Registro de Explosiones

6.4.- Registro de Ruido

6.5.- Discriminación entre Sismos y Explosiones

## **7.- CALCULO DE LOS PARAMETROS HIPOCENTRALES**

- 7.1.- Localización de los Sismos
- 7.2.- Modelo de Velocidad y Relación Vp/Vs
- 7.3.- Tamaño de los sismos
- 7.4.- Orientación de la Fuente Sísmica

## **8.- ANALISIS Y EVALUACION DE LOS EVENTOS REGISTRADOS POR LA RED SISMICA LOCAL**

- 8.1.- Explosiones
- 8.2.- Microsismos
- 8.3.- Mecanismos Focales y Distribución de Esfuerzos
- 8.4.- Sismicidad Inducida por explosiones

## **9.- RESULTADOS**

## **10.- CONCLUSIONES**

## **11.- RECOMENDACIONES**

## **BIBLIOGRAFIA**

**ANEXO 1:** Parámetros hipocentrales de sismos locales

**ANEXO 2:** Parámetros hipocentrales de algunas explosiones

**ANEXO 3:** Glosario de términos utilizados en este informe

## 1.- INTRODUCCION

La Unidad de Producción Uchucchacua – Mina Uchucchacua (UPU-MU), de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A., se encuentra ubicada en el distrito y provincia de Oyon, departamento de Lima. La UPU-MU es la primera mina subterránea productora de mineral de plata a nivel de Sudamérica y la cuarta a nivel mundial. Desde el punto de vista fisiográfico, la UPU-MU se encuentra en la vertiente occidental de los Andes Centrales de Perú y forma parte de un terreno fuertemente accidentado propio de zonas andinas. La topografía del área muestra evidencias del desarrollo en el pasado de un importante proceso de deformación y cuya expresión en superficie es la presencia de un gran sobrescurriamiento con eje de compresión orientado en dirección EO; además, de la presencia de un gran número de fallas de longitudes del orden de algunos metros hasta aproximadamente 6 km.

A fin de evaluar y cuantificar la posible actividad microsísmica producida por estas fallas o por las labores propias de la mina, Minas Buenaventura S.A.A. y el Instituto Geofísico del Perú acuerdan en el mes de Junio de 2005 realizar el monitoreo de la actividad microsísmica que se pueda producir en el área de cobertura de la UPU-MU. De acuerdo al convenio, este monitoreo se realizó utilizando una red local compuesta por 4 estaciones sísmicas de banda ancha y un acelerómetro, todos instalados alrededor del área de la UPU-MU (actualmente en explotación) y que considera a las fallas geológicas mas importantes ubicadas en dicha área.

En este informe se presentan los resultados obtenidos del análisis de la información microsísmica registrada por la red local durante un periodo de 30 días a partir del 17 de Junio, fecha en que se instala las 2 primeras estaciones

sísmicas. El análisis considera diferenciar los registros de explosiones y de los correspondientes a sismos, análisis de fases sísmicas, así como el procesamiento sísmico o cálculo de los parámetros hipocentrales, cálculo del tamaño de los microsismos, determinación de los esfuerzos e interpretación sismotectónica. Finalmente, se presentan los principales resultados y conclusiones a los cuales se llega al final de este estudio. Complementa el trabajo el listado de las referencias bibliográficas consultadas y un detallado glosario de términos sismológicos y geológicos utilizados para el desarrollo del estudio.



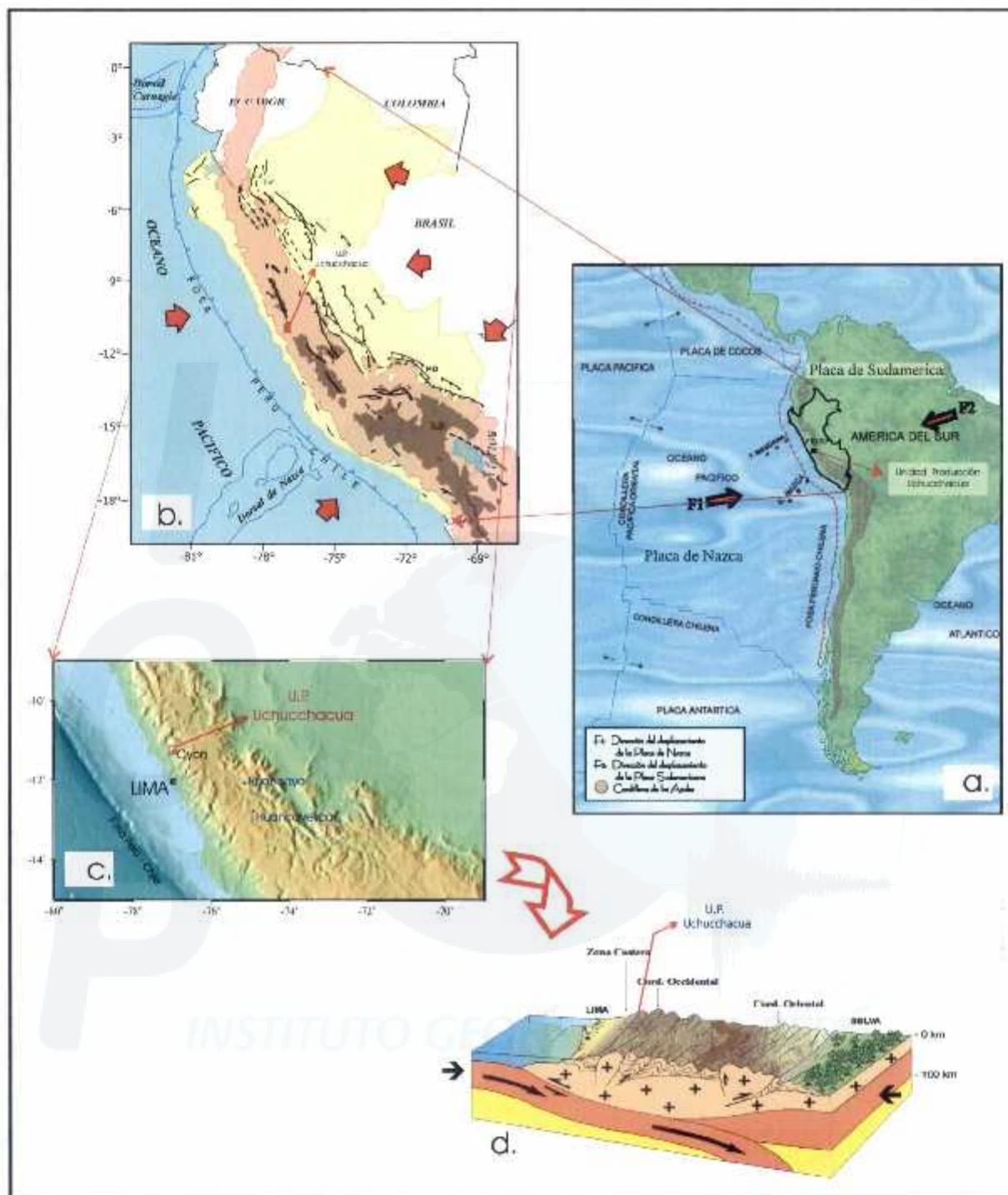
## 2.- GEODINAMICA GENERAL

Todos los procesos geodinámicos que se desarrollan en el territorio peruano y áreas adyacentes, tienen su origen en el proceso de convergencia entre las placas de Nazca y la Sudamericana (Figura 1), la primera se desplaza en dirección Este con una velocidad relativa de 7 a 10 cm/año (Norabuena et al, 2002; DeMets et al, 1990). La interacción o colisión de ambas placas, es la causa del arrugamiento y levantamiento del margen continental durante un proceso orogénico complejo que duró aproximadamente 10 millones de años y que culminó con la formación de la Cordillera Andina (Figura 1b). Este proceso fue acompañado por una sucesión de periodos de subsidencias y levantamientos relacionados con regímenes tectónicos de extensión y compresión que produjeron el acortamiento y engrosamiento de la corteza con la consecuente aparición de importantes sistemas de fallas, sobrecurrimientos, fracturas y pliegues de diferentes dimensiones y longitudes de onda (Figura 1c, d). Evidentemente, todo este proceso se desarrolló con la ocurrencia continua de sismos de diferente magnitud a diversos niveles de profundidad (Megard, 1978; Dalmayrac et al, 1981 y Sebrier et al, 1985; Tavera y Buforn, 2002).

En la margen occidental de Perú y en el interior de la corteza oceánica (Figura 1), de todos los procesos geodinámicos que se han desarrollado en los últimos 10 millones de años, restan hoy en día algunos elementos tectónicos cuyas características más sobresalientes se resumen a continuación.

### 2.1.- Principales Elementos Tectónicos

Los elementos tectónicos presentes a ambos extremos del margen continental son diversos y deben su origen a los continuos movimientos de



**Figura 1.** a) Geometría de la convergencia entre las placas de Nazca y Sudamericana. Las flechas indican la dirección de movimiento de ambas placas. b) Principales elementos tectónicos presentes en el Perú: Cordillera Andina, fosa peruano-chilena, fallas geológicas. Las flechas indican la dirección de los esfuerzos regionales. c) Topografía que muestra la Cordillera Andina y la ubicación de la localidad de Oyon y de la U. P. Uchucchacua. d) Esquema 3D que muestra la convergencia de placas en la región central de Perú y la deformación de la cordillera.

compresión y extensión que se producen en los bordes de convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana (Figuras 1.a,b).

**La Dorsal de Nazca** es una cordillera oceánica ubicada en el extremo NO de la región Sur de Perú (frente al departamento de Ica) con una orientación NE-SO y perpendicular a la línea de la fosa peruana-chilena. La dorsal se localiza a 40 km de distancia de la línea de costa y se asume que alturas menores de la misma, ya se introdujeron bajo la placa continental (Sebrier et al, 1985; Tavera y Buforn, 1998). Litológicamente, la dorsal estaría compuesta por rocas volcánicas con edades del orden de 5 a 10 millones de años aproximadamente (Marocco, 1980).

**La Fractura de Mendaña** se localiza en el extremo NO de la región Central de Perú, frente al departamento de Ancash (entre 10° y 12° Sur) y es definida como una discontinuidad de la corteza oceánica. En la actualidad no se dispone de mayor información sobre las características físicas de esta fractura.

**La Fosa Peruano-Chilena** es un rasgo típico de las zonas de convergencia de placas en las cuales se produce el proceso denominado subducción y mediante el cual, la placa de Nazca se introduce por debajo de la Sudamericana. La fosa indica el inicio del contacto entre estas dos placas y abarca en su totalidad la costa de Perú y Chile. La litología de la fosa indica que esta formada por sedimentos de diferente potencia depositados sobre rocas pre-existentes. La fosa presenta una profundidad de 6000 metros frente a la costa central y de 5000 metros en la costa Norte y Sur. Asimismo, la fosa se encuentra ubicada a 60 y 150 km de distancia desde la línea de costa de la región Norte y Centro, y a 120 km en la región Sur.

**La Cordillera Andina** se extiende a lo largo del continente Sudamericano, desde Venezuela hasta el Sur de Chile con orientaciones que varían desde NE-SO en Colombia y Ecuador, NO-SE en Perú y N-S en Chile (Figuras 1.a,b). La topografía actual de la Cordillera, es el resultado de varios procesos orogénicos ocurridos durante épocas geológicas pasadas, con su consecuente engrosamiento y

acortamiento para dar origen a la formación de pliegues, fallas, depresiones, elongaciones de los grandes intrusivos y alineamientos de conos volcánicos. De Norte a Sur, la Cordillera de los Andes presenta dos notables inflexiones sobre las latitudes de 5° y 14°S, llegando a cambiar su orientación en dirección NE (Deflexión de Huancabamba) y Este-Oeste (Deflexión de Abancay) respectivamente. Transversalmente, la Cordillera Andina presenta diversas unidades morfoestructurales (Cordillera Costera, Zona de Costa, Cordillera Occidental, Altiplano, Cordillera Oriental y Zona Subandina) y anchos que oscilan entre 250 km en la región centro hasta 450 km en la región Sur (James, 1971). Desde el punto de vista litológico, la Cordillera Andina esta conformada por rocas igneas plutónicas que afloraron a la superficie por los diversos procesos tectónicos que se desarrollaron durante la orogenia andina.

**La Cadena Volcánica** se ubica en la región Sur de Perú por debajo de la deflexión de Abancay y es continua hasta los 25°S al Norte de Chile. Esta cadena se distribuye sobre la Cordillera Occidental siguiendo un aparente alineamiento en dirección NO-SE. Las características geométricas de cada uno de los volcanes sugieren que su actividad tectónica es contemporánea a la orogenia extensional que experimentó la Cordillera Andina cerca del Cuaternario Medio y Reciente (Sebrier et al, 1985). Los principales volcanes presentes en la región Sur de Perú son: el Coropuna (6425 m.s.n.m), Sabancaya (5795 m.s.n.m), Misti (5825 m.s.n.m), Ubinas (5672 m.s.n.m), Chachani (3745 m.s.n.m), Huaynaputina (4800 m.s.n.m), Tutupaca (5806 m.s.n.m) y Yucamane (5508 m.s.n.m). Es importante remarcar que en las regiones Norte y Centro de Perú, la actividad volcánica habria disminuido o desaparecido hace 8 millones de años.

**Los Sistemas de Fallas** presentes en el Perú, son el resultado del proceso de deformación de la corteza continental como consecuencia del levantamiento de la Cordillera Andina (Figura 1b,c,d). De Norte a Sur, estos sistemas de fallas están presentes en mayor número sobre la zona Subandina al pie de los principales pliegues formados por la subsidencia del escudo brasilero bajo la Cordillera Oriental y en general, deben su origen a la presencia de fuerzas compresionales

(sistemas de fallas de Moyobamba, Satipo, Madre de Dios, etc.). Sobre la Alta Cordillera y en el Altiplano, el número de fallas es menor y estos deben su origen a procesos extensivos (sistema de fallas de la Cordillera Blanca, Tambomachay y Jabonillos) y compresivos (sistema de fallas del Huaytapallana, Pampas y Arhuayaco). Estas fallas son las de mayor longitud, pero existen otras pequeñas que solo comprometen áreas reducidas y de producir sismos, estos serán pequeños en tamaño, tal es el caso de las fallas de Uchucchacua, Socorro, Cachipampa, entre otros, presentes en la provincia de Oyon (Lima).

## 2.2.- La Cordillera Andina

La Cordillera Andina es considerada como un ejemplo clásico de cordillera que debe su origen al proceso de subducción de una placa oceánica (Placa de Nazca) bajo una continental (Placa Sudamericana). En el caso del borde Oeste de Sudamérica, este proceso ha permitido que la Cordillera Andina soporte, desde su formación, una continua deformación y cuya expresión en superficie puede ser evaluada en función de su altitud y del gran número de fallas presentes en el territorio peruano. Toda esta deformación se desarrolla con la ocurrencia de sismos de tipo interplaca e intraplaca a diversos niveles de profundidad y con diferentes magnitudes.

Actualmente, la Cordillera de los Andes presenta una serie de segmentos estructurales notablemente marcados, los mismos que se caracterizan por presentar diferentes estilos tectónicos y actividad volcánica coincidiendo con los patrones regionales de sismicidad (Tavera y Buforn, 1998). Según Megard (1978), la Cordillera Andina puede ser dividida transversalmente en 5 zonas morfológicamente diferentes (Figura 1d) y cuyas características han sido descritas en detalle por Suárez et al, (1983) y Tavera y Buforn (1998): *la zona costanera, la Cordillera Occidental, la zona del altiplano, la Cordillera Oriental y la Zona Subandina*. Todas estas unidades representan la expresión más confiable de todo el proceso de deformación que ha soportado el borde occidental de Sudamérica como producto de la convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana.

En resumen, la colisión de las placas de Nazca y Sudamericana, ha producido en el continente el desarrollo de fases compresivas y extensivas que guardan estrecha relación con la evolución de los Andes. Características de este proceso pueden ser evidenciados en la presencia de un gran número de estructuras de diversa magnitud que han afectado a las rocas sedimentarias de la zona de Uchucchacua.



### 3.- CARACTERISTICAS DE LA SISMICIDAD

El Perú se caracteriza por ser una de las regiones sísmicamente más activas en el mundo y su actividad más importante esta asociada al proceso de subducción que genera de manera frecuente sismos de diversas magnitudes a diferentes niveles de profundidad. Un segundo tipo de sismicidad es la producida por las deformaciones corticales, presentes de Norte a Sur, sobre la Cordillera Andina y a lo largo de la zona denominada Subandina, en donde se producen sismos menores en magnitud y frecuencia. La ocurrencia continua de sismos, como en cualquier otra región sísmicamente activa, juega un rol importante en los diversos procesos sismotectónicos que se producen con el tiempo como la deformación de rocas, formación de fallas, fenómenos precursores de grandes sismos y la ruptura sísmica que en general, tiene duraciones del orden de 60 segundos para un sismo de magnitud  $M_s$  igual a 7.0 y menor a un segundos para sismos con  $M_L < 2.0$ .

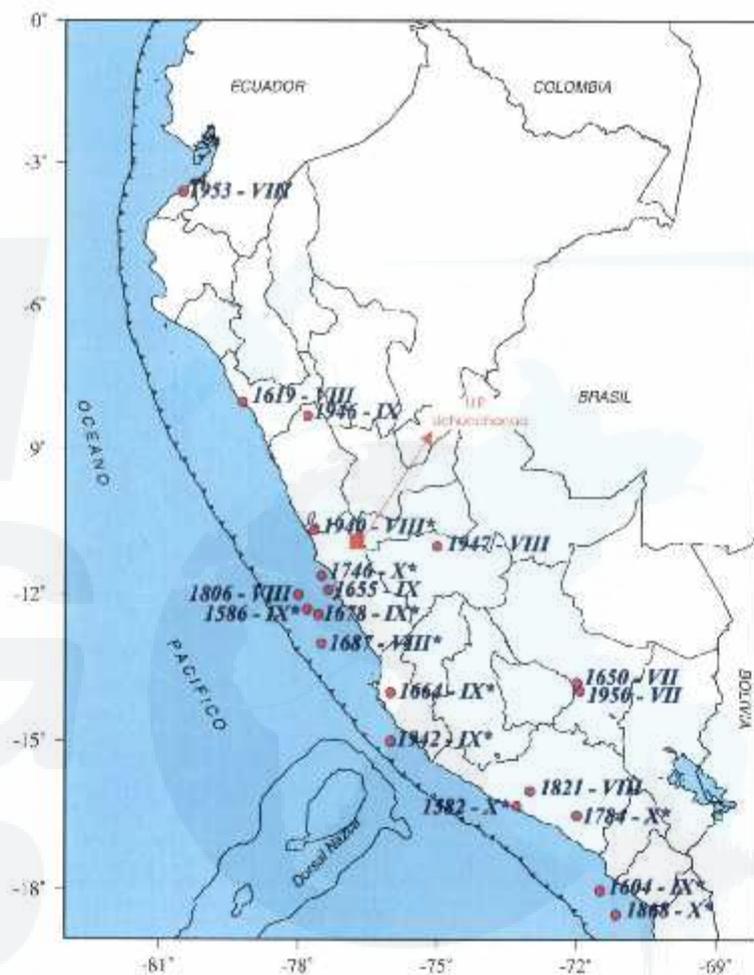
En general, la información sobre la actividad sísmica en Perú puede ser dividida en sismicidad histórica e instrumental. La primera considera a los sismos ocurridos entre 1500 y 1959; mientras que, la segunda a los sismos ocurridos a partir de 1960, fecha en que se inicia la instalación de la Red Sísmica Mundial (World Wide Seismological Standart Network) y la puesta en operatividad de redes sísmicas regionales en cada país. En el caso del Perú, desde al año 1983 el Instituto Geofísico del Perú mantiene operativa una red sísmica que fue implementando hasta contar actualmente con 31 estaciones distribuidas en todo el país.

### 3.1. - Sismicidad Histórica

La información, sobre la sismicidad histórica de Perú data del tiempo de la conquista y colonización del país, y ha sido recolectada y publicada por Silgado (1978) y Dorbath et al, (1990). Es importante considerar que la calidad de estos datos depende de la distribución y densidad de la población en las regiones afectadas en el pasado por sismos; por lo tanto, es posible que hayan ocurrido sismos importantes en áreas no pobladas o próximas a localidades con las cuales era difícil establecer comunicación. Esto explicaría la ausencia de información sobre sismos que pudieran haber ocurrido en la Alta Cordillera y zona Subandina.

En la Figura 2(a) se muestra la localización epicentral de los sismos históricos ocurridos entre 1513 y 1959 ( $I_{max} > VII-VIII$  en la escala Mercalli Modificada), los mismos que en su mayoría se distribuyen principalmente entre la línea de fosa y la costa, siendo mayor el número de sismos en la región Centro y Sur de Perú. Según la figura, en el interior del continente el número de sismos disminuye considerablemente. Es necesario indicar que, al margen de los posibles errores en la localización epicentral, la profundidad focal de los sismos históricos no ha sido determinada con precisión; sin embargo, debido a los daños que ellos produjeron es posible considerar que los sismos ocurrieron a profundidades superficiales ( $h < 60$  km).

Entre los sismos históricos más importantes ocurridos en la región central del Perú, se tiene a los sismos de los años 1586 (IX MM), primer gran sismo para el cual se tiene documentación histórica; 1687 (VIII MM) y 1746 (X MM) que destruyeron casi completamente a la ciudad de Lima. Este último generó un tsunami con olas de 15-20 metros de altura que inundo totalmente al puerto del Callao. En la información disponible no se indica sobre los daños producidos por estos sismos en áreas andinas y menos para ciudades pequeñas; sin embargo, en función a los sismos ocurridos en el periodo instrumental se puede asumir que produjeron en el interior del continente intensidades del orden de VI a VII (escala



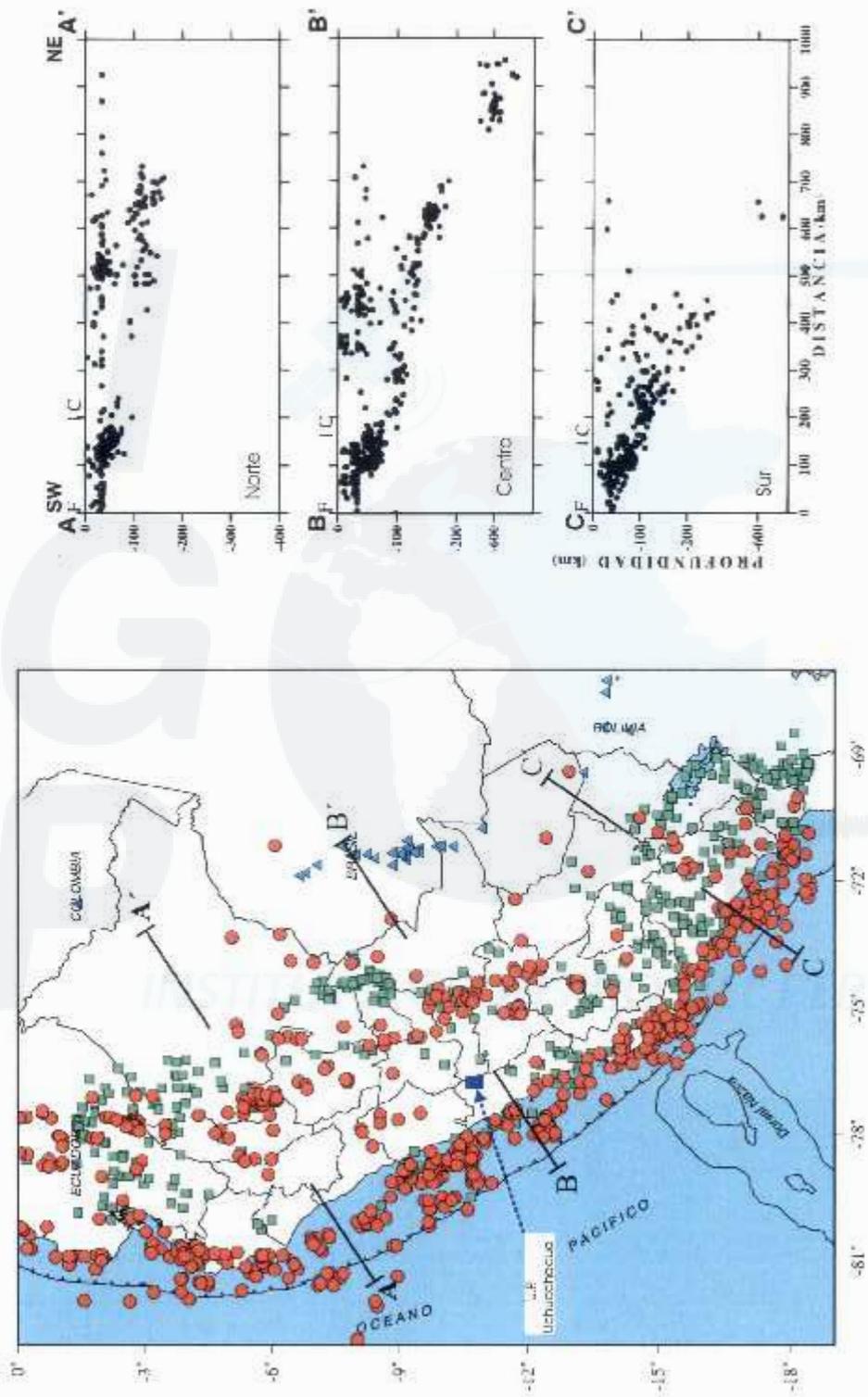
**Figura 2.- a.)** Distribución de la actividad sísmica histórica de Perú (1513-1959) según Silgado (1978). A partir del año 1910 se considera sismos con intensidades mayores a VII en MM. El asterisco (\*) indica que el sismo fue acompañado de Tsunami. El recuadro indica la ubicación de la U. P. Uchucchacua.

Mercalli Modificada). Para este periodo de tiempo (1500-1959), no existe información sobre los sismos ocurridos en la región Andina y menos para áreas relativamente pequeñas como la que considera a la provincia de Oyon, ubicada en el extremo nor-este del departamento de Lima.

### **3.2.- Sismicidad Instrumental**

El análisis y evaluación de la distribución espacial de los sismos ocurridos en Perú durante el periodo instrumental, ha sido realizado por diversos autores utilizando información telesísmica (Stauder, 1975; Barazangi y Isacks, 1976; Cahill y Isacks, 1992; Tavera y Buforn, 1998 y Bernal, 2002) y regional (Hasegawa y Sacks, 1981; Grange, 1984; Schneider y Sacks, 1987; Rodríguez y Tavera, 1991), y los resultados obtenidos han permitido conocer las características de la geometría de las principales fuentes sismogénicas asociadas a la deformación cortical y al proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana.

En la Figura 2(b) se observa que los sismos con foco superficial ( $h < 60\text{km}$ ), representados con círculos, se producen en la zona oceánica y se distribuyen, de Norte a Sur, en dirección paralela a la línea de costa. En esta zona la ocurrencia de sismos es continua y con relativa frecuencia se producen sismos de magnitud elevada como el ocurrido en 1970 ( $m_b = 6.4$ ) considerado como uno de los más catastróficos en el mundo por haber producido la muerte de 67000 personas, 250000 desaparecidos y 180000 heridos. En general, esta sismicidad está directamente asociada a la fricción de placas dentro del proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana. Un segundo grupo de sismicidad con foco superficial se localiza en el interior del continente y debe su origen al proceso de subsidencia del escudo brasilero bajo la Cordillera Andina y a la deformación cortical que se produce en la Alta Cordillera, siendo estos sismos menor en magnitud y frecuencia. En términos generales, la distribución de la sismicidad sobre el territorio peruano muestra las zonas de mayor deformación superficial.



**Figura 2. b.)** Mapa de sismicidad instrumental para el Perú, período 1960-1995,  $m_b > 5$  (IGP). Los círculos representan a los sismos con foco superficial, los cuadrados con foco intermedio y los triángulos con foco profundo. Las líneas AA', BB' y CC' indican la orientación de las secciones sísmicas presentadas en la Figura adjunta. El recuadro indica la ubicación de la U. P. Uchucchacua.   
**.c.)** Secciones sísmicas perpendiculares a la fosa Perú-Chile correspondientes a las regiones Norte, Centro y Sur.

Según la Figura 2(b), los sismos con foco intermedio se distribuyen en superficie de manera irregular (símbolos cuadrados); sin embargo, es posible distinguir tres grupos. El primero considera a los sismos que se distribuye paralelos a la línea de costa por debajo de los 9° Sur y el segundo grupo, en la región Norte y Centro con sismos que se distribuyen a lo largo de Cordillera Oriental y la Zona Subandina siguiendo un alineamiento N-S. El tercer grupo y el más importante, se distribuye sobre toda la región Sur presentando un mayor número de sismos con respecto a las regiones anteriores. Finalmente, los sismos con foco profundo se localizan en la región Central cerca del borde Perú - Brasil y en la región Sur en el borde Perú - Bolivia (triángulos). Esta actividad sísmica es mayor en la primera región (6°-11° Sur) y sigue un aparente alineamiento N-S; mientras que, en la segunda es menos numerosa y más dispersa.

Según la Figura 2(b), en la región de Oyon o en sus alrededores no se han producido sismos de magnitud elevada; sin embargo, es posible que los sismos que ocurran en dicha zona sean de magnitudes pequeñas o imperceptibles para las personas.

### **3.3.- Distribución de los Sismos en Profundidad**

Para analizar la distribución de los sismos en función de la profundidad de sus focos, es necesario construir una serie de tres secciones verticales que representen a la región Norte, Centro y Sur de Perú, tal como se muestra en la Figura 2(c). Este análisis permite tener una mejor idea de la forma y la profundidad máxima a las cual se produce la deformación de la placa de Nazca y Sudamérica.

En la región Norte (sección A-A'), la profundidad de los sismos aumenta de Oeste a Este con focos ubicados a menos de 50 km en la zona oceánica y de 150 km por debajo del continente. Entre 200 y 450 km de distancia horizontal desde el punto A, se observa menor ocurrencia de sismos ya que casi todos se encuentran a niveles más superficiales. A partir de 450 km de distancia, el número y la

profundidad de los sismos aumentan hasta una distancia horizontal de 700 km desde la fosa. Estas profundidades indicarían el límite de contacto y la posible forma de la placa de Nazca bajo la Sudamericana. Los sismos con foco superficial se concentran mayormente a una distancia de 500 km desde la fosa y todos presentan profundidades menores a 60 km.

Para la región Central (sección B-B'), la distribución de los focos sísmicos sigue el mismo patrón descrito anteriormente. En ambas secciones verticales y hasta una profundidad de 100 a 150 km, los focos se distribuyen según una línea con pendiente de 20° para luego distribuirse de manera casi horizontal hasta una distancia de 700 km desde la fosa. Entre 200 y 500 km de profundidad, la ausencia de sismos es notable; sin embargo, estos vuelven a aparecer a la profundidad de 600 km, sugiriendo la continuidad de la placa oceánica en el proceso de subducción a mayores niveles de profundidad. Los sismos con foco superficial presentan profundidades menores a 60 km y podrían estar asociados a las fallas de Huaytapallana y Satipo-Amauta.

En la región Sur (sección C-C'), los sismos se distribuyen en profundidad con características diferentes a las otras regiones. La profundidad de los focos sísmicos aumenta linealmente de Oeste a Este con una pendiente de 25° a 30° hasta 350 km de profundidad aproximadamente, siendo continua hasta una distancia de 400 km a partir de la fosa; mientras que, a distancias mayores solo se observa la presencia de sismos con foco superficial ( $h \geq 60$  km) o profundos ( $h > 500$  km).

De acuerdo al análisis realizado, se concluye que la sismicidad presente en el Perú puede ser dividida en dos grupos: sismicidad debida al proceso de subducción y a la deformación superficial presente en el continente. El primer grupo reúne a los sismos que se originan en la superficie de fricción de placas y a los debidos a la deformación interna de la placa de Nazca por debajo del continente. El segundo grupo considera a los sismos que ocurren cerca de la superficie en el interior del continente, con origen en la deformación cortical y la

posterior formación de diversas fallas geológicas. Según la Figura 2(b, c) existen áreas en donde no se han producido sismos con magnitudes moderadas a grandes, tal es el caso de la provincia de Oyon en donde no habrían ocurrido sismos a pesar que existe un gran número de fallas de menor longitud; sin embargo, se considera que estas fallas deben estar liberando energía equivalente a magnitudes pequeñas no registradas por redes sísmicas regionales.

### **3.4.- Deformación Continental**

La ocurrencia de sismos de diversa magnitud en el interior del continente, pone de manifiesto el importante nivel de deformación superficial que en él se produce (Figura 1b). En general, esta sismicidad se concentra sobre las trazas de fallas que frecuentemente liberan mayor cantidad de energía y que en su momento produjeron sismos de magnitud elevada. Esta sismicidad, debido a que se produce próxima a la superficie, genera un alto grado de destrucción en las ciudades y localidades circundantes. En general, son importantes los sismos que se produjeron en 1946 debido a la falla de Quiches (Ancash), el de 1969 a la falla de Huaytapallana (Huancayo) y el de 1986 a la falla de Tambomachay (Cusco), todos sobre la Cordillera Andina. En la zona Subandina, son importantes los sismos de 1947 debido a la falla de Satipo (Junín) y los de 1990 y 1991 que reactivaron el sistema de fallas de Moyobamba y Rioja (San Martín). Para la zona de Oyon (Lima) no existe información sobre la ocurrencia de sismos de magnitud elevada asociados a la posible reactivación de fallas.

La información sísmica disponible permite considerar que los periodos de recurrencia de los sismos de magnitud elevada en el interior del continente, aparentemente son muy grandes, debido a que para los últimos 500 años no se cuenta con información confiable que confirme la ocurrencia de sismos en las zonas continentales reconocidas hoy en día, como fuentes sismogénicas importantes. Esto sugiere que la deformación continental es lenta y poco uniforme. Los pocos sismos para los cuales se cuenta con información han permitido observar en superficie rasgos tectónicos que indican el tipo de

deformación producida (fallas geológicas). En general, las zonas de mayor deformación superficial han sido identificadas y descritas por diversos autores desde el punto de vista sismológico (Stauder, 1975; Suarez et al, 1983; Deverchere et al, 1989; Lindo, 1993; Tavera, 2000) y tectónico (Sebrier et al, 1985; Bonnot, 1988). Recientemente, Tavera y Buforn (1998) han estudiado la distribución de los esfuerzos que causan la deformación en el interior del continente a partir de la elaboración de mecanismos focales para sismos con magnitudes  $m_b$  mayores a 5.8. Los resultados indican que la deformación es mayor en la zona Subandina de la región norte en comparación con otras regiones de Perú. Tal como se observa en la Figura 1(b), la orientación de los esfuerzos causantes de la deformación superficial es perpendicular a la dirección que sigue la Cordillera Andina.

Estudios de tectónica y microtectónica realizados por Sebrier et al (1985), han permitido identificar, con la ayuda de fotos de satélite, la existencia de trazas de fallas que aparentemente no se han reactivado durante el Cuaternario, en razón de que no produjeron sismos de magnitud elevada. Sin embargo, muchas de estas fallas producen importante actividad sísmica de magnitud pequeña que solo es registrada por redes sísmicas locales. Las trazas de falla que han sido monitoreadas localmente son pocas; sin embargo, la experiencia ha mostrado que cualquier falla necesariamente tiene que producir sismos de diversa magnitud en respuesta a la continua deformación regional a la que se encuentra sometida el territorio peruano. Tal es el caso de las fallas de los Altos del Mantaro (Dorbath et al, 1991), Cordillera Blanca (Deverchere et al, 1989), fallas de la zona de Marcapomacocha en el departamento de Junín (Tavera y Bernal, 2001) y recientemente las fallas de Jabonillos y Arhuayaco (Huancavelica). La presencia de las fallas de Uchucchacua, Socorro, Cachipampa, Sandra, Marion y Puntachacra en la zona de Oyon, ha permitido al IGP en convenio con Minas Buenaventura S. A. A. instalar una red sísmica local para el monitoreo de la microsismicidad que ellas podrían producir.

## 4.- SISMOTECTONICA DEL AREA DE ESTUDIO

El área de estudio; es decir, en donde se ubica la Unidad de Producción Uchucchacua (UPU) de las Minas Buenaventura S. A. A., se encuentra ubicada en la provincia de Oyon, departamento de Lima. Desde el punto de vista fisiográfico, la UPU se encuentra en la vertiente occidental de los Andes con altitudes que varían entre 4,300 y 4,600 msnm. Esta área es parte de la Cordillera Occidental y de un territorio fuertemente accidentado, propio de zonas andinas (Figura 3). La localidad más cercana e importante al UPU es Oyon, capital de la misma provincia. El mayor rasgo fisiográfico en el área es la presencia del anticlinal de Cachipampa, el mismo que alberga en su interior el desarrollo de toda la actividad minera propia de la UPU.

### 4.1.- Principales Sistemas de Fallas

En el área de estudio se reconoce la existencia de varias fallas de tipo transcurrentes que actúan produciendo procesos extensionales con diferentes rumbos, estando las de mayor tamaño orientadas en dirección NE-SO y NO-SE (Figura 3). Asimismo, existen otras fallas de menor tamaño que prácticamente cortan a las anteriores. Las fallas más importantes atraviesan toda el área de estudio y son conocidas como fallas Uchucchacua, Cachipampa, Puntacocha, Socorro, Plomopampa, Sandra, Marion y Rosa. La presencia de estas fallas, es la evidencia más importante de que toda esta región ha soportado en el pasado una importante deformación superficial.

**Falla de Uchucchacua.** Esta falla tiene una orientación NE-SO con una longitud del orden de 4.5 km y se encuentra ubicada en el extremo NO del anticlinal de Cachipampa. En su parte media, la falla se intercepta con las fallas Cachipampa y



Socorro. Según mapas tectónicos del área y cortes transversales sobre el anticlinal realizados por profesionales de la UPU, la falla sería de tipo transcurrente con el bloque NO descendido con relación al bloque SE (Regalado, 2005).

**Falla Socorro.** Presenta una orientación NE-SO y su extremo sur toma contacto con la falla Uchucchacua; mientras que, su extremo norte corta al anticlinal Cachipampa. La falla tiene una longitud de 3.8 km y también sería del tipo transcurrente con el bloque NO descendido con relación al bloque SE (Regalado, 2005).

**Falla Cachipampa.** La traza visible de la falla (aproximadamente 2.4 km) se encuentra entre las fallas Uchucchacua y Socorro con una orientación NE-SO paralela a la segunda. La falla Cachipampa llega a cortar al anticlinal del mismo nombre en su extremo norte y de acuerdo a su traza en superficie, pone en evidencia la presencia de desplazamientos horizontales en dirección NE.

**Falla Puntachacra.** La falla tiene una orientación N-S y aparece en la intercepción de las fallas Uchucchacua y Cachipampa alcanzando en dirección norte una longitud de 2 km. La geometría de la falla no es conocida pero se asume que también sea del tipo transcurrente.

**Falla Plomopampa.** Esta falla se encuentra próximo al campamento Plomopampa y esta formada por 2 ramales de 1 km cada una con orientación NE-SO. No existe mayor información sobre su geometría.

**Fallas Sandra, Rosa, Marion.** Estas fallas siguen una orientación E-O y presentan longitudes de 1000 a 1200 metros, todas se ubican por debajo de la falla Socorro. No existe información suficiente como para conocer su geometría.

Todas las fallas presentes en el área de estudio se encuentran bordeadas en su extremo occidental por los sobreescurrecimientos de Cutacocha y

Colquicocha, además del anticlinal de Cachipampa en su extremo oriental. En general, la presencia de todos estos elementos tectónicos sugieren que en el pasado el área en la cual se encuentra la UP Uchucchacua ha soportado importantes procesos de deformación local llegando a dar origen a estructuras geológicas complejas con la presencia de mineralizaciones de diferente grado y tipo.

En este contexto, el área de estudio se ubica en la vertiente occidental de los Andes y de acuerdo a su geología, la zona de Uchucchacua esta asociada a la presencia de importantes cuerpos intrusivos como los de Raura, Uchucchacua, Chunga y Morococha. La zona es reconocida como un depósito hidrotermal epigenético del tipo relleno de fracturas, las cuales fueron canales de circulación de soluciones mineralizantes que en su etapa final dieron origen a vetas de plata. Según Regalado (2005), en la columna estratigráfica elaborado para la UPU se observa que existe predominio de rocas sedimentarias del Cretáceo y sobre ellas se encuentran rocas volcánicas terciarias e instruyendo a las anteriores se observa la presencia de rocas intrusivas. En la parte superior de la columna estratigráfica se tiene depósitos aluviales y morrénicos. En general, la formación Jumasha es la de mayor importancia en toda la región central del Perú, en razón que contiene una potente formación de calizas grises a claras en la superficie intemperizada y gris oscura en fractura fresca. Esta unidad calcárea se constituye como la de mayor tamaño en toda la región central del Perú (Regalado, 2005).

#### **4.2.- Sismicidad Local**

Tal como se discutió anteriormente, el Perú es considerado como uno de los países de mayor potencial sísmico en el mundo debido a que de manera frecuente es afectado por la ocurrencia de sismos de diversas magnitudes que muchas veces han producido muerte y destrucción en varias localidades ubicadas en la costa y en el interior del continente. La sismicidad que afecta al área de estudio; es decir, a la zona de Oyón es la correspondiente a la primera fuente sismogénica. En la Figura 2(b), se presenta los sismos con focos superficiales

( $h < 60\text{km}$ ) y magnitudes mayores a 4.0 ocurridos en el Perú durante el periodo comprendido entre 2000 y 2005, y en ella se observa que en el interior del continente los sismos se distribuyen en mayor número cerca de la línea de costa y en menor número sobre algunos lineamientos presentes cerca de la misma. En el interior del continente, el mayor número de sismos están cerca de los sistemas de fallas de Huaytapallana y Altos del Mantaro, siendo casi todos de magnitudes moderadas; es decir, del orden de 4.0ML. La experiencia ha mostrado que en áreas relativamente pequeñas en las cuales existen fallas de corta longitud, la ocurrencia de sismos de magnitud menor a 4.0ML es importante, de ahí la necesidad de realizar estudios de microsismicidad considerando redes sísmicas locales. Estudios de este tipo, han permitido a Grange (1984) estudiar los fallamientos de la región Sur de Perú, a Dorbath et al, (1986, 1991) y Suárez et al, (1990) las fallas de Huaytapallana y Satipo, Deverchere et al, (1989) las fallas de la Cordillera Blanca, y Tavera y Bernal (2001), las fallas de la zona de Marcapomacocha. Todos estos estudios han ayudado a conocer mejor la sismotectónica de cada área.

En el caso de la provincia de Oyon y de las fallas de Uchucchacua, Cachipampa, Socorro, Plomopampa y otras, no existe información de algún estudio de sismicidad local realizado para conocer su patrón de deformación. A fin de evaluar el nivel de sismicidad de estas fallas, el Instituto Geofísico del Perú y Minas Buenaventura S.A.A. instalaron una red sísmica local alrededor de las mismas con el objetivo de monitorear durante un periodo de 30 días su actividad microsísmica.

## 5.- LA RED SISMICA LOCAL DE LA U.P. UCHUCCHACUA

Para la puesta en operatividad de las estaciones sísmicas que integran una red sísmica local, es necesario considerar los siguientes puntos:

- Tipo de red sísmica a instalarse
- Identificación del área de estudio
- Transmisión de la data
- Características geológicas del área de estudio
- Acceso al área de estudio
- Seguridad en el área de estudio
- Selección de los puntos para las estaciones sísmicas
- Visita de campo para identificación de puntos
- Configuración de la Red Sísmica Local

De acuerdo a los objetivos del estudio sísmico y de las discusiones realizadas con el personal profesional de la UP Uchucchacua, se decidió por la instalación de una red sísmica local con registro in situ, esto en consideración del corto tiempo de registro que se realizaría con la red; por lo tanto, no fue necesario considerar sistemas de transmisión para la data. La información sobre el área de estudio, sea geológica y/o tectónica fue proporcionada por el personal profesional de la UP Uchucchacua facilitando enormemente la identificación de posibles puntos en los cuales se instalaría las estaciones sísmicas. Propuestos los puntos, se procedió a evaluar el acceso a dichos puntos, así como la seguridad para la correcta operatividad de los equipos sísmicos. Posteriormente, durante un periodo de siete días se procedió al acondicionamiento de los puntos escogidos para la puesta en funcionamiento de las estaciones sísmicas y que consideró la construcción de casetas y superficies correctamente acondicionadas para la

instalación de los sensores.

La instalación de las estaciones sísmicas en la UPU se inicia a mediados del mes de Junio-05 y los días 17, 18 y 19 se pone en operación 4 estaciones sísmicas con registro en velocidad codificadas como STA1, STA2, STA3 y STA4; además, se procedió a instalar un acelerómetro que fue codificado como ACC1 (Figura 3). Las estaciones STA1 y ACC1 fueron ubicadas cerca del punto de intercepción entre las fallas Socorro y Uchucchacua cerca de uno de los túneles de acceso a la mina. Las estaciones STA2 y STA3 se encontraron a 2 km y 0.7 km en dirección sur y norte respectivamente desde la ubicación de STA1. La estación STA4 fue instalada en dirección NE a una distancia de 4 km con respecto a la estación STA1. En conjunto las estaciones formaban un arreglo triangular con el cual se realizó el monitoreo sísmico de la UP Uchucchacua. En la Tabla 1 se presenta las coordenadas de las estaciones y en las Figuras 4, 5, 6 y 7, algunas fotos en las que se puede ver la infraestructura de cada estación sísmica.

**Tabla 1**

*Coordenadas de las estaciones que integran la Red Sísmica Temporal de la U. P. Uchucchacua*

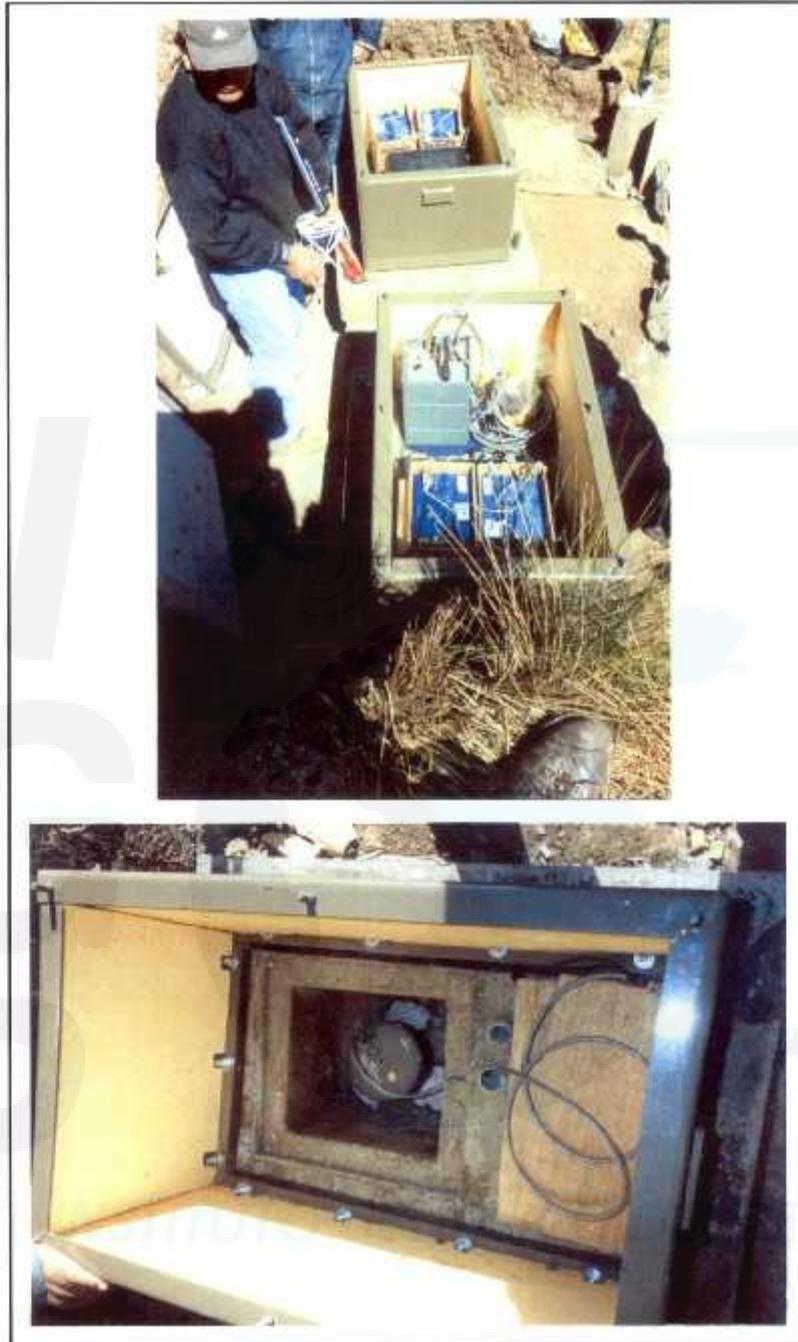
Estación	Cod.	Lat °S	Lon °W	Elev Msnm	Tipo de Registro
Estación 1	STA1	10.619	76.683	4603	Velocidad
Estación 2	STA2	10.640	76.680	4398	Velocidad
Estación 3	STA3	10.611	76.685	4589	Velocidad
Estación 4	STA4	10.590	76.644	4523	Velocidad
Aceler-1	ACC1	10.619	76.683	4603	Aceleración

### **5.1.- Características de las Estaciones Sísmicas**

Todas las estaciones que conformaron la red sísmica local de la UPU estaban integradas por un sensor Gurald 40T de banda ancha de 3 componentes y un registrador de 24 bits del tipo Reftek. La señal fue registrada in situ en



**Figura 4.** Imágenes que muestran la ubicación y las características de los equipos sísmicos instalados en la estación STA1: Sismógrafo y acelerómetro. La foto superior muestra el lugar en donde fueron ubicadas las estaciones, la foto del centro la construcción de las casetas sísmicas y la foto de abajo, las mismas estaciones en operatividad.



**Figura 4.** Continuación...../. La foto superior muestra el sistema de almacenamiento de datos y eléctrico de las estaciones de banda ancha y acelerómetro. En la foto inferior, el sensor de aceleración de 3 componentes.

formato continuo a 200 muestras por segundo lo cual permitía tener gran precisión en el trazo de la señal dentro de una banda de frecuencias de 0.008 a 50 Hz. En general, cada estación sísmica estaba integrada por el siguiente instrumental:

a). **Estaciones Sísmicas en Velocidad**

Sensor triaxial de banda ancha, 3 componentes, marca GURALP y modelo CMG 40T con ancho de banda entre 33mHz a 50 Hz.

Digitalizador de alta resolución marca Reftek, modelo DAS 72A-07 de 24 bits y rango dinámico de 130 dB.

b). **Estación Sísmica de Aceleración**

Sensor: Acelerómetro triaxial de 3 componentes, marca GURALP y modelo CMG 5T con ancho de banda de DC A 50 Hz y rango dinámico de 127 dB.

Digitalizador: Digitalizador de tipo comparaciones sucesivas con resolución de 16 bits y rango dinámico de 96 dB.

A fin de evitar daños de terceros y a solicitud del IGP, la UPU considero mantener vigilancia continua en cada una de las estaciones sísmicas, lo cual favoreció enormemente la operatividad de los equipos.

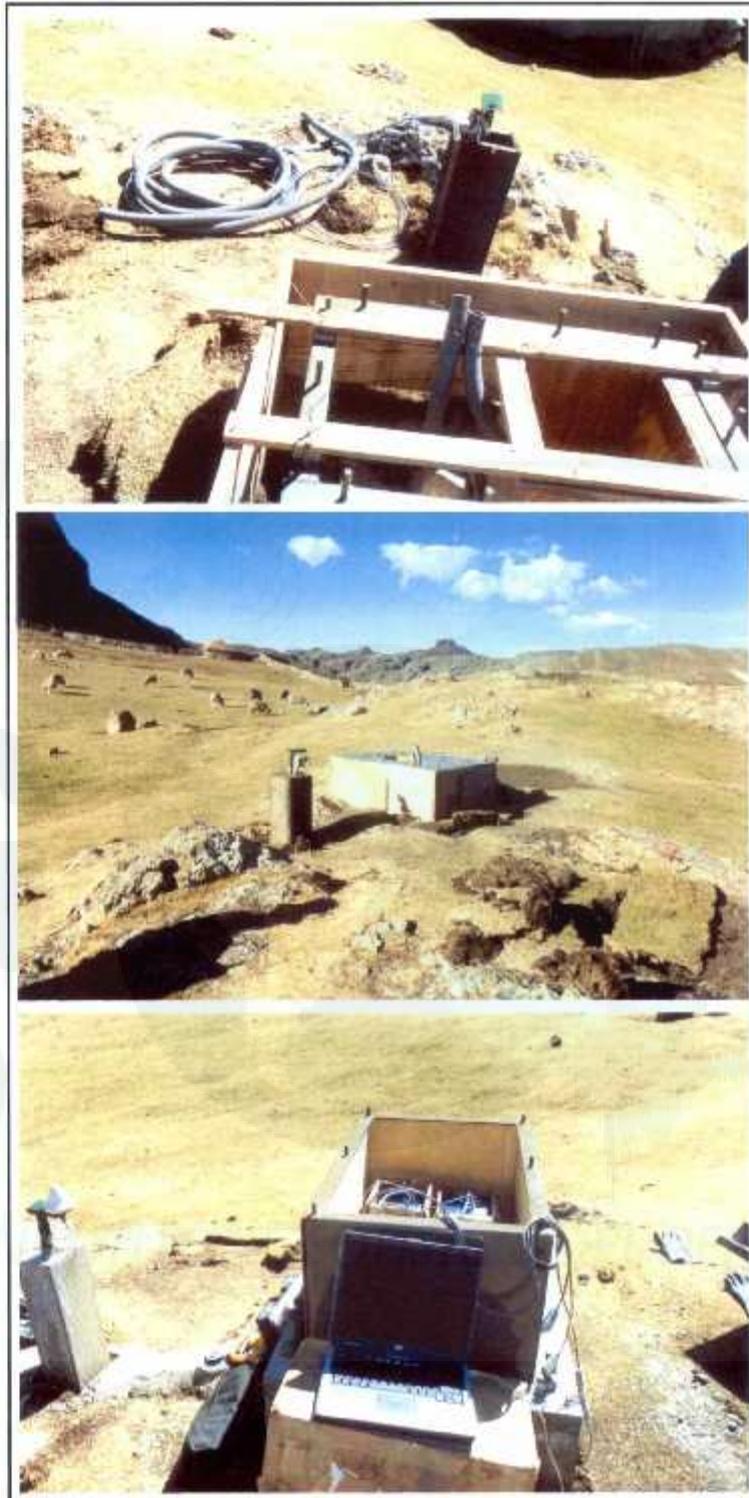
Las tareas de mantenimiento y recojo de la información sísmica de cada estación se realizaron de manera semanal. En general, en cada visita se procedía al copiado de la información sísmica registrada para su traslado a Lima, así como realizar el respectivo mantenimiento preventivo; es decir, evaluar la respuesta del sensor, analizar el nivel de ruido y la respectiva recarga de las baterías utilizadas para la alimentación del sistema.



**Figura 5.** Fotos de la estación sísmica STA2. En la parte superior se observa el sensor de banda ancha instalado en roca, en el centro el tipo de caseta construido para albergar a la estación sísmica y abajo, la estación sísmica en operación.



**Figura 6.** Fotos de la estación sísmica STA3. En la parte superior se observa los trabajos de logística seguidos para la construcción de las casetas, en el centro la disposición del sensor y sistema de registro, y en la parte inferior la estación sísmica en operación.



**Figura 7.** Fotos de las estación sísmica STA4. Se muestra el acondicionamiento de la superficie sobre la cual se debe instalar el sensor y la caseta sísmica. En la foto inferior la estación sísmica en operación y el sistema de acceso a la data registrada.

## 6.- LOS SISMOGRAMAS

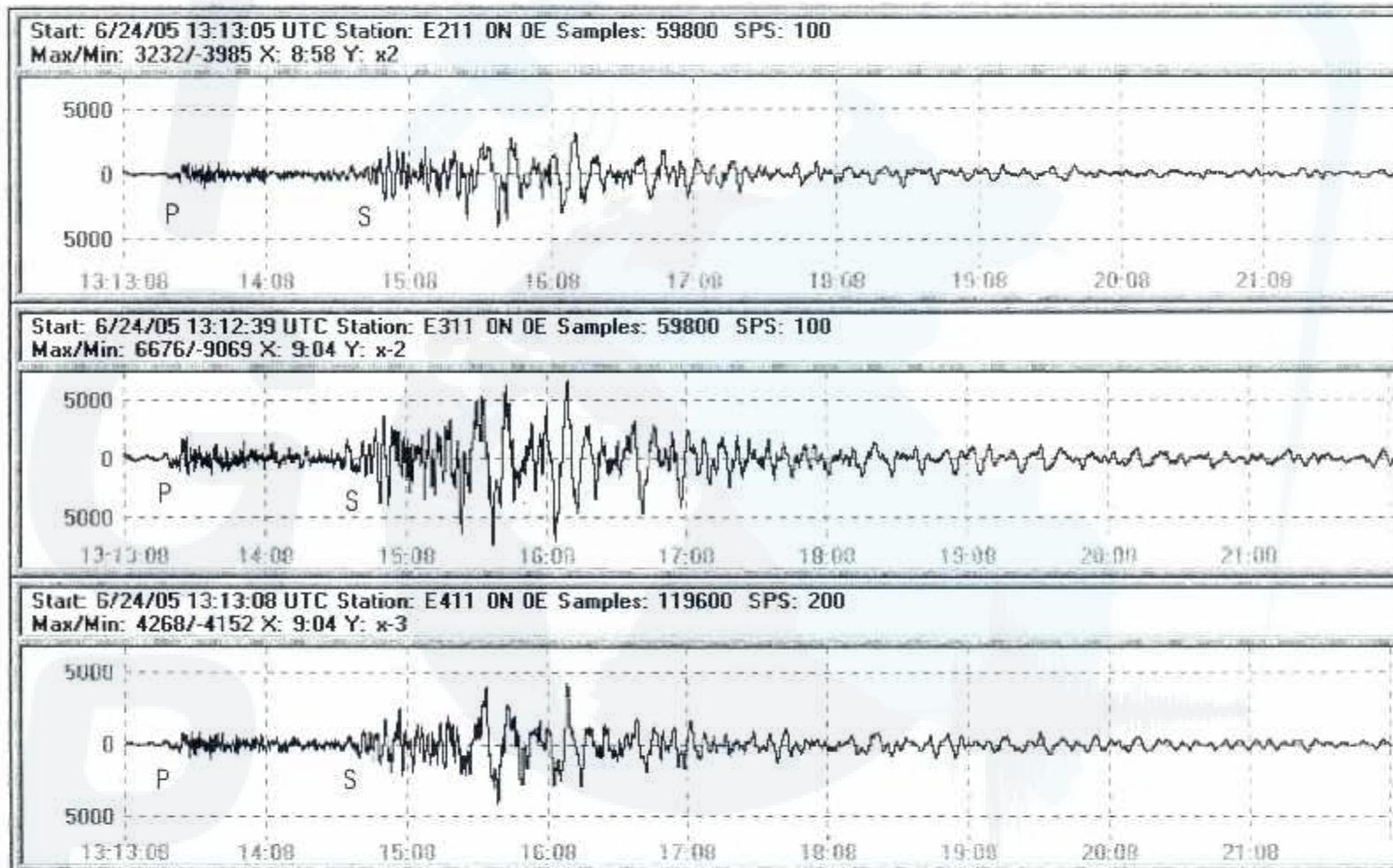
Un sismograma representa el registro continuo del movimiento del suelo en formato binario acompañado del control de tiempo que era realizado con un GPS. Durante todo el periodo de operatividad de la red sísmica de la UPU se ha registrado una gran variedad de señales debido a la alta sensibilidad del sistema de detección. Entre las señales más comunes se puede mencionar a las correspondientes a sismos regionales, locales, microsismos, explosiones y ruido natural.

### 6.1.- Registro de Sismos Regionales

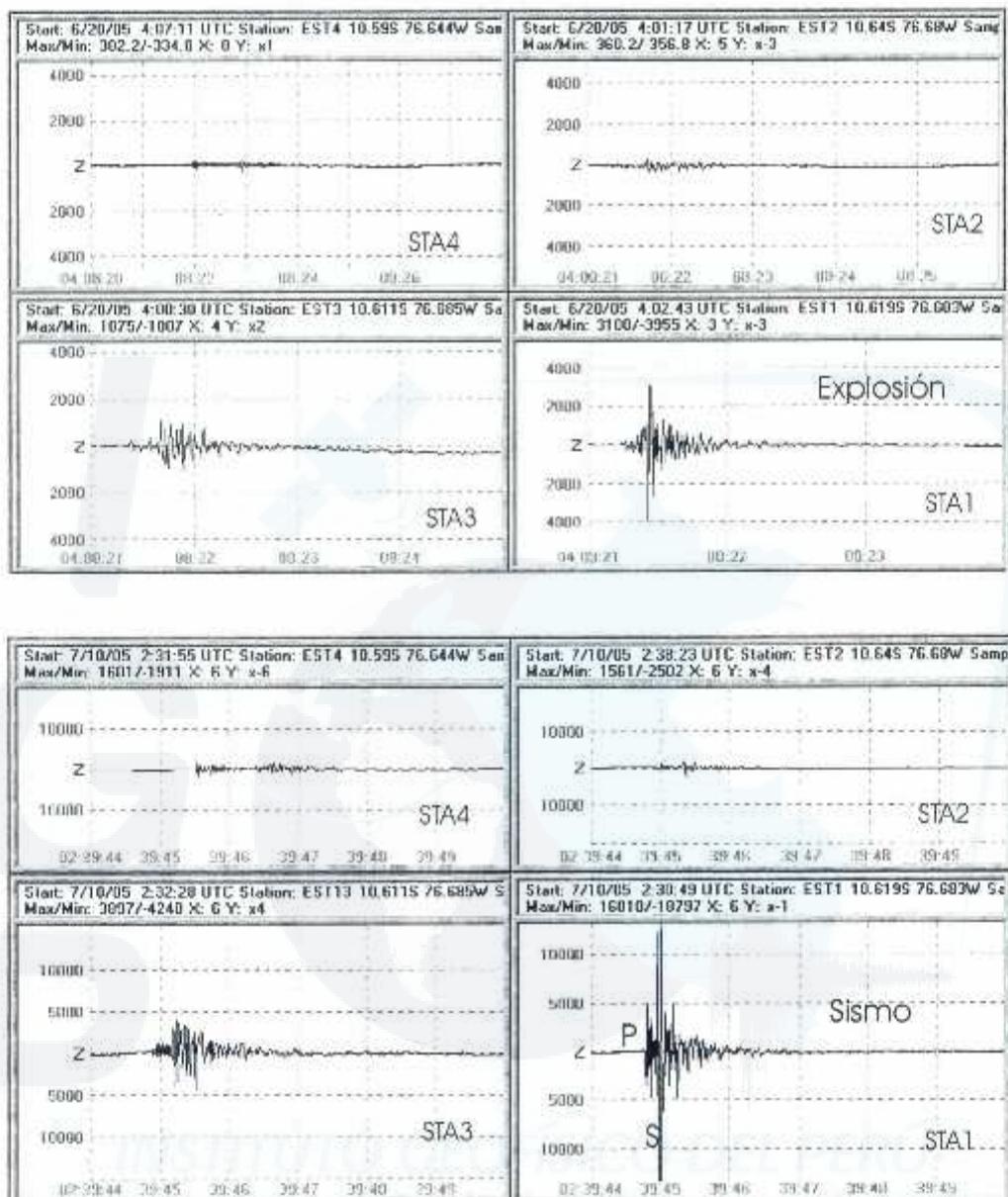
Estos registros corresponden a sismos ocurridos a distancias mayores al radio de cobertura de la red sísmica de la UPU y son fácilmente identificados porque las diferencias en los tiempos de llegada entre las ondas  $T_s$  y  $T_p$  son mayores a 5 segundos; es decir, equivalente a distancias del orden de 20 km. Ejemplos de estos registros se presentan en la Figura 8.

### 6.2.- Registro de Microsismos

La actividad microsísmica registrada tiene como principal característica que corresponden a sismos de magnitudes pequeñas  $<2.0$  ML y diferencias de tiempo entre la fase  $T_s$  y  $T_p$  menores a 1 segundo, lo que equivale a distancias medias de 4 km desde cada estación de registro. En la Figura 9, se muestra algunos ejemplos de este tipo de registros, además del registro de una explosión a fin de comparar la forma y duración de ambos tipos de señales.



**Figura 8.** Ejemplos de señales correspondientes a un sismo regional registrado en las estaciones STA1, STA2 y STA3 de la red sísmica local de la U.P. Uchucchacua. Obsérvese el contenido de bajas frecuencias y la diferencia en los tiempos de llegada de las ondas sísmicas P y S, siendo este de 60 segundos aproximadamente, equivalente a una distancia epicentral del orden de 360 km.



**Figura 9.** Ejemplos de señales de explosiones y sismos tectónicos. Obsérvese las diferencias en las formas de la señal y el registro de diferente grupo de ondas. Para el caso de las explosiones (figura superior), una onda impulsiva y para los tectónicos (Figura inferior), ondas P y S. Los registros corresponden a las cuatro estaciones que integraron la red sísmica local.

### **6.3.- Registro de Explosiones**

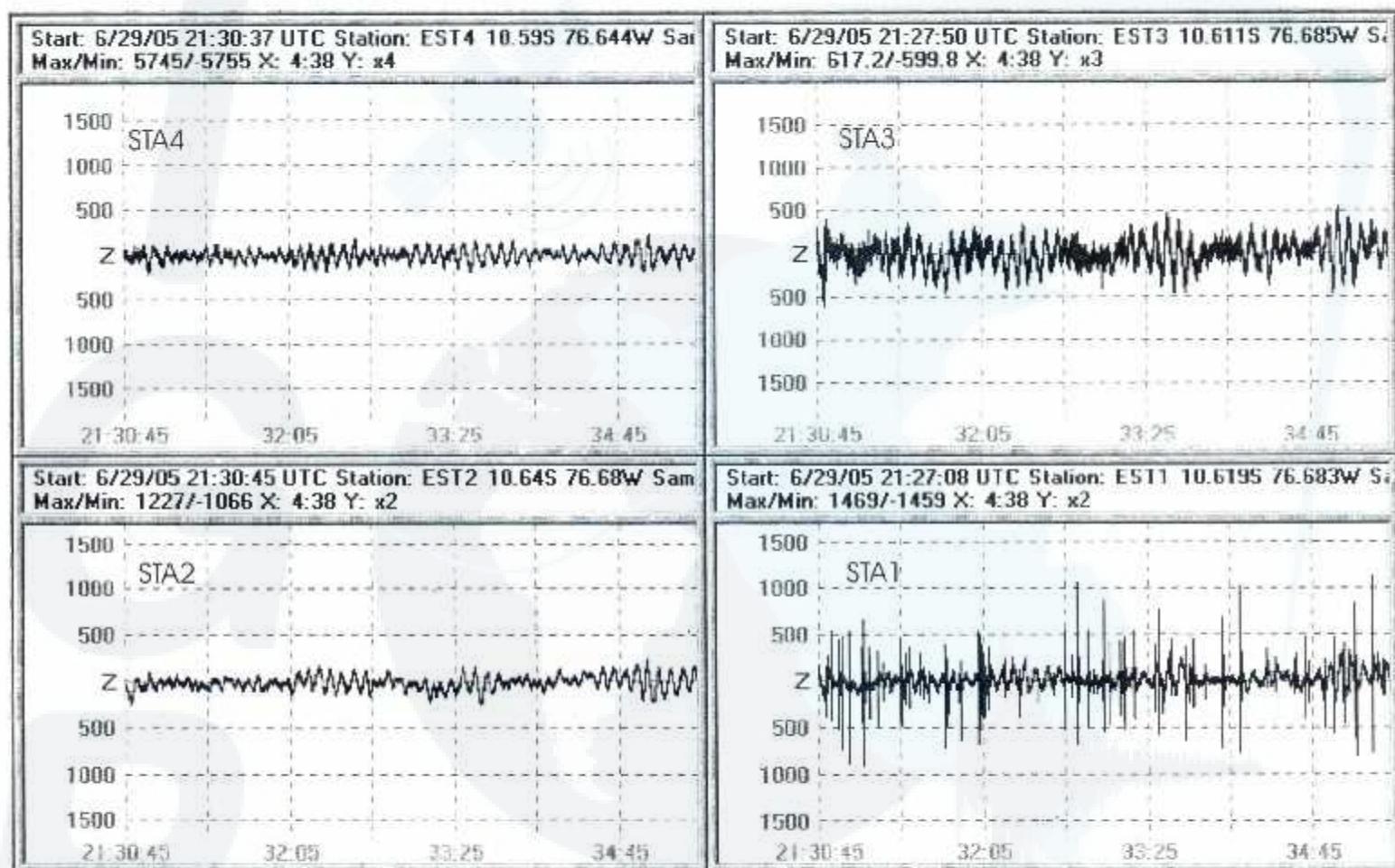
Los registros correspondientes a explosiones tienen como característica principal que el grupo de la onda P tiene inicios muy impulsivos, siendo casi imposible identificar el registro de la onda S. Considerando las labores propias de la UP Uchucchacua, se ha registrado un gran número de explosiones y algunos ejemplos se muestran en la Figura 10. En esta figura, se presentan los registros correspondientes al día 29 de Junio de 2005 para las 4 estaciones de la red sísmica local y en ellos se observa que los registros de las explosiones son más notorios en las estaciones STA1 y STA3, lo cual sugiere a priori que las explosiones se realizaban a distancias cercanas a ambas estaciones. Estas estaciones se encontraban a ambos extremos de la falla Socorro.

### **6.4.- Registro de Ruido**

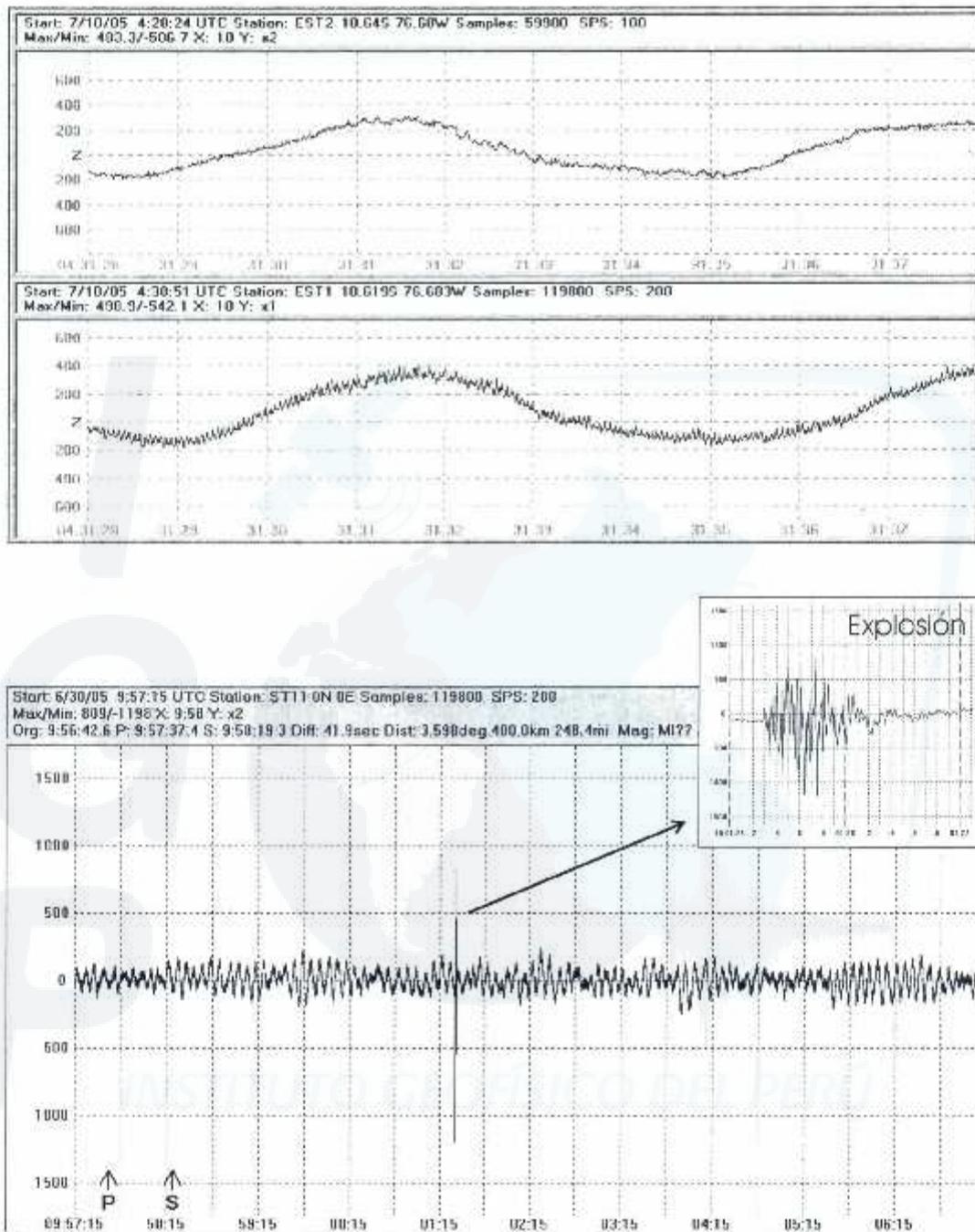
Entre los tipos más frecuentes de registro de ruido se puede mencionar a los de periodo largo cuyo origen es difícil de establecer con certeza, pudiendo deberse a las oscilaciones propias de la Tierra, a las mareas, al viento que golpea estructuras sólidas prominentes en altura o vegetación. Otro tipo de ruido es caracterizado por la presencia de altas frecuencias con origen a efectos de sitio, paso de vehículos, cercanía a ciudades o estructuras que son afectadas por el viento. En la Figura 11 se presenta un ejemplo de registro de cada tipo mencionado líneas arriba, además del registro de una explosión cuya amplitud esta por encima del nivel de ruido que ocurre en la estación STA1.

### **6.4.- Discriminación entre Sismos y Explosiones**

Tal como se ha descrito, la principal diferencia entre el registro producido por una explosión y un sismo, radica principalmente en el proceso que les da origen. Es decir, un sismo es producido por un proceso de acumulación de energía que al liberarse lo hace debido a la acción de un doble par de fuerzas que producen la ruptura de la roca por cizalladura permitiendo que las ondas o



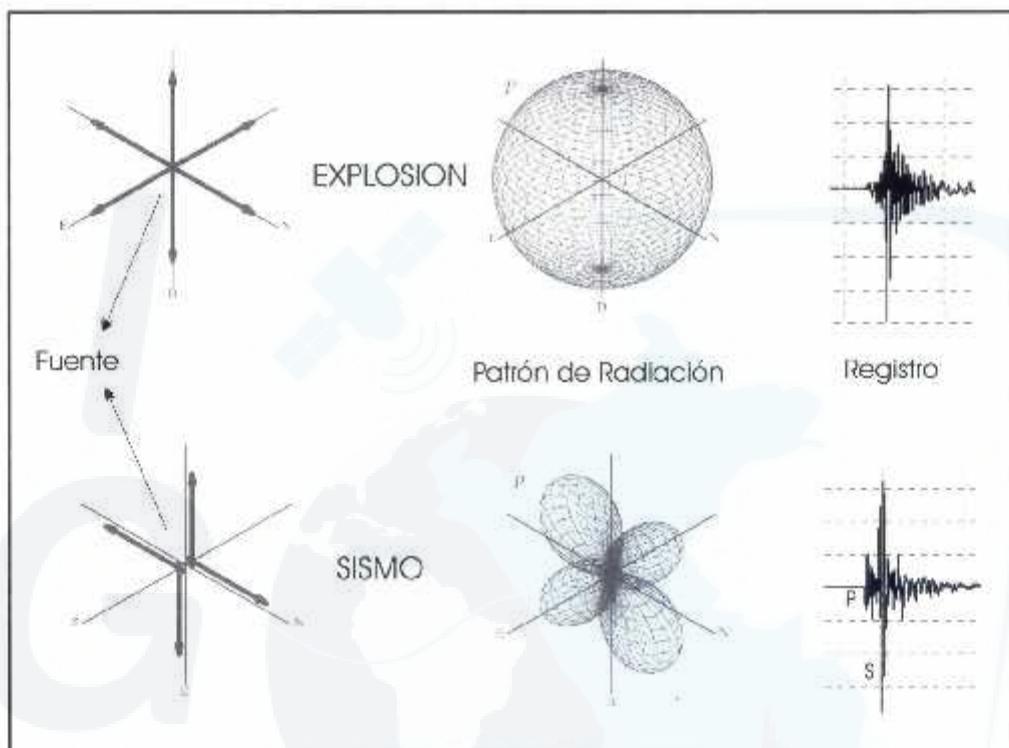
**Figura 10.** Ejemplos del registro de explosiones para el mismo periodo de tiempo en las 4 estaciones de la red sísmica local. Notese que el número de explosiones registradas es mayor en las estaciones STA1 y STA3 que en las estaciones STA2 y STA4. En el caso de estas últimas estaciones, las explosiones no fueron registradas debido a que posiblemente estaban alejadas de la zona de actividad minera. Por la amplitud de la señal y por el número de explosiones registradas por STA1, es posible que esta estación se encuentre cerca de la zona de explotación.



**Figura 11.** Ejemplos de registros en donde se muestra los dos tipos de ruidos identificados durante el monitoreo de la actividad sísmica en la U.P. Uchucchacua. Parte superior ruido de largo período en las estaciones STA1 y STA2 asociados probablemente a efectos del viento, en la parte inferior de altas frecuencias propios del ruido de fondo existente en la mina.

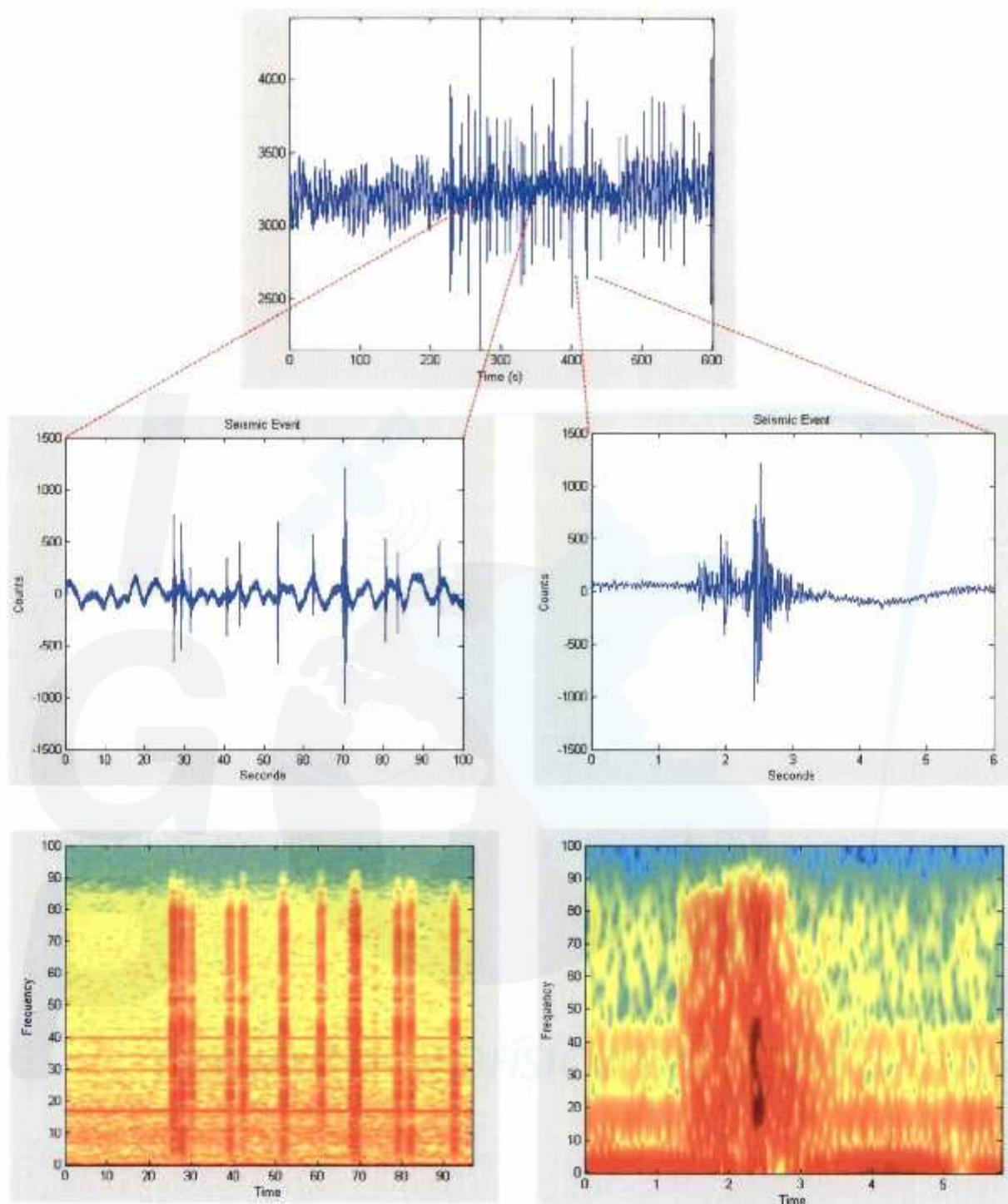
energía se irradie en 4 direcciones bien definidas, tal como se observa en la Figura 12. La explosión es producida por un proceso de impulsión en el cual las ondas o la energía se irradian de manera radial con las mismas características en todas las direcciones, similar al proceso de inflar un globo (Figura 12). En estas condiciones, en una señal sísmica es fácil distinguir el registro de las ondas P y S, siendo la segunda de mayor amplitud debido a sus propiedades de propagación; mientras que, en la señal de una explosión únicamente se distingue el registro de la onda P, siendo esta muy impulsiva. Si la explosión es realizada a cierto nivel de profundidad, es posible distinguir la presencia de fases secundarias que pueden ser utilizadas como ondas S a fin de localizar el punto en donde se produjo la explosión.

Otro procedimiento utilizado en este estudio para diferenciar sismos de explosiones es el que considera la elaboración de espectrogramas de la señal. En la Figura 13a se presenta el espectrograma del registro de algunas explosiones, identificadas por la corta duración de su registro y gran amplitud para la onda P, ambas características puestas en evidencia en sus espectrogramas con la presencia de picos de altas frecuencias, similares a barras de pequeño espesor. Contrariamente, en la Figura 13b se muestra el registro de un microsismo con fases P y S muy notorias, siendo su espectrograma caracterizado por un decaimiento de las altas frecuencias que indica la duración del registro del microsismo. Del mismo modo, se logra identificar o separar los rangos de frecuencia correspondiente a las fases P y S. En la Figura 13c se muestra el registro de sismos y explosiones, los primeros caracterizados por la mayor amplitud de su señal sugiriendo que la energía por ellos liberada es mucho mayor a la que corresponde a una explosión. El espectrograma del sismo, además de mostrar el decaimiento de la amplitud de sus frecuencias, también permite observar la presencia de picos de altas frecuencias típicos de las explosiones, tal como se ha indicado para figuras anteriores. Finalmente, en la Figura 13d se muestra el espectrograma para dos microsismos de diferente tamaño o magnitud, características que son muy visibles en sus respectivos espectrogramas.

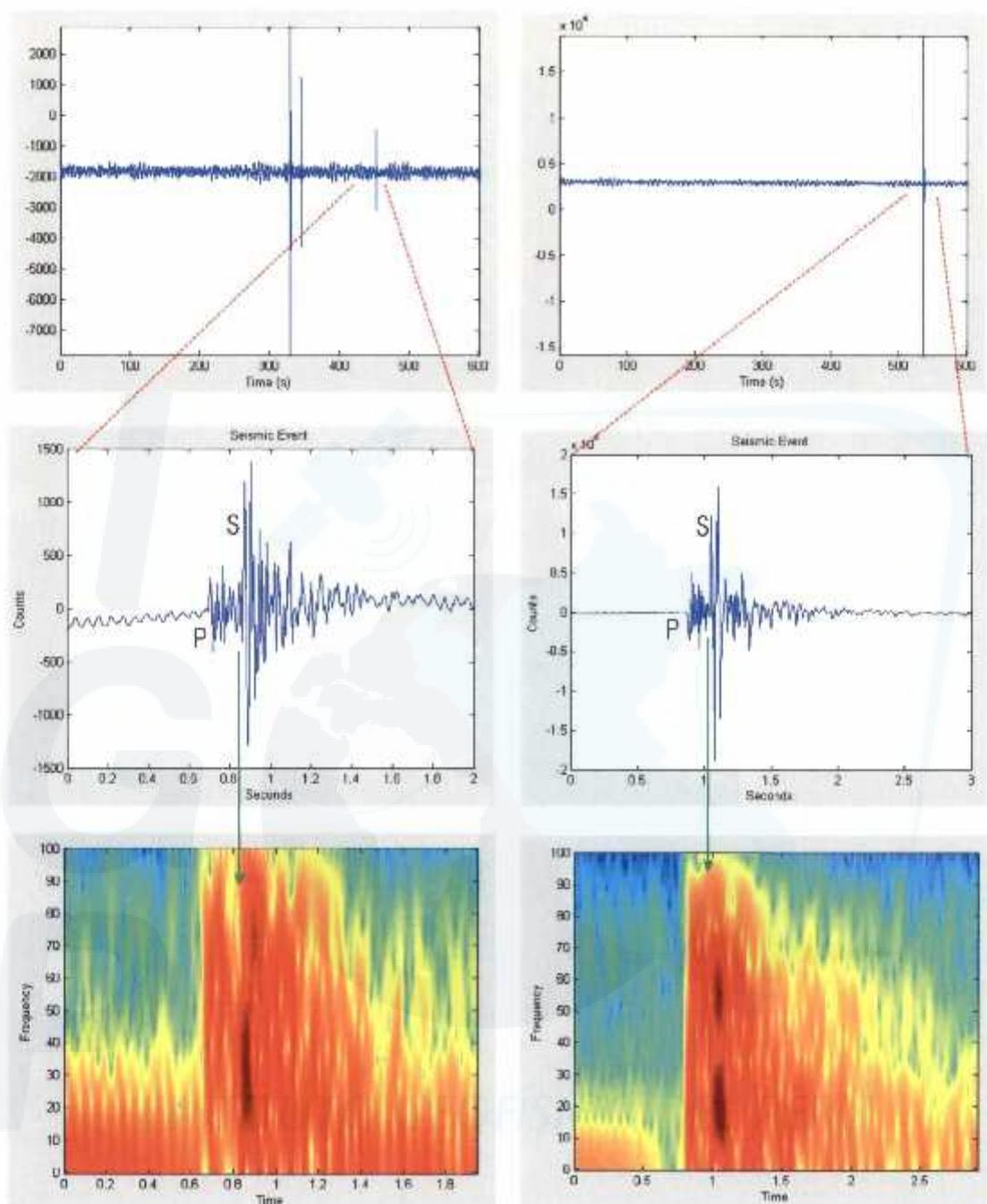


**Figura 12.** Diferencias entre la orientación de los ejes de esfuerzo, patrón de radiación de la energía y registros de una explosión en comparación con la de un sismo. Los registros de explosión y sismo tectónico corresponde a los registrados por la red sísmica local de la U.P. Uchucchacua.

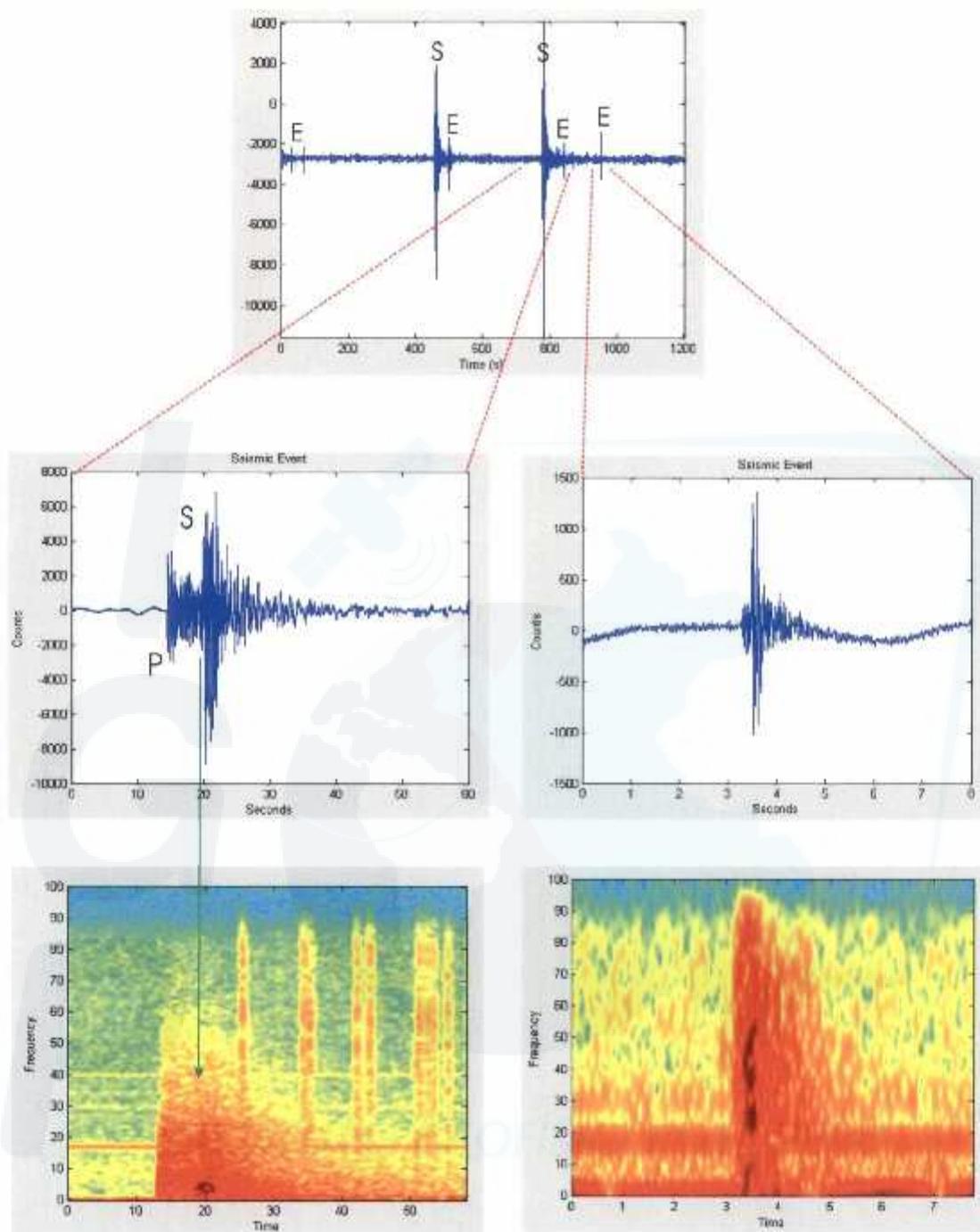
INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ



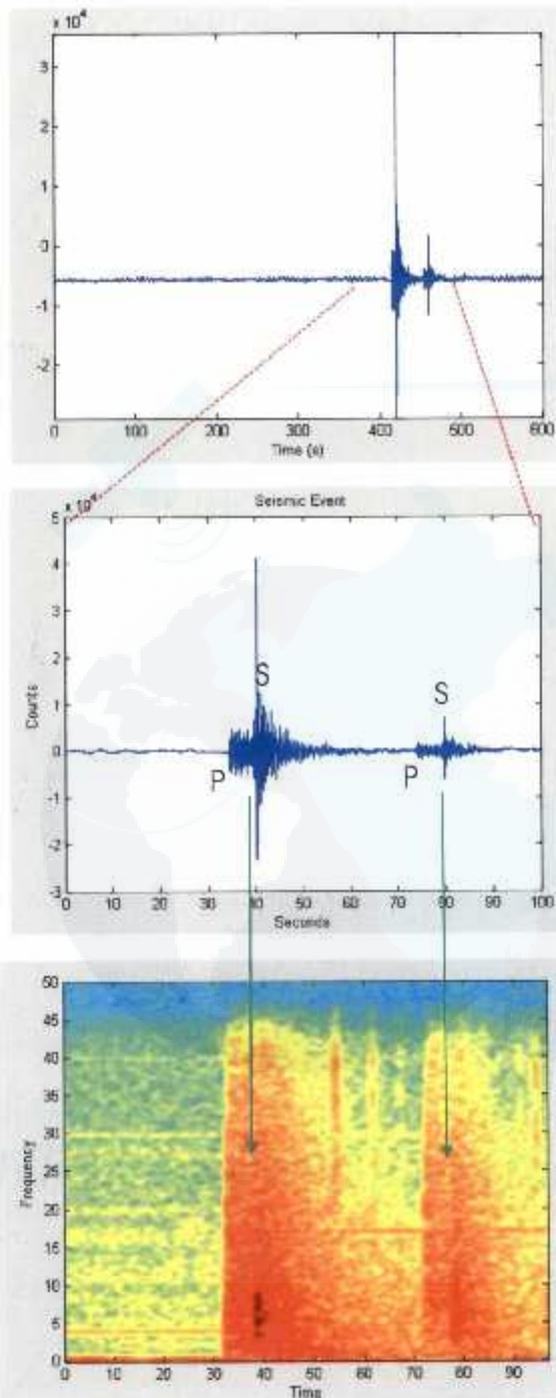
**Figura 13.** .a.) En la parte superior de la figura se muestra ejemplos de señales correspondientes a diversas explosiones registradas en la estación sísmica STA1. En el centro se muestra una ampliación del registro anterior con 12 y 3 explosiones respectivamente. En los espectrogramas, se observa que el contenido de frecuencias es del orden de 90 Hz canalizadas en barras verticales de 1 a 3 segundos de duración, siendo estas características típicas de los registros de explosiones.



**Figura 13.** Continuación...../ .b.) Ejemplos del registro de eventos sísmicos con sus respectivos espectrogramas. Obsérvese los picos de frecuencias y su respectivo decaimiento que caracteriza al registro de las fases P y S (sismos tectónicos). Las flechas de color verde indican el cambio de las frecuencias en el espectrogramas asociadas a las fases P y S.



**Figura 13.** Continuación...../ c) Ejemplos de registros de explosiones y de sismos contenidos en una misma ventana de tiempo. En las figuras del centro se muestra el registro de un sismo y de una explosión; mientras que, en la parte inferior sus respectivos espectrogramas. En el espectrograma de la izquierda se puede observar la banda de frecuencias y el decaimiento de las mismas que caracteriza al registro de un sismo, además de bandas de 1 y 2 segundos con frecuencias máximas de 90 Hz que sugiere la presencia del registros de explosiones, tal como se muestra en el espectrograma de la derecha.



**Figura 13.** Continuación...../.. d.) Registro de dos sismos de diferente magnitud con sus respectivos espectrogramas. Nótese que aunque el tamaño del sismo cambie, el contenido de las frecuencias es similar, así como el decaimiento de la amplitud de las mismas.

## 7.- CALCULO DE LOS PARAMETROS HIPOCENTRALES

En general, los terremotos grandes ocurren cuando se producen movimientos o fracturas mayores a una decena de kilómetros aproximadamente; mientras que, los terremotos pequeños cuando los movimientos o fracturas son milimétricos. Dentro de este contexto, el sismo se origina en un punto a partir del cual la energía se irradia en todas direcciones en forma de ondas sísmicas, las mismas que al recorrer diferentes caminos pueden sufrir los fenómenos de reflexión, refracción y difracción al pasar de un medio a otro con distintas propiedades físicas.

Así los parámetros hipocentrales que identifican a un sismo son:

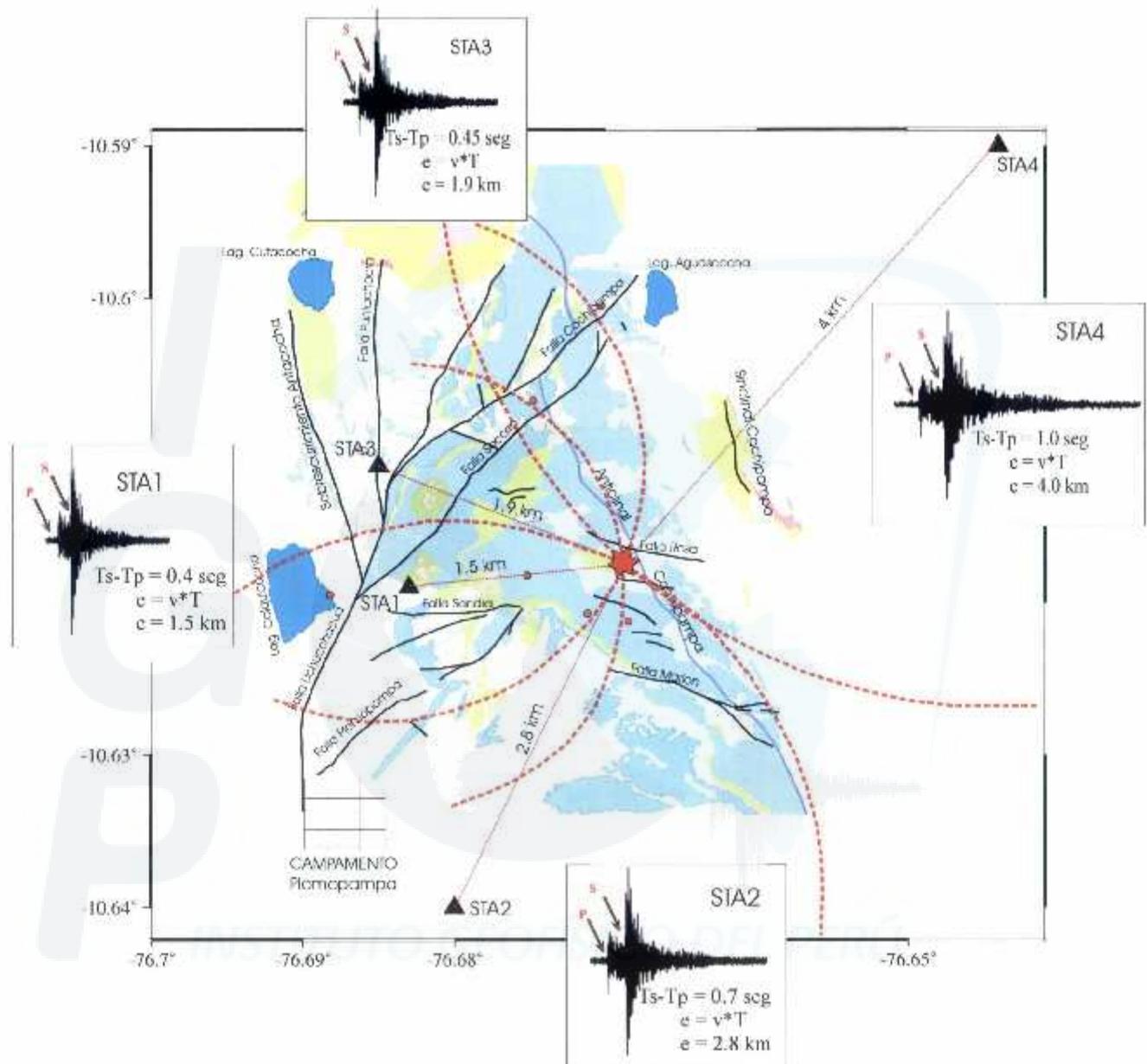
- .- La fecha : *indica el día, mes y año de ocurrencia del sismo*
- .- Tiempo : *indica el tiempo origen del sismo (hh:mm:ss) en GMT*
- .- Coordenadas : *indica las coordenadas geográficas del sismo, tanto para la latitud Sur y longitud Oeste en grados*
- .- Profundidad : *indica la profundidad del foco sísmico en km*
- .- Magnitud : *indica el tamaño del sismo y es expresado en la escala de Richter; es decir, la magnitud local ML*

Otros parámetros adicionales que permiten cuantificar el tamaño de los sismos son la cantidad de energía sísmica propiamente dicha ( $E_s$ ), así como la intensidad en el área epicentral, siendo frecuentemente expresada en la escala Mercalli Modificada.

## 7.1.- Localización de los Sismos

Cuando ocurre un sismo se produce una gran diversidad de ondas sísmicas como las ondas P, S, LR, LQ, etc. y que en conjunto constituyen el registro del sismo. Cada tipo de onda viaja a velocidades diferentes; por lo tanto, llegan a una estación de registro en diferentes tiempos. Las ondas P son más veloces y llegan primero (~5km/seg); mientras que, las ondas S con aproximadamente la mitad de la velocidad de las ondas P, llegan después. La estación que se encuentra más próximo al epicentro registra rápidamente las ondas P y S, y a medida que la distancia se incrementa, la diferencia entre el tiempo de llegada de la onda P con respecto a la S también aumenta. Estas características en el registro del terremoto, permite describir un procedimiento simple para su localización.

Por ejemplo, ocurre un sismo próximo a la falla de Rosa (U.P. Uchucchacua) y este, ha sido registrado por las estaciones de STA1, STA2, STA3 y STA4. En los registros, el tiempo de llegada de las ondas P y S, además de la diferencia TS-TP es medido para cada estación (Figura 14). El tiempo TS-TP indica la distancia a la cual ocurrió el sismo al igual que la distancia a la cual se encuentra una tormenta es indicada por la diferencia de tiempo entre el reflejo de la luz de un rayo y el sonido del trueno. En la figura, para la estación STA1 la diferencia TS-TP es de 0.4 segundos (la más cercana al sismo), para la estación STA2 de 0.7 segundos, para la estación STA3 de 0.45 segundos y para la estación STA4 de 1 segundo (la más lejana al sismo). Asumiendo una velocidad media de propagación para las ondas de 4 km/seg, un intervalo de 0.4 segundos correspondería a una distancia de 1.5 km, 0.7 segundos a 2.8 km, 0.45 segundos a 1.9 km y 1 segundo a 4 km. Conocida la distancia epicentro-estación para cada estación sísmica, se procede a trazar un círculo alrededor de ella con un radio igual a la distancia calculada. El resultado indica que el sismo ocurrió en el punto donde los cuatro círculos se interceptan (estrella en la Figura 14).



**Figura 14.** Ejemplo gráfico del procedimiento seguido para la localización de los sismos y explosiones registrados por la red sísmica local de la U.P. Uchucchacua. La estrella indica la ubicación del epicentro. Para seguir el procedimiento de localización ver texto.

El procedimiento descrito anteriormente, ha sido integrado a un proceso iterativo a fin de hacer uso de las herramientas de la informática y lograr mejores resultados en la localización de los sismos. Hoy en día, este procedimiento se realiza de manera iterativa con el uso de algoritmos como el Fasthypo, Hypoellipse, Hypo77 y Hypoinverse. Para el cálculo de los parámetros hipocentrales de los sismos registrados por la red sísmica de la UPU se ha utilizado el Hypoinverse (Klein, 1978) que a diferencia de los anteriores algoritmos, permite realizar un mayor número de interacciones, además de considerar condiciones de contorno asociados a la distribución geométrica de la red (estación más cercana al punto de interés, distancia máxima/mínima entre estaciones, entre otros). En general, todos los programas de localización hipocentral requieren como información básica ha utilizar un modelo de distribución de velocidades, un valor para la relación de velocidades y un procedimiento adecuado para el cálculo del tamaño de los sismos.

## **7.2.- Modelo y Relación de Velocidades**

Todos los programas de localización hipocentral requieren de un modelo de corteza en la cual se pueda estimar como varían las velocidades de las ondas en función de la profundidad. Este modelo de corteza se asemeja una serie de capas planas en las cuales la velocidad de la onda P es constante y el número de capas va a depender de la geometría y de las dimensiones del área de cobertura de la red sísmica. La práctica ha demostrado que es necesario tener valores reales para la velocidad de la onda P obtenidos a partir de estudios geofísicos como refracción-reflexión sísmica, tomografía sísmica, etc. Conociendo estos valores es posible mejorar los resultados a obtenerse durante el cálculo de los parámetros hipocentrales de los sismos.

En el caso del Perú, no existen muchos estudios orientados a conocer las variaciones de la velocidad de las ondas en la corteza, siendo el de Ocola et al. (1971, 1973) obtenido para la región Sur de Perú por medio de refracción sísmica, el más utilizado con ligeras modificaciones en cuanto al número de capas o

incremento en las velocidades de la onda P. Estos modelos de velocidad fueron utilizados en estudios de microsismicidad realizados en la región Sur de Perú (Grange, 1984), Centro (Suárez et al, 1983; Dorbath et al, 1986; Dorbath et al, 1991) y Norte ( Deverchere et al, 1989).

Para el área de la provincia de Oyón específicamente no existen estudios detallados que permitan conocer la distribución de la velocidad de las ondas en profundidad y menos para niveles de profundidad muy superficiales (< 1km). Por lo tanto, se ha visto por conveniente evaluar una serie de 3 modelos de velocidad que consideran capas superficiales con variaciones en su espesor entre 5 y 25 metros, y velocidades para la onda P que oscilan entre 0.5 hasta 5.5 km/seg. Los márgenes de error obtenidos para los parámetros hipocentrales utilizando cada modelo, permitieron considerar al propuesto por Lermo y Bernal (2004) para la zona geotermal de Ocozulco en México como el más óptimo. Además se debe considerar que las características geológicas y tectónicas de dicha región son muy similares a las de la zona de Oyón y por ende a la UP Uchucchacua. Este modelo considera 4 capas y velocidades para la onda P que oscilan entre 1.6 km/seg hasta 5.6 km/seg para el semi-espacio por debajo de la profundidad de 870 metros (ver Tabla 1).

**Tabla 1**

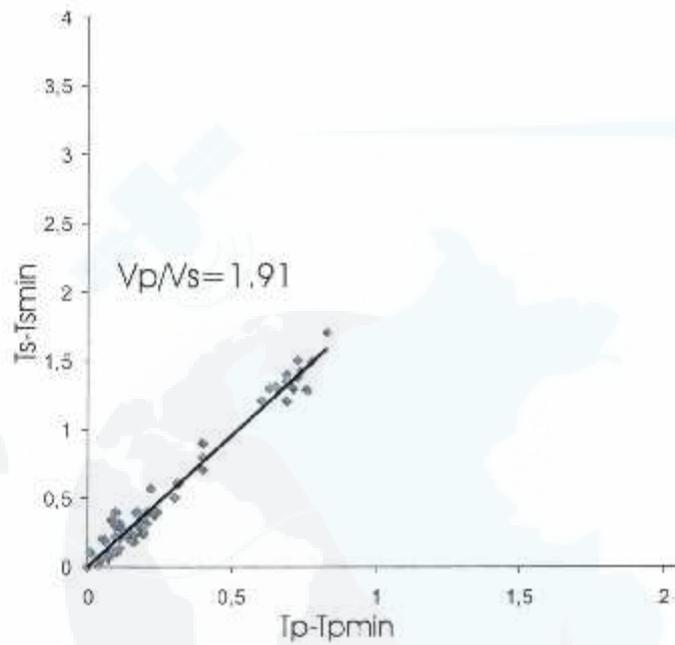
*Modelo de velocidades utilizado en este estudio (Lermo y Bernal, 2004)*

<b>Espesor (metros)</b>	<b>Velocidad onda P (km/seg.).</b>
0.0	1.63
60.0	2.50
200.0	3.10
520.0	4.50
870.0	5.60

Los modelos de velocidad utilizados por los diversos programas de localización hipocentral, considera únicamente variaciones de velocidad para la onda P y asumen que el valor de la onda S es en teoría igual a  $V_p/1.73$ ; es decir, el correspondiente a un modelo de Tierra homogénea e isotrópica. A fin de corregir el valor de velocidad de las ondas S, principalmente para áreas pequeñas, se recomienda calcular la relación de velocidades  $V_p/V_s$  utilizando una base constituida por los tiempos de llegada de las fases P y S para un gran número de sismos registrados en varias estaciones propias de la redes utilizadas y así, ajustar la velocidad de las ondas S a un valor real. Evidentemente, de acuerdo a las propiedades físicas del suelo en cada área de estudio, se obtendrán diferentes valores para  $V_p/V_s$  lo cual permite controlar mejor el cálculo de los parámetros hipocentrales de los sismos. Para el área de estudio, se ha calculado el valor de  $V_p/V_s$  utilizando una base de datos compuesta por 72 registros provenientes de las estaciones que integran la red sísmica de la UPU (en mayor número estaciones STA1 y STA3). Siguiendo el procedimiento desarrollado por Coudert (1987), en la Figura 15 se muestra los valores de  $T_s - T_{smin}$  y  $T_p - T_{pmin}$  ( $i$ , corresponde al tiempo P y S para cada estación) que permiten conocer el valor de la relación  $V_p/V_s$  a partir de un ajuste lineal, siendo este del orden de 1.91 con un factor de correlación de 0.98. Este valor es muy alto si se considera compararlo con otros obtenidos en diferentes estudios de microsismicidad realizados en zonas de deformación controladas por fallas activas ( $V_p/V_s=1.70$  a 1.73). Sin embargo, habría que considerar que los procesos de deformación en el área de la UPU se desarrollan a niveles menores a 500 metros de profundidad y en estas condiciones, el valor obtenido para  $V_p/V_s$  es aceptable.

### **7.3.- Tamaño de los Sismos**

En este estudio, la magnitud ML o de Richter para el total de los sismos y explosiones registrados en cada una de las estaciones que integran la red sísmica de la UP Uchucchacua, ha sido obtenido a partir de la duración del registro del sismo/explosión utilizando la expresión propuesta por Klein (1978),



**Figura 15.** Curva de Wadati construida con datos de tiempos de llegada de fases P y S obtenidas de los sismos registrados por la red sísmica local de la U.P. Uchucchacua.

INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ

$$ML = -1.1 + 2 \log (D) + 0.007 (d) + 0.0035 (Z)$$

Donde,  $ML$  es la magnitud local,  $D$  la duración del registro expresado en segundos,  $d$  la distancia epicentral y  $Z$ , la profundidad del foco del sismo/explosión para el cual se pretende estimar la magnitud.

Asimismo, según Richter (1958) la energía sísmica liberada por los sismos puede ser estimada a partir de su magnitud  $ML$  utilizando la siguiente relación:

$$\text{Log } E = 9.9 + 1.9ML - 0.024 ML^2$$

Donde, la energía ( $E$ ) es expresada en ergios.

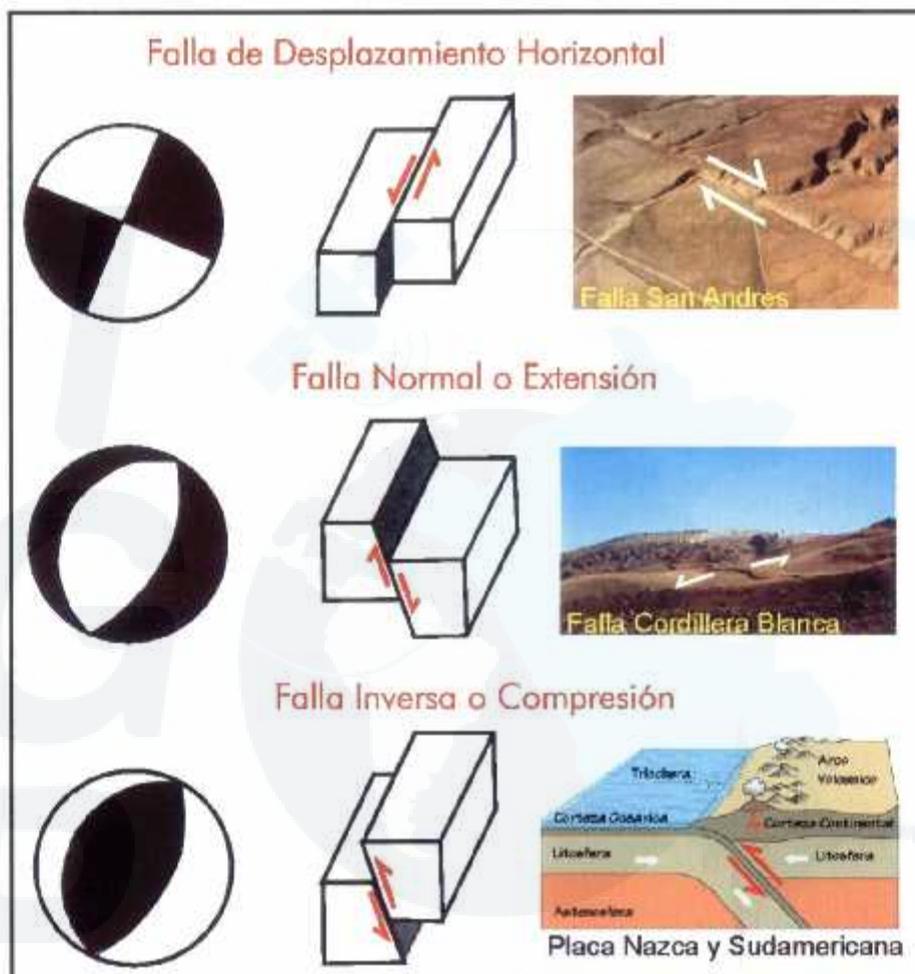
#### **7.4.- Orientación de la Fuente Sísmica**

Para conocer la orientación de la fuente que dio origen a un determinado sismo, es necesario obtener su mecanismo focal. El estudio de los mecanismos focales de un sismo tiene como finalidad determinar los procesos físicos que tienen lugar en el foco de un sismo y así conocer el estado de los esfuerzos en dicho punto. Los métodos sismológicos para la determinación del mecanismo focal de los sismos se basan en el análisis de las ondas sísmicas. Este procedimiento es conocido como método inverso; es decir, a partir de las observaciones o registros del sismo en diferentes estaciones, hay que deducir los parámetros que definen los procesos físicos ocurridos en el foco. En general, los sismos están asociados a fracturas en la corteza; por lo tanto, los modelos del mecanismo focal son mecanismos que representan el fenómeno físico de la ruptura. El modelo más simple para representar la fuente sísmica es el de foco puntual, en el que todos los procesos se reducen a un punto denominado foco sísmico. Uno de los métodos para determinar el mecanismo focal, esta basado en la distribución de los signos del primer impulso de la onda  $P$ , el mismo que se

basa en la forma del patrón de radiación de la onda asumiendo un foco puntual representado por un doble par de fuerzas sin momento resultante. De esta manera, la fuente se reduce a un foco puntual equivalente a una fractura de cizalla representada por un doble par de fuerzas cuya orientación puede ser conocida a partir de los planos definidos por el azimut, buzamiento y ángulo de deslizamiento.

En general, es posible calcular mecanismos focales simples cuando el número de datos es elevado y compuestos cuando el dato es reducido y en ambos casos se utiliza el algoritmo propuesto por Brillinger et al, (1980). Para mejor comprensión, en la Figura 16 se muestra las tres representaciones clásicas para los mecanismos focales asociados a los diferentes tipos de fallas reconocidas desde el punto de vista geológico y tectónico. En general, los procesos de ruptura producen fallas con geometrías complejas, las mismas que pueden ser representadas por una combinación de los tres modelos clásicos de fallas mostrados en la Figura 16. En resumen, de acuerdo a las características de las esferas que representan el mecanismo focal, es fácil deducir si el sismo o el conjunto de sismos han sido generados por un tipo de falla de desgarre horizontal/vertical, falla normal debido a esfuerzos extensivos o falla inversa producida por esfuerzos compresivos.





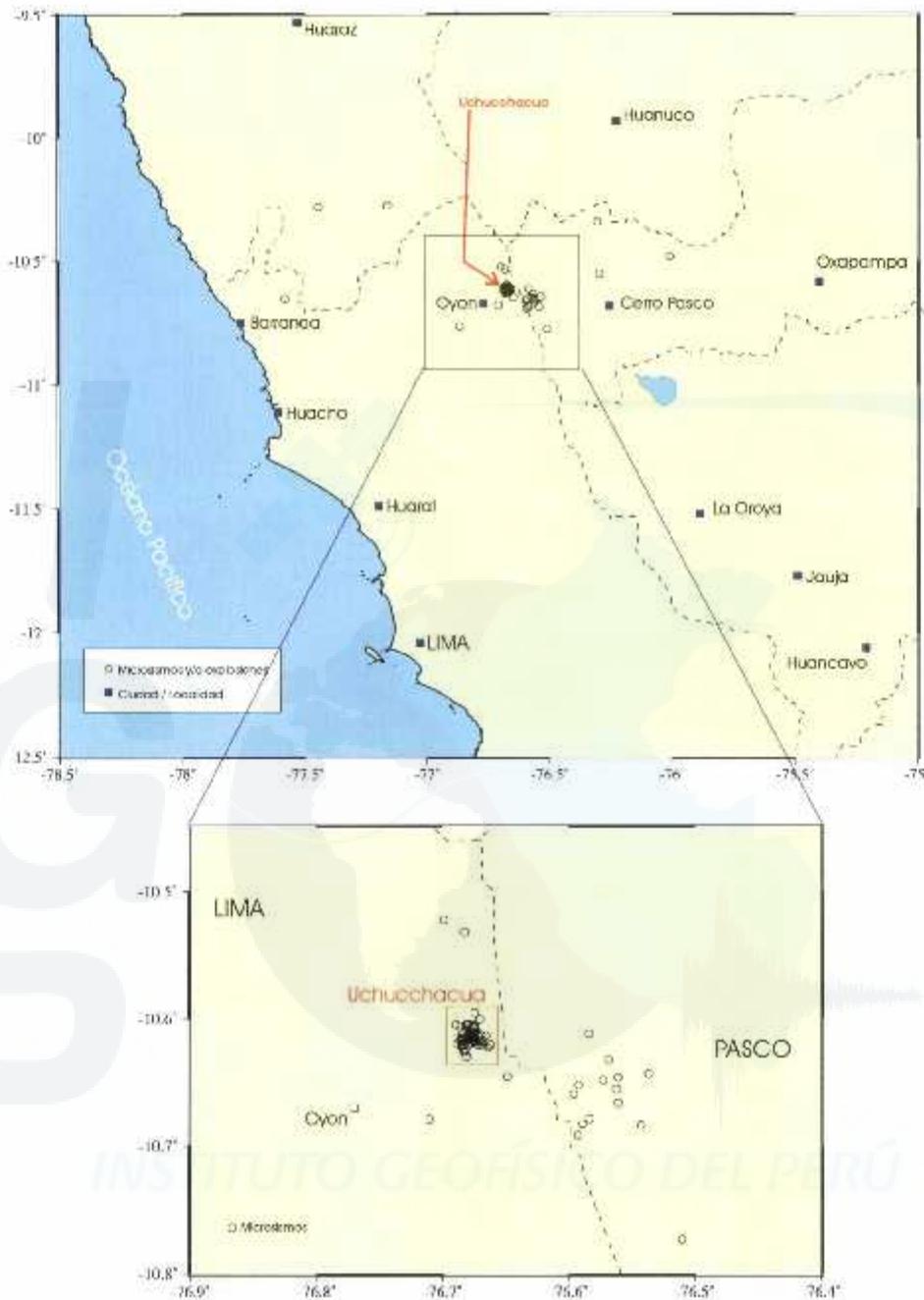
**Figura 16.-** Esquema que muestra la relación entre cada tipo de falla geológica y su respectivo mecanismo focal. Asimismo, se muestra algunos ejemplos de cada tipo de falla.

## 8.- ANALISIS Y EVALUACION DE EVENTOS REGISTRADOS POR LA RED SISMICA LOCAL

Durante el periodo de operatividad de la red sísmica de la UP Uchucchacua, se ha registrado un gran número de explosiones, microsismos tectónicos e inducidos. Siguiendo el procedimiento descrito en capítulos anteriores, del total de registros se ha logrado identificar y localizar 102 eventos entre explosiones y sismos. Según la Figura 17, dichos eventos se encuentran formando hasta tres agrupamientos, estando los dos primeros cerca de la localidad de Oyon con un mayor número de eventos y el tercero, consideraría a los eventos dispersos alrededor de la misma localidad. Para los objetivos del presente estudio, solo es de interés aquellos eventos que encuentran dentro del primer grupo (73 eventos) y sus principales características se describen a continuación.

### 8.1.- Explosiones

En la Figura 18 se presenta la distribución espacial de un total de 66 explosiones cuyos parámetros hipocentrales fueron estimados siguiendo el procedimiento ya descrito. En dicha figura se observa que durante el periodo de monitoreo sísmico, las explosiones habrían sido realizadas en un área delimitada por las fallas Plomopampa, Uchucchacua y el anticlinal de Cachipampa, estando en mayor número próximo a la intercepción de las fallas Socorro y Uchucchacua. Estas explosiones se habrían producido a niveles de profundidad menor a 3 km y habrían liberado energía del orden de  $2.6 \times 10^{10}$  ergios, equivalente a magnitudes menores a 0.61ML.



**Figura 17.** Mapa de distribución espacial de los eventos sísmicos y explosiones localizados utilizando información proveniente de la red sísmica local de la U. P. Uchucchacua. Se ha identificado 3 grupo de eventos, siendo el mas numeroso el que se encuentra dentro del área de cobertura de la red sísmica local.



En general, según información proporcionada por la UP Uchucchacua las explosiones se realizaban en dos horarios: entre las 4 y 5 de la mañana, y entre las 16 y 17 horas de la tarde, de lunes a viernes. Los días sábados las explosiones eran realizadas únicamente en el horario de tarde. Todos los eventos considerados como explosiones se han producido entre los rangos de horario antes indicados con excepción de algunas explosiones que se asume se realizaron fuera de los horarios antes indicados por motivos propios de las labores mineras. En la Tabla 2 se presenta los parámetros hipocentrales que caracterizan a cada una de las explosiones que han sido localizadas en este estudio.

## 8.2.- Microsismos

En la Figura 19 se presenta la distribución espacial de 7 microsismos localizados utilizando información obtenida de la red sísmica local de la U.P. Uchucchacua. De estos sismos, 4 se habrían producido en el área existente entre las fallas Marion y Rosa, caracterizada por la presencia de algunas trazas de fallas con longitudes pequeñas (entre 200 y 450 metros). Otros microsismos se encuentran próximos a la intercepción de la falla Socorro y el anticlinal Cachipampa, y en el extremo NE de la falla Cachipampa. El último sismo localizado se habría producido en las proximidades de la intercepción entre las fallas Socorro y Uchucchacua. Estos sismos presentan profundidades menores a 3.5 km con magnitudes de hasta 0.25ML. Estos valores de magnitud equivalen a liberaciones de energía del orden de  $1.5 \times 10^{10}$  ergios.

La distribución espacial de estos siete (7) microsismos con hipocentros en el área de interés no es suficiente para poder describir o identificar áreas de mayor deformación local asociada o no a algunas de las fallas existentes en dicha área. Sin embargo, se pone en evidencia que existe microsismicidad que debe ser mejor monitoreada por un periodo de tiempo más largo al considerado en este estudio.



La estación acelerométrica no registró ningún evento sísmico debido a que su funcionamiento no fue muy óptimo por la falta de una correcta y adecuada alimentación de energía. Los pocos días que funcionó la estación, no llegó a registrar sismos ni explosiones al mismo nivel que la estación sísmica de banda ancha que operó en el mismo lugar.

### **8.3.- Mecanismos Focales y Distribución de Esfuerzos**

Debido al poco número de sismos registrados y localizados, no ha sido posible elaborar mecanismos focales en tal número que permitan conocer en detalle las características de la deformación local presente en el área de estudio. Sin embargo, haciendo uso de la información disponible se ha calculado un mecanismo focal compuesto considerando 3 microsismos y dos mecanismos simples (Figura 19). El mecanismo focal compuesto agrupa a los sismos ocurridos entre las fallas Rosa y Marion, siendo el mismo de tipo normal con una gran componente de desgarre y planos que se orientan en dirección NO-SE y NE-SO, ambos con buzamientos cercanos a la vertical. El mecanismo focal obtenido para el sismo ubicado en las proximidades de la falla Socorro es similar al anterior; mientras que el mecanismo focal para el sismo cercano a la falla Uchucchacua es de tipo normal con planos orientados en dirección NNO-SSE y buzamientos próximos a los 45 grados. En todos los casos, la orientación de los planos es coherente con la orientación de las trazas de las diferentes fallas identificadas en el área de estudio.

La orientación de los ejes de esfuerzo sugieren el desarrollo de procesos extensivos, estando el eje de tensión T orientado en dirección N-S para los sismos ubicados en las cercanías del anticlinal Cachipampa y E-O en la falla Uchucchacua. La orientación de los ejes de tensión es coherente con los procesos de deformación extensional observada en el área de estudio y que fueron puestos en evidencia por Regalado (2005).

### 8.3.- Sismicidad Inducida por explosiones

Tal como se dijo anteriormente, durante un periodo de 30 días a partir del 17 de Junio de 2005, la red sísmica de la UP Uchucchacua ha registrado un gran número de explosiones ocurridas todos dentro de un área demarcada por las fallas Plomopampa, Uchucchacua y el anticlinal de Cachipampa. Tal como se observa en la Figura 18, el mayor número de explosiones se concentra cerca de la intersección de las fallas Socorro y Uchucchacua, ambas fallas se encuentran entre las estaciones sísmicas codificadas como STA1 y STA3.

En la información obtenida se ha observado que después de 2 minutos en promedio de haberse producido una explosión, se llega a registrar durante un periodo de tiempo de 30 minutos, un gran número de microsismos con diferencias en los tiempos de llegada de las ondas S con respecto a la P de 0.1 segundos, equivalente a una epicentro-estación de 300 a 400 metros. El registro de esta microsismicidad sugiere que en el área circundante al punto de emisión de la energía (explosión) se desarrolla un proceso importante de deformación que genera sismos inducidos que en mayor número son registrados por la estación STA1, lo cual sugiere que la explosión se realizaba muy cerca de dicha estación. Al realizar un análisis detallado estación por estación sobre las características de la microsismicidad inducida se ha observado las siguientes características:

Después de registrarse una explosión, por ejemplo el día 21 de Junio, en la STA1 se identifica el registro de aproximadamente 110 microsismos, en la STA2 solamente 18 microsismos, en la STA3 aproximadamente 65 microsismos y en la STA4, únicamente 6 microsismos. De acuerdo al número de registros de sismos inducidos por la explosión en cada estación es posible considerar que la explosión y la fuente de deformación se encuentran muy cerca de la estación STA1; es decir, cerca de la falla Socorro. Asimismo, la amplitud del registro de la explosión y de los sismos inducidos, son mayores en las estaciones STA1 y STA3 en comparación con STA2 y especialmente con STA4 (Ver ejemplos de la Figura 20).

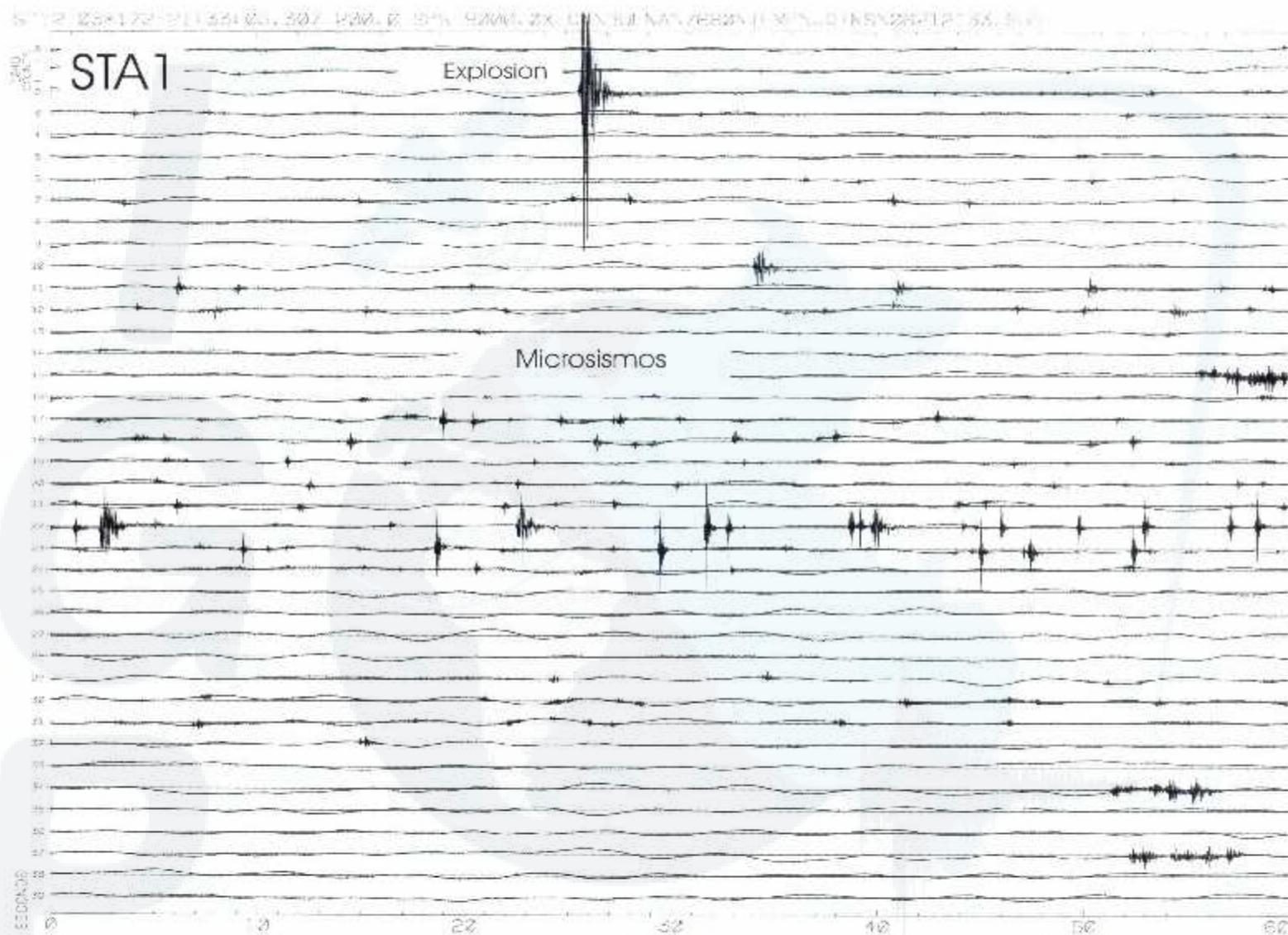
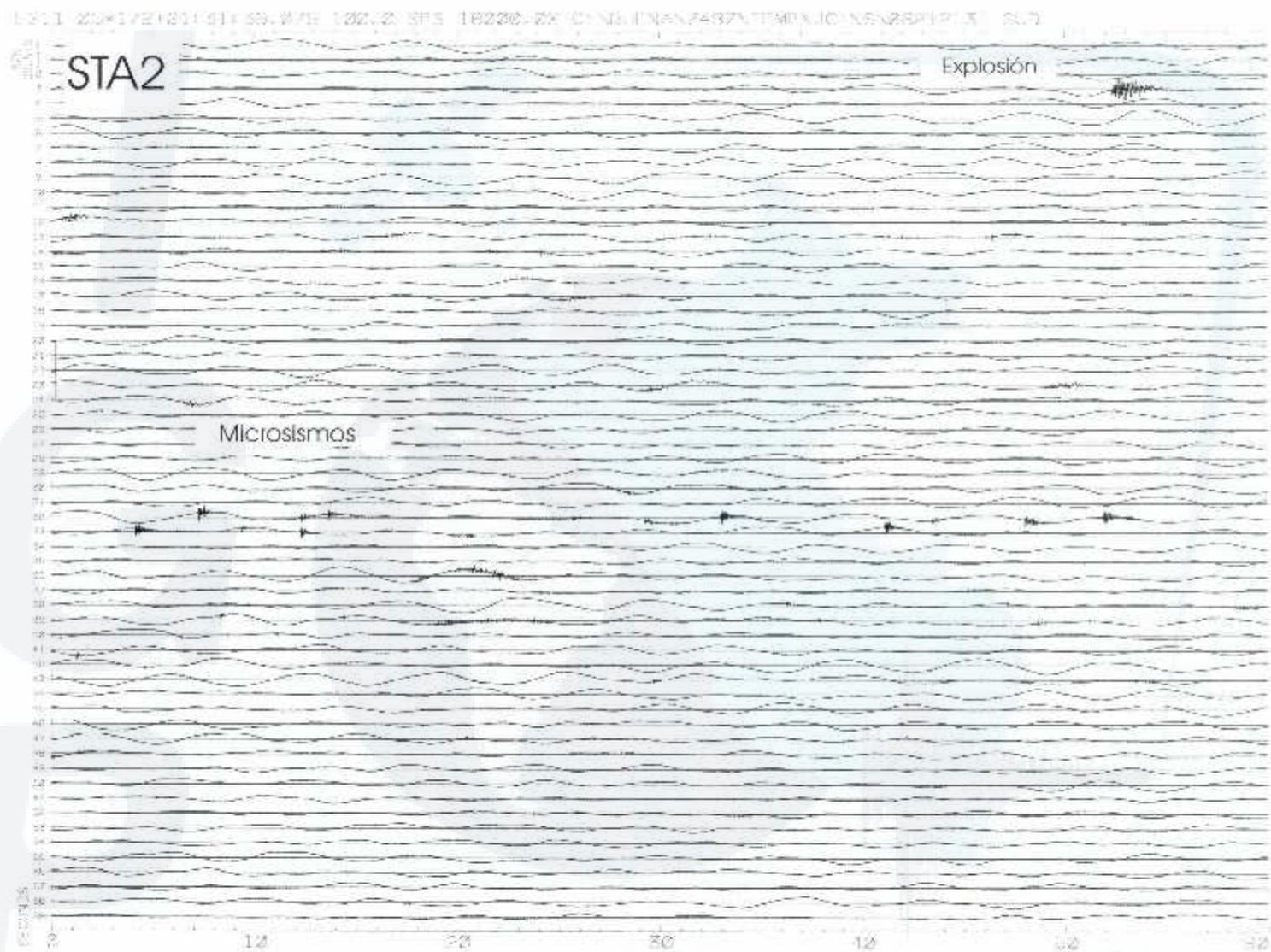


Figura 20. a.) Ejemplo del registro en STA1 de una explosión seguida por un gran número de sismos inducidos por la misma explosión. Cada traza tiene una duración de 60 segundos y el sismograma completo, una duración de 40 minutos.



**Figura 20. b.)** Ejemplo del registro en STA2 de una explosión seguida por un menor número de sismos inducidos por la misma explosión. Esta estación se encuentra mas alejada de STA1 y probablemente del área de mayor deformación. Cada traza tiene una duración de 60 segundos y el sismograma completo, una duración de una hora.

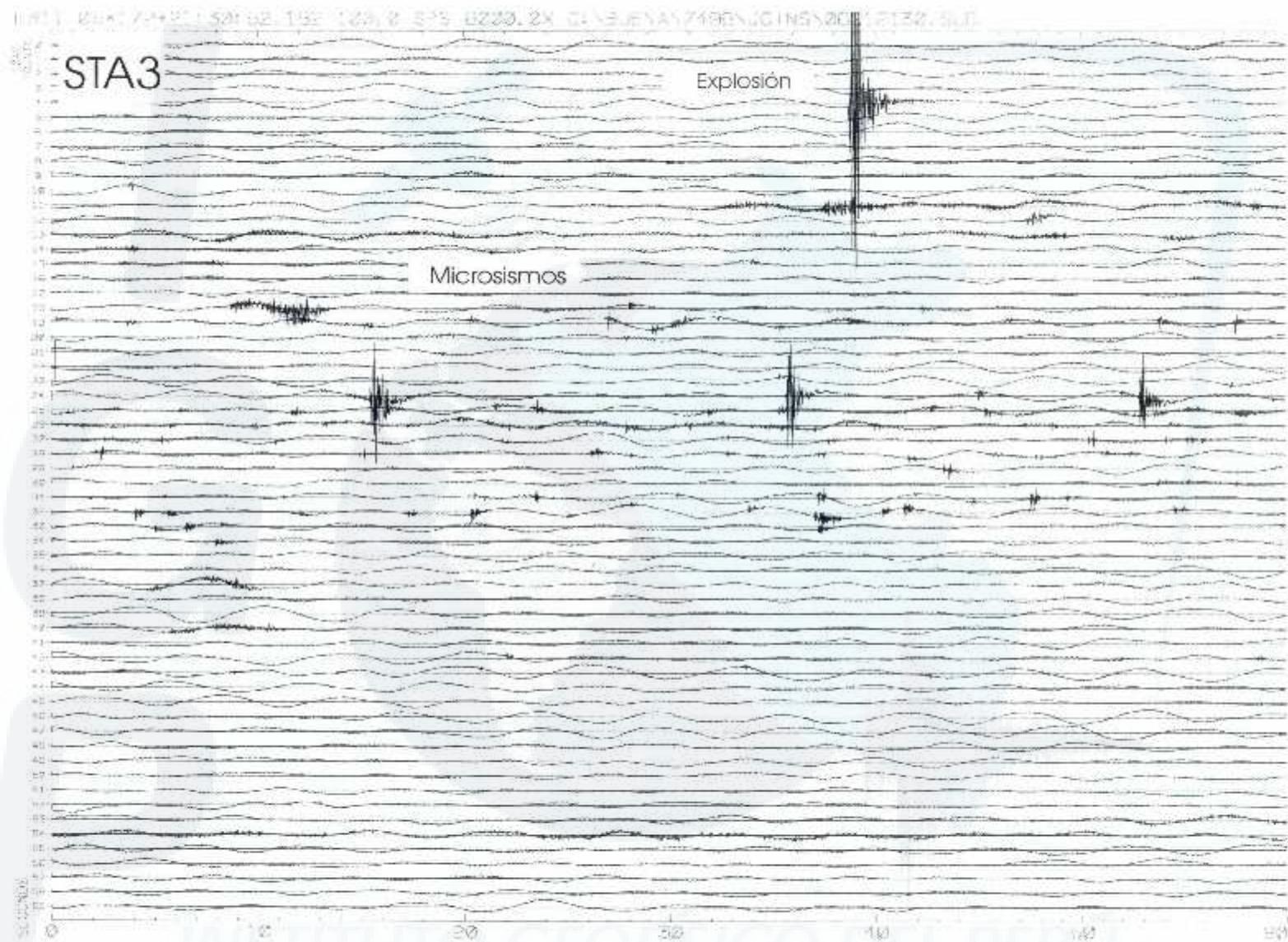


Figura 20. c.) Ejemplo del registro en STA3 de una explosión seguida por un gran número de sismos inducidos por la misma explosión. Esta estación se encuentra próxima de STA1; por lo tanto, registra un mayor número de sismos con relación a STA2. Cada traza tiene una duración de 60 segundos y el sismograma completo, una duración de una hora.

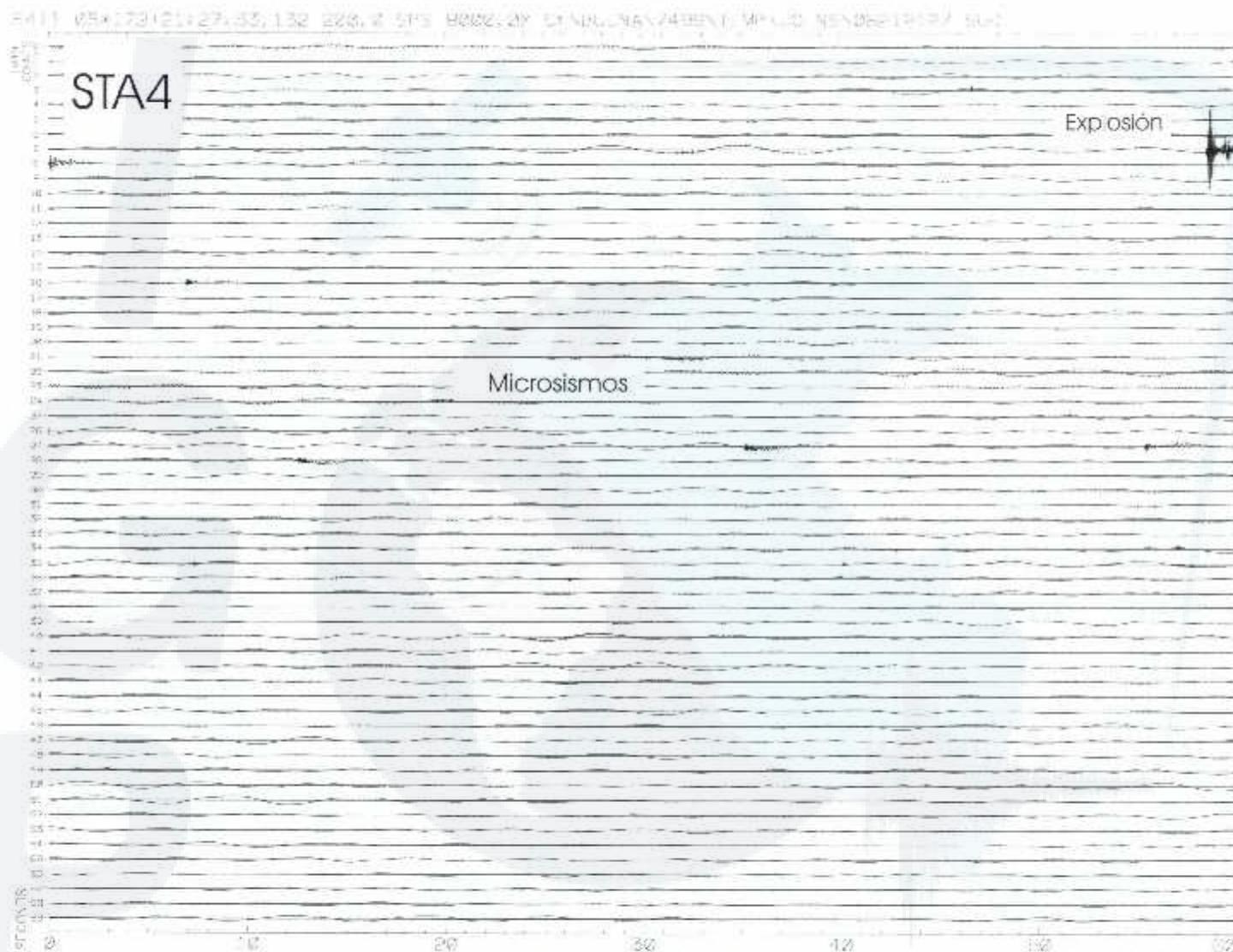
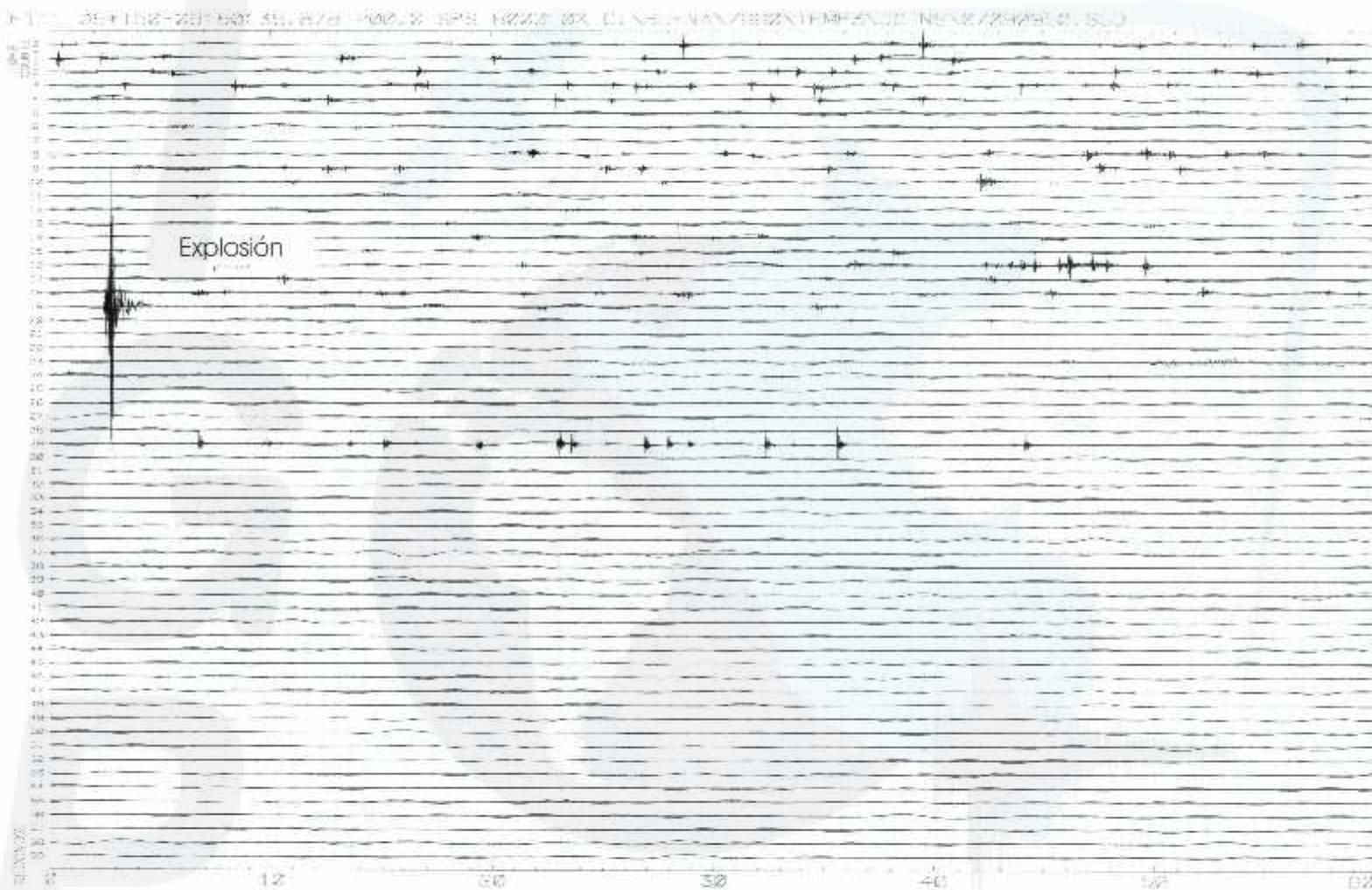


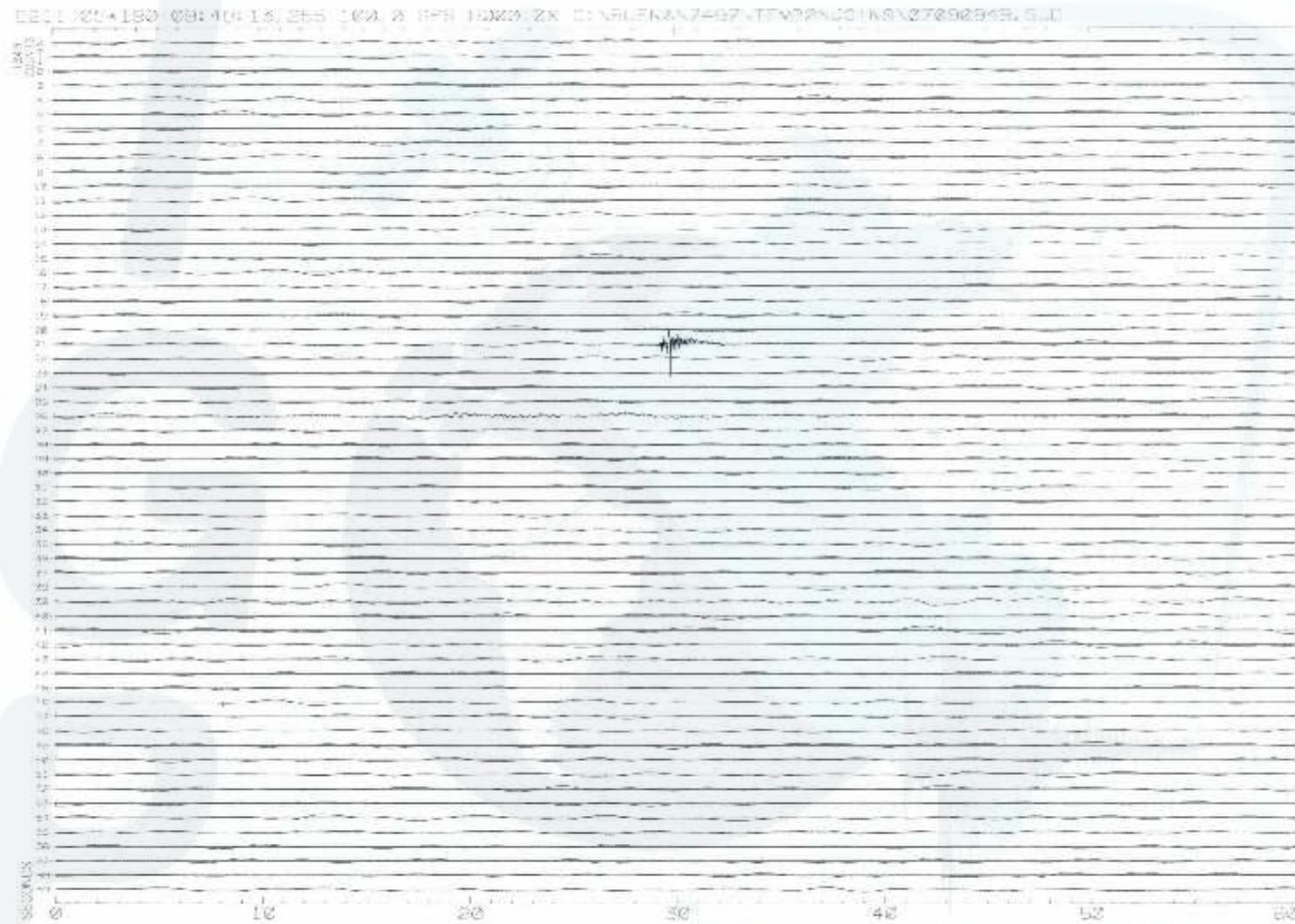
Figura 20. d.) Ejemplo del registro en STA2 de una explosión seguida por un menor número de sismos inducidos por la misma explosión. Esta estación se encuentra mas alejada de STA1 y STA3, y del área de mayor deformación. Cada traza tiene una duración de 60 segundos y el sismograma completo, una duración de una hora.

En la Figura 21 se observa el registro de otra explosión, siendo la amplitud del registro mayor en STA1. Asimismo, en esta misma estación se observa como particularidad el registro de un número importante de microsismicidad previos al registro de la explosión, la cual podría tener su origen en deformaciones asociadas a anteriores explosiones y sugiere que en el área en la cual se producen las explosiones existe un alto grado de deformación. Las otras tres estaciones no registraron la sismicidad inducida por explosiones debido posiblemente a que se encuentran muy alejadas de la fuente de deformación. La Figura 22 muestra similares características, pero en este caso al ser las explosiones de mayor tamaño, la sismicidad inducida por ellas es más notoria en las estaciones STA1 y STA3, tanto en la amplitud de sus registros como en número de microsismos.

De acuerdo a lo observado, se puede deducir que el total de microsismicidad inducida por explosiones se produce en las proximidades de las estaciones STA1 y STA3; es decir, cerca de las fallas Socorro y Uchucchacua, pudiendo corresponder al área en donde se produce la mayor explotación minera dentro de toda la UP Uchucchacua.



**Figura 21. a.)** Ejemplo del registro de sismos inducidos por las labores mineras antes y después de producirse una explosión en la mina. El sismograma corresponde a la estación STA1. Cada traza tiene una duración de 60 segundos y el sismograma contiene información para un periodo de tiempo de una hora.



**Figura 21.** b.) Ejemplo del registro en la STA2 de la explosión mostrada en la Figura 21a. Esta estación al estar mas alejada de STA1 no ha registrado la sismicidad inducida por las explosiones.

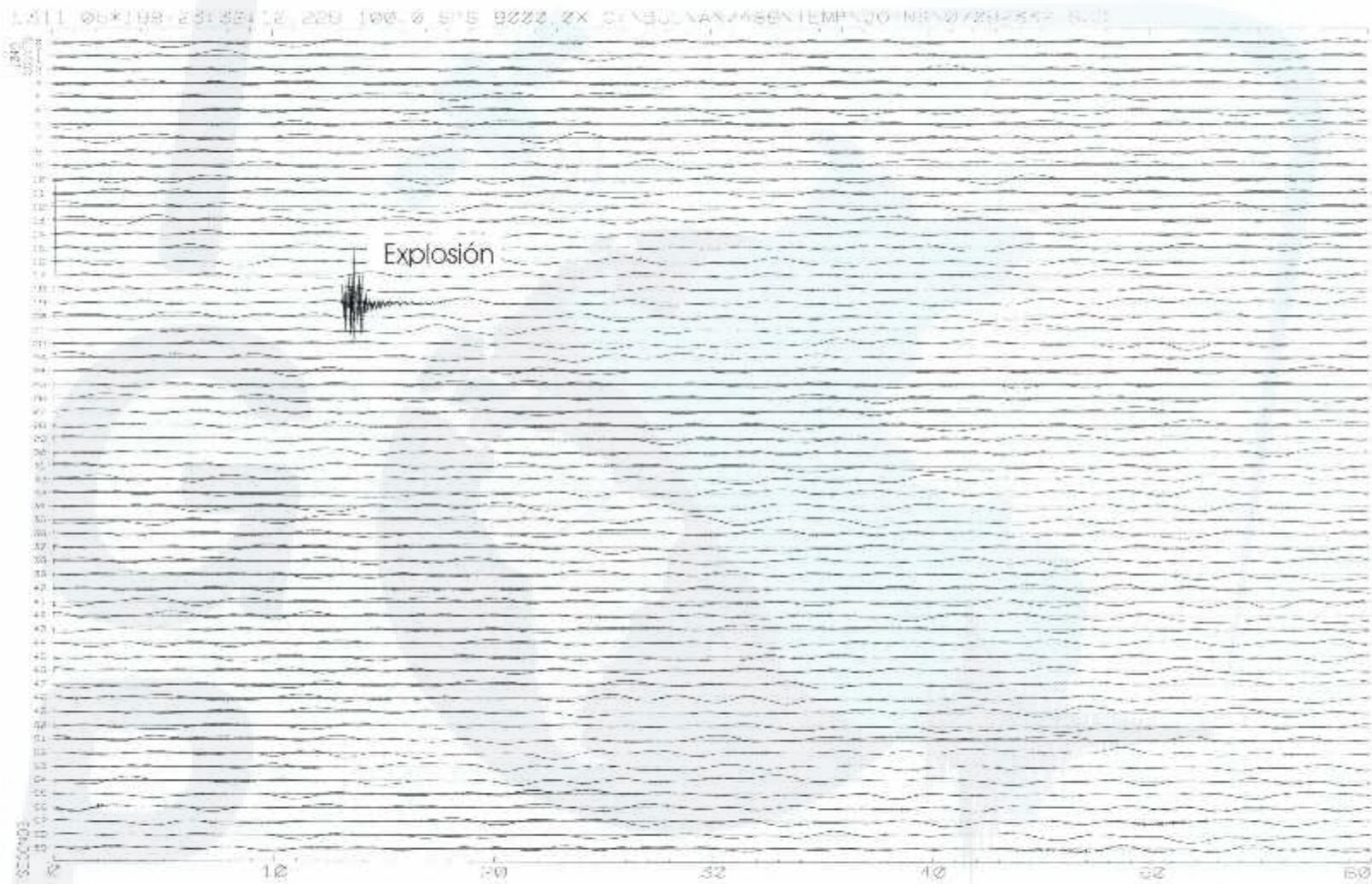


Figura 21. c.) Ejemplo del registro en la STA3 de la explosión mostrada en la Figura 21a. Esta estación al estar mas alejada de STA1 no ha registrado la sismicidad inducida por las explosiones.



**Figura 21. d.)** Ejemplo del registro en la STA4 de la explosión mostrada en la Figura 21a. Esta estación al estar mas alejada de STA1 no ha registrado la sismicidad inducida por las explosiones.

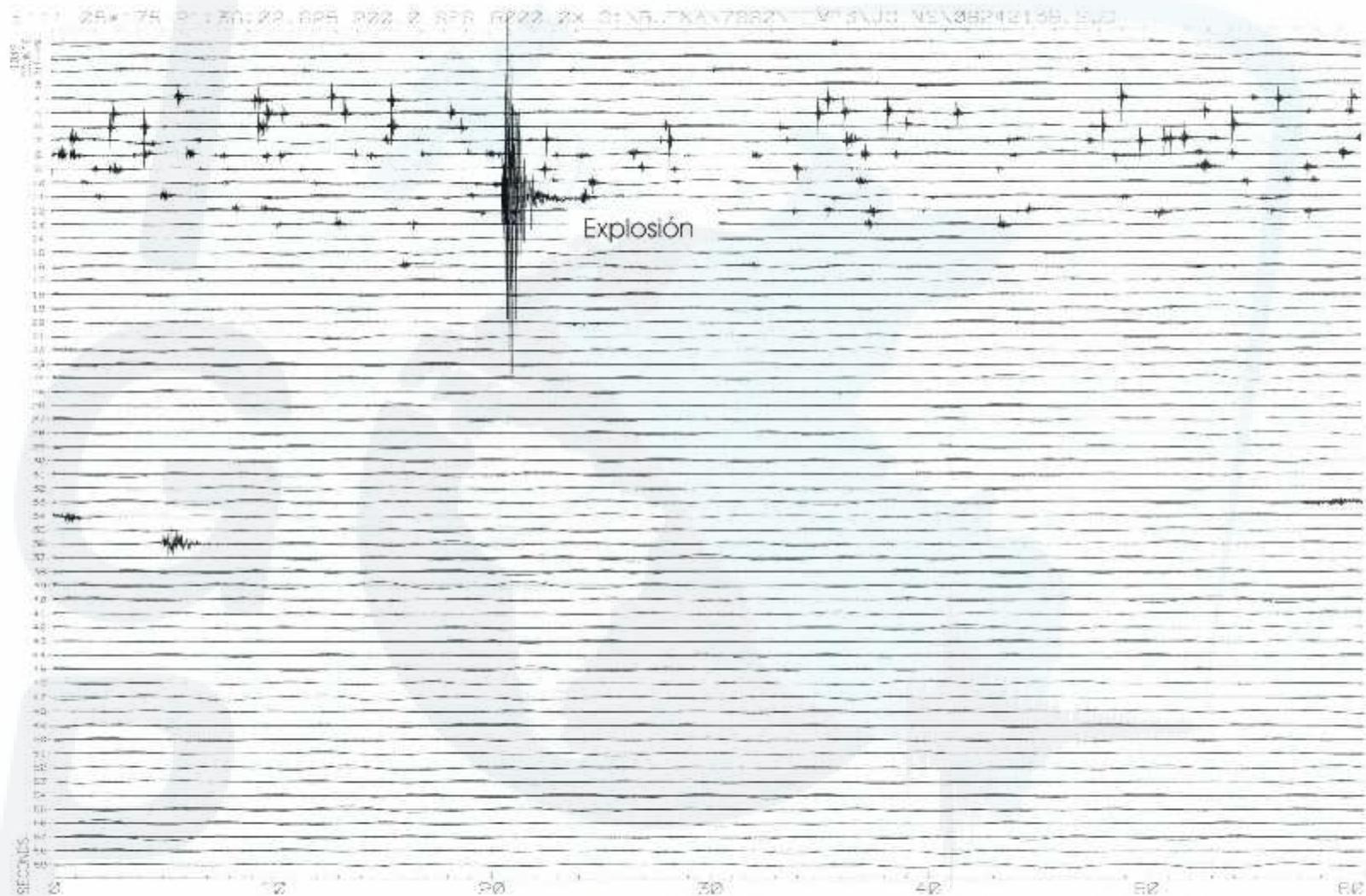


Figura 22. a.) Ejemplo del registro de sismos inducidos por explosiones realizadas en la U. P. Uchucchacua, previos al registro de una explosión mayor. Observese que después del registro de la explosión no se produce sismos inducidos debido probablemente a el área afectada presenta mayor rigidez.

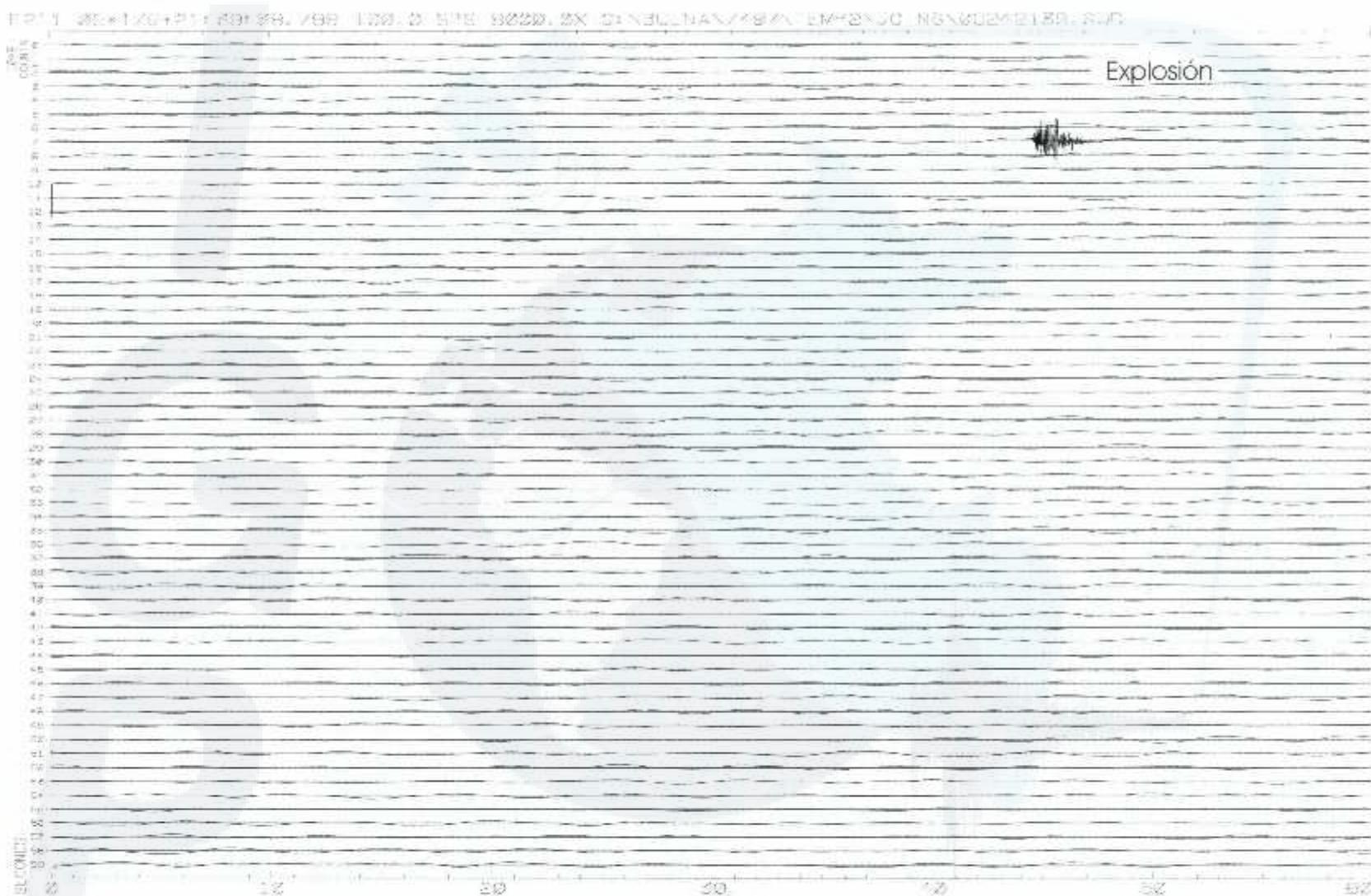
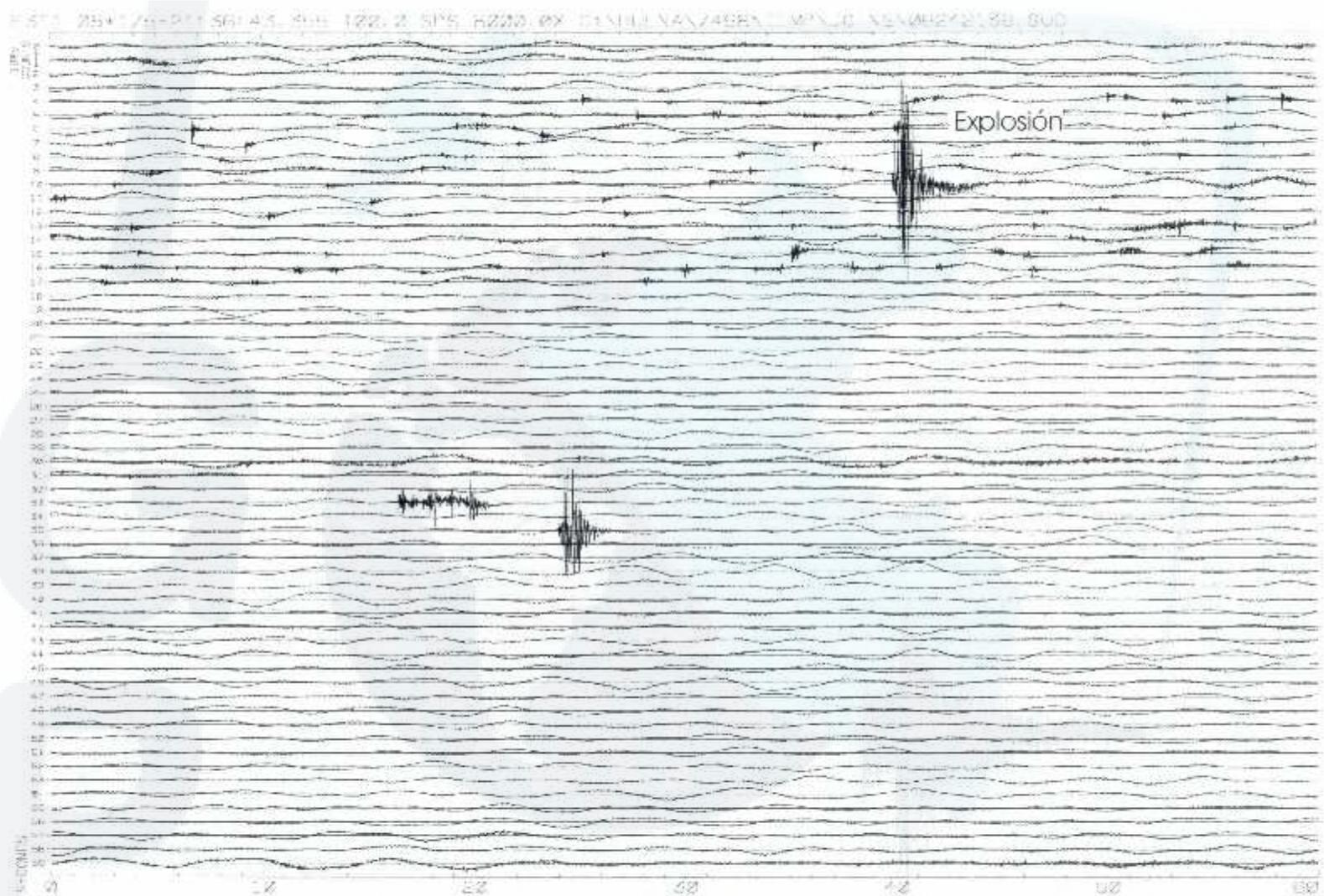


Figura 22. b.) Ejemplo del registro en STA2 de la explosión mostrada en la Figura 22a. Obsérvese que antes y después del registro de la explosión no se producen sismos inducidos debido probablemente a que STA2 está alejada de la STA1 y del área de deformación.



**Figura 22. c.)** Ejemplo del registro de sismos inducidos por explosiones realizadas en la U. P. Uchucchacua, previos al registro de una explosión mayor. Obsérvese que después de la explosión se registra sismos inducidos debido probablemente a el área afectada se encuentra cerca de STA3.

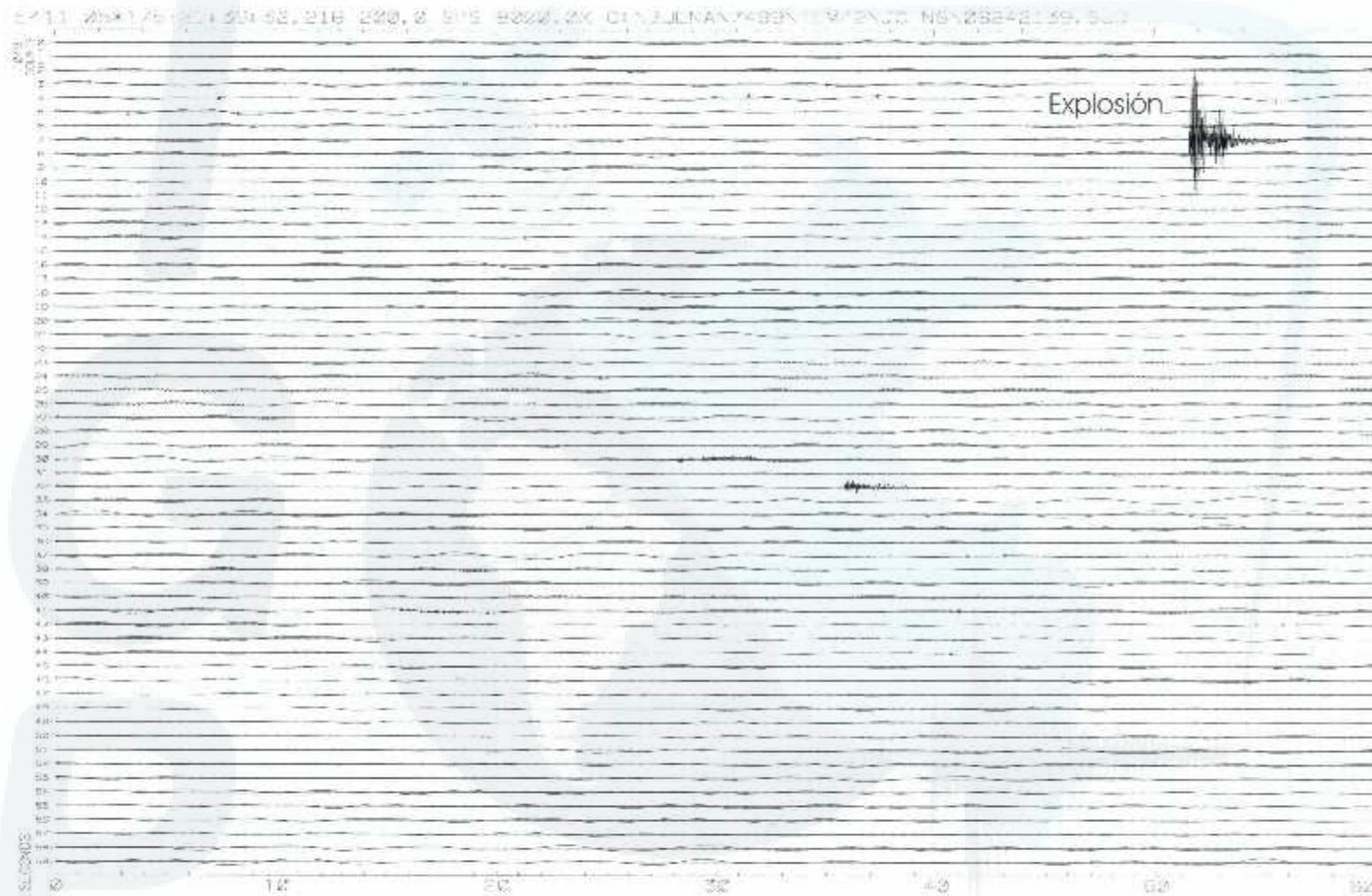


Figura 22. d.) Ejemplo del registro en STA4 de la explosión mostrada en la Figura 22a. Obsérvese que antes y después del registro de la explosión no se registra sismos inducidos debido probablemente a que STA4 esta alejada de STA1 y STA3 o del área de deformación.

## 9.- RESULTADOS

El análisis y evaluación de la actividad sismotectónica de carácter local ocurrida en el área de la U. P. Uchucchacua y registrada por una red sísmica local que funcionó por un periodo de 30 días a partir del 17 de Junio de 2005, ha permitido llegar a los siguientes resultados:

.- Durante todo el periodo de estudio, en el área de la U.P. Uchucchacua la red sísmica local compuesta por 4 estaciones con registro en velocidad, ha registrado eventos sísmicos, explosiones y sismos inducidos por las explosiones, todos ocurridos dentro del área de cobertura de la red.

.- Las explosiones registradas y localizadas hacen un número de 66 y se distribuyen en toda el área de cobertura de la U.P. Uchucchacua, estando el mayor número de ellas en la intercepción de las fallas Uchucchacua y Socorro. El mayor número de explosiones han sido registradas por las estaciones STA1 y STA3, lo cual sugiere que las mismas se realizaban cerca de ambas estaciones; es decir, en las cercanías de las fallas Socorro y Uchucchacua. En general, las explosiones se habrían producido a niveles de profundidad menores a 1 km, y todas presentaron magnitudes menores a 0.6ML. Estos niveles de magnitud son equivalentes a rangos de energía sísmica liberada del orden de  $2.6 \times 10^{10}$  ergios.

.- Considerando el periodo de monitoreo sísmico, es posible que del total de las explosiones realizadas en la U. P. Uchucchacua, algunas hayan sido localizadas en la periferia o fuera del área de mayor actividad minera, lo cual es debido principalmente al tipo de información utilizada para tal fin. Es decir, algunas explosiones han sido registradas de manera nítida en todas las estaciones, lo cual permite identificar correctamente los tiempos de llegada de las

fases y así realizar una buena localización de la explosión. En otros casos, la explosión solo fue registrada por 3 estaciones sísmicas o el registro de alguna de sus fases presentaba amplitudes emergentes, lo cual añade a la localización de la explosión un rango de incertidumbre, que para áreas pequeñas de estudio son representativas. Del mismo modo, este tipo de información ha permitido asignar a un total de siete explosiones, profundidades entre 1 a 3 km, pudiendo estar estos valores sobrestimados.

- Durante el periodo de monitoreo microsismico se ha registrado y localizado un total de 7 sismos tectónicos; es decir, asociados al fracturamiento de la corteza o a la presencia de fallas geológicas. Estos sismos fueron localizados entre las fallas Marion y Sandra, sobre la traza de la falla Cachipampa-Socorro y cerca de la falla Uchucchacua. Los sismos presentaron profundidades hasta de 3 km, magnitudes menores a 0.25ML y habrían liberado energía sísmica del orden de  $1.5 \times 10^{10}$  ergios. Los mecanismos focales elaborados para estos sismos indican que fueron producidos por procesos de ruptura equivalentes a fallas normales con una gran componente de desgarre y planos orientados en las mismas direcciones que el mayor número de fallas existentes en la zona. La orientación de los esfuerzos principales indica que la deformación local se realiza en dirección N-S y E-O, siempre en dirección perpendicular a la orientación de las trazas geológicas identificadas en el campo y en imágenes satélite.

- Sobre la ocurrencia de los sismos tectónicos, es difícil poder indicar su origen; es decir, si es parte de la actividad sísmica normal que se produce en el área de estudio o si la ocurrencia de los mismos es el resultado de las labores mineras que sobrecargan el estado de esfuerzos en el área. En principio, para el área de interés no se conoce el índice de ocurrencia de sismos locales previos al inicio de las labores mineras; por lo tanto, no es posible asignarles directamente un origen tectónico local. En general, es conocido que la deformación en la zona andina es muy lenta y aunque las labores de minado incrementen el estado de los

esfuerzos, la ocurrencia de sismos de magnitudes mayores siempre será esporádica.

.- En las estaciones STA1 y STA3 se ha registrado importante número de sismos inducidos por explosiones, antes y después de producirse las mismas como parte de las labores propias de la mina. El registro de esta sismicidad permite considerar que la fuente que las origina se encontraría cerca a las estaciones antes indicada. Si se considera que el mayor número de explosiones fueron localizadas entre las fallas Uchucchacua y Socorro, la sismicidad inducida por ellas se estaría produciendo en los alrededores de dicha área.

.- Es importante considerar que durante el periodo de monitoreo sísmico, siempre se ha registrado microsismicidad inducida por explosiones inmediatamente después de producirse las mismas y solo en 2 casos se ha registrado sismos inducidos previos a dichas explosiones. En general, es de esperarse que la mayor deformación se produzca en respuesta a las tareas de minado y por lo tanto, dicha deformación se desarrollaría en las áreas circundantes. Sin embargo, es frecuente que la irradiación de la energía puede acumularse en otras áreas que permanecen libres de esfuerzos que al sobrecargarse producen microsismicidad esporádica. Es necesario indicar, que la liberación de energía con la ocurrencia de microsismicidad o de estallidos de roca, esta directamente relacionado a la capacidad de deformación del medio en el cual se propagan las ondas o se acumula la energía.

.- Debido a la geometría de la red sísmica y al número de sensores utilizados, no ha sido posible ubicar los puntos o área en donde se ha concentrado la microsismicidad inducida por las explosiones. Para este tipo de estudios es recomendable utilizar redes densas de monitoreo sísmico; sin embargo, los resultados obtenidos en este estudio sugieren el camino a seguir.

.- Durante el periodo de monitoreo sísmico no se ha registrado la ocurrencia de estallidos de roca.

.- La ocurrencia de importante sismicidad inducida por explosiones puede ser utilizado como indicador de posibles fuentes de deformación que pueda producir en el futuro la ocurrencia de un evento de mayor magnitud o estallido de roca.



## 10.- CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que se desprenden de los resultados obtenidos en el presente estudio son:

- La operatividad de la Red Sísmica Local instalada en la U. P. Uchucchacua durante un periodo de 30 días a partir del 17 de Junio, ha sido óptima ya que ha permitido cumplir con los objetivos del proyecto coordinado entre Minas Buenaventura y el IGP.

- Durante el periodo de monitoreo, se ha registrado y localizado 66 explosiones, habiendo ocurrido el mayor número de ellas cerca de la intersección de las fallas Uchucchacua y Socorro. Las explosiones se habrían realizado a profundidades menores a 1 km y tendrían magnitudes de hasta de 0.6 ML (escala de Richter), equivalentes a niveles de energía sísmica del orden de  $2.6 \times 10^{10}$  ergios. El mayor número de explosiones ha sido registrado por las estaciones STA1 y STA3, lo cual sugiere que se realizaban en sus proximidades.

- Se ha registrado y localizado un total de siete microsismos de carácter tectónico; es decir, asociados a la deformación local. Estos sismos se produjeron entre las fallas Marion y Socorro, y próximos a las fallas Cachipampa, Socorro y Uchucchacua. Los microsismos ocurrieron a profundidades inferiores a 3 km y presentaron magnitudes menores a 0.25 ML equivalentes a rangos de energía sísmica liberada de hasta  $1.5 \times 10^{10}$  ergios. Estos microsismos, aunque en menor número, sugieren que en la zona se desarrollarían procesos lentos de deformación local, las mismas que no pueden confirmarse al no disponerse de mayor información antes y después de iniciarse las labores mineras.

.- Las estaciones STA1 y STA3 han registrado un importante número de sismos inducidos por explosiones inmediatamente después de producirse las mismas en el interior de las minas de la U. P. Uchucchacua; es decir, después de cada explosión, la energía liberada se acumulaba en determinados puntos del área circundante para luego producir fracturamientos a menor escala con el consecuente registro de sismos de pequeñas magnitudes. Estos sismos podrían ser utilizados como indicadores de la posible ocurrencia de otros de mayor magnitud con origen en la misma área de deformación. La sismicidad inducida por explosiones y que han sido registrados antes del registro de algunas explosiones, indicaría que el fracturamiento y los sismos en dichas áreas fue producto de la acumulación de la energía liberada por explosiones previas.

.- En zonas con presencia de diversos sistemas de fallas con diferente longitud y geometría, la ocurrencia de sismos de pequeña magnitud es muy frecuente y ellos, solo pueden ser registrados con redes sísmicas locales. El seguimiento de esta microsismicidad permite establecer patrones de deformación y de acuerdo al número de sismos registrados, conocer la geometría de las fallas e identificar la presencia de nuevas áreas de deformación local que podrían dar origen a sismos de magnitud moderada (del orden de 4.0ML). Dentro de este cuadro, sumado el hecho de que en el área se desarrolla labores mineras, el peligro es mayor debido a que la ocurrencia de sismos de magnitud moderada podría incrementarse en el tiempo. Parte de este peligro lo constituyen los llamados "estallidos de roca" como resultado de la deformación local en áreas circundantes a los puntos en donde se realizan las explosiones. Esta deformación se pone de manifiesto con la generación de sismicidad inducida por las explosiones y que en este estudio se ha registrado en gran número con posible origen en áreas cercanas a los puntos en donde se tenían operativas las estaciones STA1 y STA3.

## 11.- RECOMENDACIONES

La experiencia ha mostrado que cualquier área en donde existen fuentes generadoras de peligros como la presencia de fallas geológicas, es importante establecer patrones de deformación a diferentes escalas. Del mismo modo, desde el punto de vista sísmico, es importante tener conocimiento de los niveles de deformación que produce la actividad microsísmica y la que se produce por la ocurrencia de sismos de magnitud moderada. El seguimiento de esta sismicidad permitirá conocer la geometría de las diversas fuentes de deformación o fallas, identificar el sismo de mayor magnitud que pudiera ocurrir y conocer o identificar las áreas que podrían ser afectadas en el futuro por un nuevo sismo. La U.P. Uchucchacua presenta estas características; por lo tanto, es esencial que se realice un monitoreo continuo de la sismicidad utilizando una red sísmica local compuesta de al menos 3 estaciones si se desea monitorear fallas activas y un número mayor para monitorear áreas pequeñas de deformación que podrían no estar asociadas a fallas.

De acuerdo a las características tectónicas del área de la U.P. Uchucchacua, el desarrollo de actividades mineras a diferentes escalas solo incrementan la vulnerabilidad del área; es decir, se incrementan o se generan nuevos peligros que pueden dar origen a otros de mayor magnitud. Este es el caso de los estallidos de roca que posiblemente pueden ser seguidos a partir del monitoreo continuo y del análisis detallado de la sismicidad inducida por explosiones que se produce antes, durante y después de las mismas como parte de las tareas mineras. En tal sentido, surge nuevamente la necesidad de mantener operativa de manera ininterrumpida una red sísmica local para obtener mayor información sobre la ocurrencia de microsismos, explosiones, sismicidad

inducida y estallidos de roca, y así conocer los patrones de deformación netamente local que se producen en el área de estudio.

En la actualidad existen sistemas sofisticados para el monitoreo de estallidos de rocas o de fenómenos que permitan identificar puntos críticos en los cuales se podría producir el estallido. De estos sistemas, el más utilizado considera una red de sensores dispuestos en malla con dimensiones coherentes a las del área de estudio y cuya información en tiempo real, permite localizar la actividad microsísmica de manera automática utilizando algoritmos adecuados. Los mismos resultados podrían tenerse con menor número de sensores pero utilizando redes sísmicas compuestas por sistemas de telemetría que concentren la información en una central de registro y con el apoyo de un profesional, proceder a localizar los sismos. Sin embargo, creemos necesario que antes de tomar una decisión por cualquiera de estas dos opciones, se desarrolle un monitoreo en situ o telemetría por el periodo de un año, siendo este suficiente para tener una mayor posibilidad de registrar un numero considerable de sismos que permitan tener un mejor conocimiento de la deformación local presente en el área de estudio.

## BIBLIOGRAFIA

- Barazangi, M. y Isacks, B. (1976). Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America. *Geology*, 4, 686-692.
- Bernal I. (2002). Aproximación a un modelo detallado para la sismicidad y energía sísmica liberada en el Perú. Tesis de Ing. UNSA, Arequipa, 200p.
- Bonnot, D. (1988). Evolution géodynamique Plio-Quaternaire du bassin intra-cordillerain du Callejon de Huaylas et de la région de la Cordillera Blanca, Perou. *Geodynamique*, 3, 57-83.
- Brillinger, D., Udias, A. y Bolt, B. (1980). A probability model for regional focal mechanism solutions. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 70, 1479-1485.
- Cahill, T. y Isacks, B. (1992). Seismicity and shape of the subductec Nazca Plate. *J. Geophys. Res.*, 97, 17503-17529.
- Dalmayrac, B., Laubacher, G. y Marocco, R. (1981). Geologie des Andes peruvienes. Caracteres generux d'évolution geologique des Andes peruvienes. *Trav. Doc. ORSTOM*, 96, 217 p.
- DeMets, C., Gordon, R. y Argus, A. (1990). Current plate motion. *Geophys. J. Int.* 101, 425-478.
- Deverchere, J., Dorbath, L. y Dorbath, C. (1989). Extension related to a high topography: results from a microearthquake survey of the Andes of Peru and tectonics implications. *Geophys. J. Int.*, 98, 281-292.
- Dorbath, L. y Cisternas, A. (1990). Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Peru. *Bull. Seism. Soc. Am.* 80, 551-576.
- Dorbath, L., Dorbath, C. y Cisternas, A. (1991). Seismicity and tectonic deformation in the Eastern Cordillera and the sub-andean zone of central Perú. *Jour. South. Amer. Sci.*, V4, 13-24.
- Dorbath, L., Dorbath, C. y Cisternas, A. (1986). On crustal seismicity deformation of the amazonian foothill of the central peruviann andes. *Geophys. Res. Lett.*, 13, 1023-1026.

- Grange, (1984). Etude sismotectonique detaille de la subduction lithospherique au sud Perou. Tesis Doctoral, IRIGM, Grenoble, Francia.
- Hasegawa, A. y Sacks, S. (1981). Subduction of the Nazca plate beneath Peru as determined from seismic observations. *J. Geophys. Res.* 86, 4971 – 4980.
- James, D. (1971). Andean crustal and upper mantle structure. *J. Geophys. Res.* 76, 3246-3271.
- Klein, F. (1978). Hypocenter location program Hypoinverse., U.S. Geological Survey, Open File Report., 78-694.
- Lermo y Bernal (2004). Evaluación de la actividad sísmica en la zona geotermal de Ocozulco, México. Instituto de Ingeniería UNAM.
- Lindo, R. (1993). Seismotectonique des Andes du Perou Central: Apport des donnees seismologiques de haute precision. These de Doctorat, Univ. Louis Pasteur de Strasbourg., 98 pp.
- Marocco, R. (1980). Géologie des Andes péruviennes: Un segment E-W de la chaîne des Andes péruviennes: la déflexion d'Abancay. Etude géologique de la Cordillère Orientale et des Hauts Plateaux entre Cuzco et San Miguel. Sud du Pérou. Doc. Orstom 94. Megard, F. (1978). Etude geologique des Andes du Perou central. *Men . ORSTOM*, 86, 310p.
- Megard, F. (1978). Etude geologique des Andes du Perou Central. *Memoires ORSTOM N°86*, 310 p.
- Norabuena, E., Dixon, T., Stein, S. y Harrison, C. (1999). Decelerating Nazca\_South American and Nazca\_Pacific plate motions. *Geophys. Res. Lett.*, 26, 3405-3408.
- Ocola, L. Meyer, R. y Aldrich, L. (1971). Gross crustal structure under Bolivian Altiplano. *Earthquake Notes*, 42, 33-48.
- Regalado, D. (2005) Como viene enfrentando Mina Uchucchacua probelmas de altos Esfuerzos con ocurrencia de Estallidos de Roca. Informe Interno, U.P. Uchucchacua, Minas Buenaventura S.S.A., 15 pg.
- Richter, F. (1958). *Elementary Seismology*. San Francisco, W.H. Freeman and Co., 339-374.
- Schenider, J. y Sacks, S. (1987). Stress in the contorted Nazca plate beneath southern Peru from local earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 92, 13887-13902.
- Sebrier, M., Mercier, J., Megard, F. y Laubacher, G. (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 131p.
- Stauder, W. (1975). Subduction of the Nazca under Peru as evidenced by focal mechanisms and by seismicity. *J. Geophys. Res.*, 80, 1053-1064.
- Suárez, G., Molnar, P. y Burchfiel, C. (1983). Seismicity, fault plane solutions, depth of faulting and active tectonics of the Andes of Peru, Ecuador and southern Colombia. *J. Geophys. Res.*, 88, 10403-10428.
- Suarez, G., Gagnepain, J., Cisternas, A., Hatzfeld, D., Molnar, P., Roecker, S., y Viodé, J. (1990). Tectonics deformation of the Andes and the configuration of the subducted slab in central Peru: result from a microseism experiment. *Geophys. J. Int.* 103, 1-12
- Tavera, H., Buforn, E. (1998). Sismicidad y sismotectónica de Perú. *Revista Física de la Tierra*, N°10, 187-219.
- Tavera, H., y Bernal, I. (2001). Evaluación de la vulnerabilidad de la presa de Antacoto y zona de Marcapomacocha a partir del monitoreo de la actividad sísmica local. Informe Final, IGP-Sedapal, 110p.
- Tavera, H., y Buforn, E. (2001) Source mechanics of earthquakes in Peru. *Journal of Seismology*, 5,4, 519-540.
- Tavera, H. (2000). Actividad Sísmica en la Cuenca del Mantaro, Tablachaca-Mantaro. Informe Anual 1999. Convenio Electroperu-IGP.

## ANEXO 1

Parámetros Hipocentrales de los sismos locales registrados por la Red Sísmica Temporal de la U.P. Uchucchacua – Minas Buenaventura

- Año/me/di = Año, mes y día de ocurrido el sismo  
hh:mm:ss = Hora, minuto y segundo (Tiempo Origen)  
Prof. = Profundidad del foco en km.  
 $M_L$  = Magnitud local – Duración del registro del sismo  
E = Energía Sísmica  $\times 10^{10}$  ergios.

Fecha Año/me/di	T. Origen hh:mm:ss	Latitud Grados	Longitud ± km	Prof. km	Mag M <sub>L</sub>	Z
05/06/20	04:08:18.71	-10.6067±2.7	-76.6748±2.7	0.8±0.3	0.19	1.29
05/06/20	07:43:54.76	-10.6212±2.5	-76.6685±2.5	3.1±0.9	0.04	0.97
05/07/05	08:35:13.92	-10.6207±1.9	-76.6712±1.9	1.3±0.1	0.07	1.03
05/07/05	13:08:13.81	-10.6005±1.1	-76.6703±2.1	0.9±0.1	0.09	1.07
05/07/10	02:39:42.00	-10.6195±2.7	-76.6882±1.7	0.1±0.1	0.06	1.01
05/07/11	14:44:08.70	-10.6175±1.4	-76.6687±2.4	3.1±0.1	0.25	1.44
05/07/12	09:29:48.56	-10.6182±2.6	-76.6752±2.6	3.5±1.2	0.08	10.5



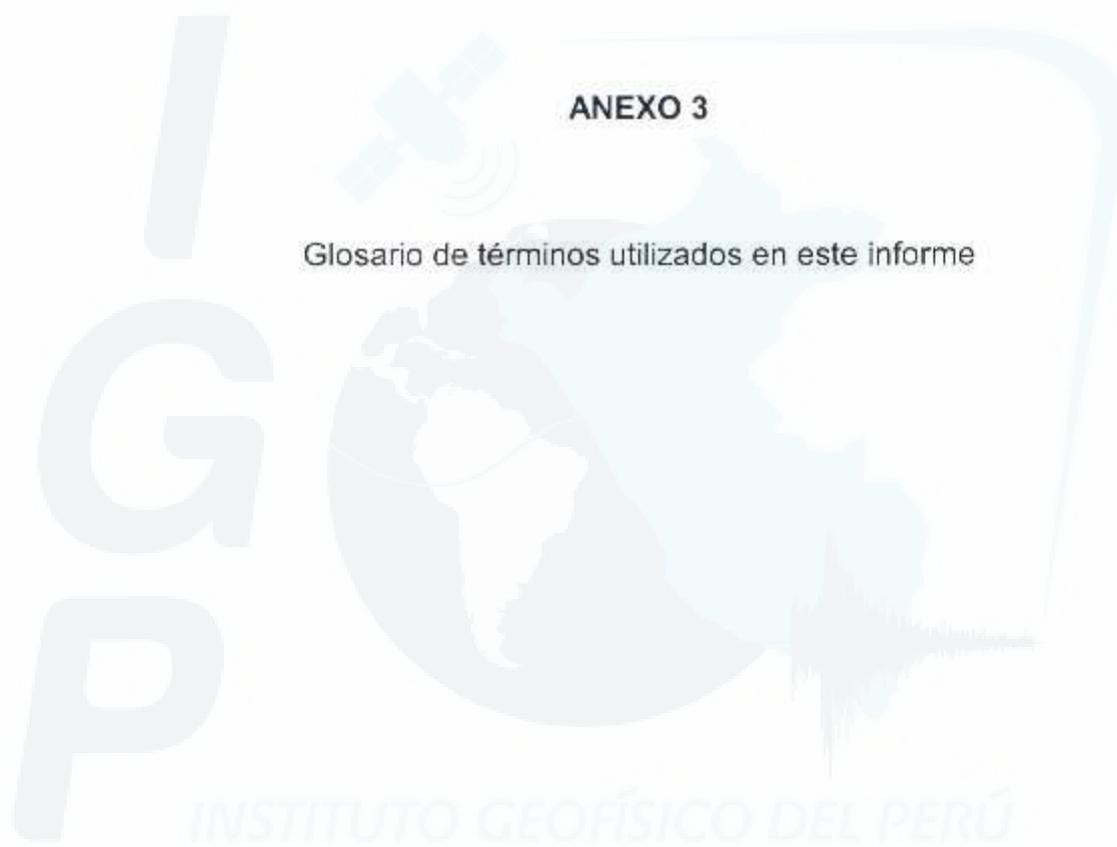
## ANEXO 2

Parámetros Hipocentrales de las explosiones registradas por la Red Sísmica Temporal de la U.P. Uchucchacua – Minas Buenaventura

- Año/me/di = Año, mes y día de ocurrido el sismo
- hh:mm:ss = Hora, minuto y segundo (Tiempo Origen)
- Prof. = Profundidad del foco en km.
- $M_L$  = Magnitud local – Duración del registro del sismo
- E = Energía Sísmica  $\times 10^{10}$  ergios.

Fecha Año/me/dí	T.Origen hh:mm:ss	Latitud Grados	Longitud ± km	Prof. km	Mag M <sub>L</sub>	E
05/06/18	21:25:57.70	-10.6173±2.2	-76.6843±2.2	0.1±0.1	0.02	0.94
05/06/18	21:27:16.51	-10.6102±2.2	-76.6750±2.2	0.8±0.3	0.01	0.92
05/06/18	21:42:28.22	-10.6172±1.8	-76.6840±0.8	0.1±0.1	0.22	1.37
05/06/18	21:47:56.69	-10.6117±2.2	-76.6745±1.2	0.8±0.2	0.03	0.95
05/06/19	9:50: 1.48	-10.6148±1.1	-76.6775±1.1	0.4±0.2	0.61	2.71
05/06/19	21:54:10.59	-10.6157±1.2	-76.6847±0.2	0.1±0.1	0.05	0.99
05/06/20	7:43:54.76	-10.6212±1.5	-76.6685±0.5	3.1±0.9	0.04	0.97
05/06/20	21:38:39.59	-10.6102±3.0	-76.6765±3.0	0.8±0.3	0.23	1.39
05/06/20	21:55:39.41	-10.6113±2.5	-76.6780±2.5	0.8±0.8	0.09	1.07
05/06/20	21:57:29.06	-10.6172±2.1	-76.6843±1.1	0.1±0.9	0.07	1.03
05/06/21	21:35:28.19	-10.6170±1.2	-76.6838±2.2	0.1±0.8	0.03	0.95
05/06/21	21:43:35.79	-10.6257±2.0	-76.6832±2.0	0.6±0.4	0.02	0.94
05/06/22	9:42:59.30	-10.6158±2.7	-76.6757±2.7	0.4±0.2	0.52	0.23
05/06/22	21:58: 6.49	-10.6130±1.2	-76.6722±1.2	2.9±0.8	0.04	0.97
05/06/22	21:58:33.26	-10.6150±2.8	-76.6745±0.8	0.8±0.6	0.05	0.99
05/06/23	2: 5:22.00	-10.6185±2.7	-76.6772±2.7	0.4±0.2	0.08	1.05
05/06/23	10:10:58.59	-10.6100±0.2	-76.6732±0.2	0.9±0.7	0.09	1.07
05/06/23	21:58: 4.60	-10.6048±1.7	-76.6795±1.7	0.0±0.9	0.06	1.01
05/06/24	21:34:15.54	-10.6167±3.0	-76.6802±3.0	0.0±0.9	0.27	1.50
05/06/24	21:35:21.22	-10.6170±1.6	-76.6842±2.6	0.1±0.8	0.41	1.92
05/06/24	21:47:20.38	-10.6167±1.2	-76.6847±1.2	0.0±0.9	0.03	0.95
05/06/24	22: 9:58.02	-10.6083±2.6	-76.6810±1.6	0.1±0.2	0.05	0.99
05/06/24	22:12: 3.65	-10.6152±2.4	-76.6772±2.4	0.4±0.1	0.08	1.05
05/06/25	3:50:35.63	-10.6105±2.5	-76.6765±2.5	0.8±0.0	0.07	1.03
05/06/25	10: 1:38.59	-10.6105±1.5	-76.6780±0.5	0.8±0.9	0.08	1.05
05/06/25	21:42:16.11	-10.6198±0.8	-76.6692±1.8	3.0±1.1	0.03	0.99
05/06/25	21:43:34.46	-10.6050±1.3	-76.6742±2.3	0.8±0.2	0.05	1.99
05/06/25	22: 5:15.97	-10.6150±1.2	-76.6775±2.2	0.4±0.2	0.32	1.64
05/06/26	9:28:42.54	-10.6107±0.7	-76.6793±1.7	1.2±0.6	0.09	1.07
05/06/26	9:39:28.44	-10.6215±2.0	-76.6798±1.0	0.3±0.4	0.07	1.03
05/06/26	10:19:11.10	-10.6095±1.0	-76.6788±1.0	1.3±0.1	0.05	0.99
05/06/27	22:22:21.06	-10.6192±2.4	-76.6763±2.4	0.5±0.3	0.03	0.95
05/06/28	9:46:22.12	-10.6215±0.5	-76.6842±2.5	0.3±0.2	0.07	1.03
05/06/28	9:47:26.07	-10.6112±2.8	-76.6838±0.8	0.0±0.1	0.09	1.07
05/06/28	10:19:30.06	-10.6142±0.3	-76.6800±0.3	1.8±0.6	0.03	0.95
05/06/29	9:58:15.14	-10.6105±1.4	-76.6777±1.4	0.8±0.2	0.42	1.96
05/06/29	10:56:19.66	-10.6043±2.5	-76.6792±2.5	1.9±0.2	0.08	1.05

Fecha Año/me/di	T.Origen hh:mm:ss	Latitud Grados	Longitud ± km	Prof. km	Mag M <sub>L</sub>	E
05/06/29	21:55:34.27	-10.6222±2.6	-76.6848±1.6	0.3±0.8	0.09	1.07
05/06/30	9: 3:11.01	-10.6177±2.4	-76.6858±2.4	0.1±0.2	0.07	1.03
05/06/30	10: 1:21.51	-10.6120±0.7	-76.6785±1.7	0.7±0.9	0.05	0.99
05/06/30	22:14:30.36	10.6060±0.9	-76.6747±0.9	1.3±0.6	0.08	1.05
05/07/01	9:48: 6.54	-10.6170±2.1	-76.6752±2.1	0.8±0.3	0.07	1.03
05/07/02	9:37:43.84	-10.6165±1.7	-76.6845±2.7	0.1±0.8	0.06	1.01
05/07/02	21:28: 7.57	-10.6158±1.4	-76.6855±1.4	0.0±0.1	0.08	1.05
05/07/03	9:44:34.07	-10.6057±1.6	-76.6765±1.6	0.4±0.2	0.09	1.07
05/07/04	21:49:18.50	-10.6297±2.1	-76.6808±2.1	0.9±0.1	0.08	1.05
05/07/04	22: 3: 1.84	-10.6043±2.0	-76.6807±2.0	0.0±0.1	0.09	1.07
05/07/05	2: 4:44.61	-10.6170±2.1	-76.6848±1.1	0.1±0.9	0.22	1.37
05/07/05	8:35:13.92	-10.6207±1.9	-76.6712±1.9	1.3±0.1	0.07	1.03
05/07/05	10:16:46.58	-10.6052±2.2	-76.6812±1.2	0.1±0.8	0.24	1.42
05/07/05	21:53:30.06	-10.6172±0.2	-76.6742±2.2	0.8±0.7	0.08	1.05
05/07/06	9:57:10.98	-10.6180±2.3	-76.6710±2.3	0.6±0.5	0.07	1.03
05/07/06	10: 5:46.25	-10.6073±1.9	-76.6743±1.9	3.8±0.2	0.06	1.01
05/07/06	22: 3:37.37	-10.6172±1.1	-76.6843±2.1	0.1±0.9	0.28	1.52
05/07/07	9:56:58.67	-10.6175±2.4	-76.6860±2.4	0.1±0.0	0.09	1.07
05/07/07	10: 4:38.66	-10.6177±2.1	-76.6850±2.1	0.1±0.7	0.07	1.03
05/07/07	21:38: 8.81	-10.6152±1.0	-76.6833±2.0	2.5±0.9	0.04	0.97
05/07/07	22: 3: 2.97	-10.6143±2.7	-76.6857±1.7	1.7±0.8	0.07	1.03
05/07/08	9:59: 2.43	-10.6242±1.0	-76.6830±1.0	0.2±0.4	0.05	0.99
05/07/08	21:30:43.25	-10.6102±2.8	-76.6742±1.8	0.5±0.5	0.09	1.07
05/07/08	21:32:52.83	-10.6205±1.0	-76.6825±2.0	2.3±0.2	0.06	1.01
05/07/08	23:51:22.54	-10.6168±1.2	-76.6838±2.2	0.1±0.2	0.04	0.97
05/07/09	10: 9:39.49	-10.6177±1.9	-76.6860±2.9	0.1±0.5	0.08	1.05
05/07/09	21:33: 9.40	-10.6257±2.9	-76.6820±0.9	0.5±0.2	0.09	1.07
05/07/10	2:39:42.00	-10.6195±1.7	-76.6882±0.7	0.1±0.1	0.06	1.01
05/07/10	9:56:25.86	-10.6123±0.3	-76.6762±0.3	3.0±0.7	0.06	1.01



### ANEXO 3

Glosario de términos utilizados en este informe

**Atenuation** (*attenuation*): Disipación de la energía sísmica liberada por un sismo con la distancia desde la fuente sísmica.

**Azimut de Estación** (*Azimuth*): Angulo que forma un vector desde el epicentro del sismo a la estación. Este es medido en el sentido horario a partir del norte geofísico.

**Azimut de Falla** (*Strike*): Angulo que forma la traza de una falla en la superficie con el norte geográfico y puede variar entre 0° a 360° en el sentido horario.

**Benioff, zona de** (*Benioff zone*): Se llama a una zona estrecha definida por la distribución en profundidad de los focos de los terremotos y que al descender desde la superficie bajo la corteza terrestre lo hace con ángulos que varían entre 30° y 80°. Característica propia de los arcos insulares y fue observada por vez primera por el sismólogo Hugo Benioff. En el caso del Perú, este ángulo varía entre 20° y 30°.

**Buzamiento** (*Dip*): Angulo de máxima inclinación que forma el plano de falla con la horizontal.

**Campo Cercano** (*Near field*): Área alrededor de una fuente sísmica delimitada por una distancia, desde la falla comparable con la dimensión máxima de ruptura.

**Campo Lejano** (*Far field*): Área alejada de la fuente sísmica a tal distancia que se puede considerar a la fuente como un punto.

**Ciclo Sísmico** (*Seismic cycle*): Define el periodo de tiempo entre la ocurrencia de terremotos sucesivos en una fuente sismogénica (falla) y los procesos físicos que generan estos terremotos.

**Cobertura Azimutal**: Término utilizado frecuentemente para definir la distribución espacial de las estaciones que componen un red sísmica local. Las características de su distribución alrededor del área de estudio influyen en los errores a obtenerse en el cálculo de los parámetros de los sismos.

**Convergencia de Placas** (*Plate convergence*): Define al proceso mediante el cual dos placas colisionan produciendo la deformación en ambos bordes. En el caso de la convergencia de una placa oceánica y otra continental, la primera se introduce por debajo de la segunda dando origen al proceso de subducción.

**Corteza** (*Crust*): Parte de la Tierra por encima de la discontinuidad de Mohorovicic. Es menos densa que el manto y en general, presenta espesores de 10 km en el fondo oceánico, de 30 km en zonas continentales estables y de 70 km en zonas de cordillera como la Cordillera Andina en Sudamérica.

**Deformación** (*Strain*): Son los cambios habidos en tamaño y forma en una determinada área debido a fuerzas de presión o tensión.

**Deslizamiento de Falla** (*Fault slip*): Se denomina al movimiento relativo entre las dos caras de una falla geológica.

**Distancia Epicentral** (*Epicentral distance*): Define la longitud del círculo máximo entre el epicentro y una estación de registro, medida en grados o km. (1°= 111.11 km.).

**Enjambre (Swarm):** Se denomina a la serie de muchos sismos pequeños que ocurren en una determinada área y en un periodo corto de tiempo con la característica de que no ocurre un sismo principal o de magnitud mayor.

**Epicentro (Epicentre):** Define el punto sobre la superficie de la tierra, directamente por encima del foco de un terremoto.

**Esfuerzos Locales (Local stress):** Define a las fuerzas que actúan en una determinada área produciendo la deformación de la misma en tamaño y forma.

**Estación (Station):** Punto en la cual se ubica un instrumento para registrar sismos, sea sismógrafo o acelerógrafo.

**Estallido de Roca (Rockburts).** Proceso por el cual la roca que se encuentra sometida a esfuerzos explota al sobrepasar su límite de resistencia. Proceso común en zonas de explotación minera en la cual se requiere realizar explosiones de dinamita para su desarrollo.

**Falla Activa (Active fault):** Define a una fractura geológica a lo largo de la cual se ha producido un desplazamiento de dos bloques adyacentes en tiempos históricos o donde se han localizado focos de terremotos. El desplazamiento puede ser de milímetros a centenas de kilómetros. Una falla activa, desde el punto de vista geológico, es aquella en la cual ha ocurrido un desplazamiento en los últimos 2 millones de años o en la cual se observa actividad sísmica.

**Falla Inactiva (Inactive fault):** Falla geológica a lo largo de la cual no hay indicios de deslizamiento en tiempos históricos y ningún foco ha sido localizado en ella.

**Falla Inversa (Thrust fault):** Fractura geológica en la cual uno de los bloques se ha movido hacia arriba con respecto al otro bloque. Este tipo de falla debe su origen a la presencia de fuerzas compresivas que actúan perpendiculares a la traza de falla (falla de cabalgamiento).

**Falla Normal (Normal fault):** Fractura geológica en la cual uno de los bloques se ha movido hacia abajo con respecto al otro bloque. Este tipo de falla debe su origen a la presencia de fuerzas extensivas que actúan perpendicular a la traza de falla.

**Fase Sísmica (Earthquake phase):** Diferentes tipos de ondas sísmicas registradas en una estación sísmica. Ondas sísmicas que han recorrido trayectos diferentes dentro de la Tierra, debido a la refracción y a la reflexión de las mismas. En el campo cercano, las fases principales son la P y S.

**Foco o Hipocentro (Focus, Hypocenter):** Punto en el interior de la Tierra en donde se produce el terremoto o desde el cual se produce la liberación de energía.

**Fosa Oceánica (Ocean trench).-** Trinchera en el suelo oceánico en una zona de subducción donde la corteza oceánica desciende por debajo de la corteza continental. Por ejemplo la Fosa Peruano-Chilena.

**Intensidad (Intensity):** Medida cualitativa del tamaño de un terremoto expresado en números romanos. La escala más frecuentemente utilizada es la de Mercalli Modificada, la misma que permite medir en diferentes grados el tipo de daño causado por el terremoto en el medio natural, viviendas y comportamiento de las personas y animales.

**Isosista (Isoleisma):** Curvas en un mapa que muestran los lugares en los cuales se ha observado igual nivel de intensidad.

**Límite de Placa (Plate boundary):** Línea de contacto entre dos placas. Los límites de placa son marcados principalmente por la actividad sísmica.

**Magnitud (Magnitude):** Medida cuantitativa del tamaño de los sismos en base de la amplitud máxima del registro del sismo medido en una estación sísmica estándar. Esta medida puede realizarse en varias escalas dependiendo del tipo de señal utilizada y de la distancia a la cual se registra el sismo. En general, esta medida tiene relación con la cantidad de energía liberada en forma de ondas sísmicas.

**Magnitud Local (Local magnitude):** Magnitud ML obtenida a partir de la medida de la amplitud de la señal en registros de periodo corto de sismos ocurridos a distancias locales. Por lo general hasta distancias de 1000 km. Esta magnitud es mayormente conocida como "magnitud Richter".

**Magnitud de Ondas de Volumen (mb magnitude):** Magnitud mb obtenida a partir de la medida de la amplitud y periodo de ondas P y S registrados en estaciones de periodo corto de la red mundial WWSSN. Medida válida para sismos ocurridos a distancias mayores a 5 grados como mínimo.

**Magnitud de Ondas Superficiales (Ms magnitude):** Magnitud Ms obtenida a partir de la medida de la amplitud y periodo de ondas Rayleigh registrados en estaciones de periodo largo de la red mundial. Medida válida para sismos ocurridos a distancias mayores a 10° como mínimo.

**Margen de Placa (Plate margin):** Borde de una placa. En los márgenes de placas se localizan la mayoría de los terremotos, además de la actividad volcánica y tectónica. Existen tres tipos: márgenes constructivos, en los cuales se está formando nueva corteza; márgenes destructivos, en los cuales una placa se hunde debajo de otra y márgenes conservadores en las cuales las placas se limitan a desplazarse una con relación a la otra.

**Mecanismo Focal (Focal Mechanism):** Representación gráfica del proceso de ruptura que se produce en el foco del sismo. Esta representación se realiza en forma de una esfera de radio unidad que representa al foco sísmico y de acuerdo al color de la esfera, esta representa a una falla inversa, normal o de desgarre.

**Microsismos (Microearthquakes):** Terremotos muy pequeños detectables solamente con aparatos muy sensibles situados a muy corta distancia de su origen y pueden estar asociados a procesos de ajuste en las capas superiores de la corteza terrestre o a corrimientos muy pequeños de las fallas.

**Onda P (P-Wave):** Ondas sísmicas en las cuales el movimiento de la partícula se realiza en la misma dirección en la cual se propagan las ondas. Las ondas P son de alta frecuencia y longitud de onda corta.

**Onda Rayleigh (Rayleigh Wave):** Onda superficial del suelo solo en el plano vertical conteniendo la dirección de propagación de la onda. Estas ondas solo están presentes en terremotos con foco a profundidad superficial y son de baja frecuencia y longitud de onda larga.

**Onda S (S-Wave):** Ondas sísmicas en las cuales el movimiento de la partícula está a 90° de la dirección de propagación de las ondas. Las ondas S son de baja frecuencia y longitud de onda larga.

**Ondas Internas (Body waves):** Nombre colectivo para las ondas P y S.

**Ondas Sísmicas (Seismic Waves):** Ondas elásticas que se propagan dentro de la tierra, las mismas que fueron generadas por un terremoto o explosión.

**Ondas Superficiales (Surface waves):** Ondas sísmicas que solo se propagan en la superficie de la Tierra: ondas Rayleigh

**Orientación de la Fuente Sísmica (source orientation):** Llámese a los mecanismos focales simples o compuestos elaborados para identificar la geometría de la fallera causante del terremoto o enjambre de sismos

**Periodo de Retorno (Return period):** Define el lapso de tiempo promedio entre las ocurrencias de terremotos con un determinado rango de magnitud; es igual a la recíproca de la frecuencia de ocurrencia.

**Placa (Plate):** Parte de la superficie terrestre que se comporta como una unidad rígida simple. Las placas tienen de 100 a 150 km. de espesor. Están formadas por la corteza continental o corteza oceánica o por ambas, encima del manto superior. Las placas se mueven con relación al eje de la Tierra y de unas a otras. Existen 7 grandes placas (Africana, Euroasiática, Indo-Australiana, Pacífica, Nortamericana, Sudamericana y Antártica) y varias más pequeñas.

**Precursores (Foreshocks):** Terremotos de magnitud pequeña que anteceden a un terremoto de magnitud elevada. Sin embargo, esto no ocurre con regularidad para ser utilizado como un modo de predecir terremotos grandes.

**Replicas (Aftershocks):** Terremotos de magnitud pequeña que siguen a un terremoto de magnitud elevada. Algunas series de réplicas duran largo tiempo como la que siguió al terremoto de Alaska de 1964 con más de un año de duración. La frecuencia de réplicas disminuye más o menos rápidamente con el tiempo.

**Sismógrafo (Seismograph):** Instrumento que registra los movimientos de la superficie de la Tierra en función del tiempo y que son causados por ondas sísmicas (terremotos).

**Sismógrafo de Banda Ancha (Broad-band seismograph):** Sismógrafo que tiene su respuesta casi constante en un rango amplio de frecuencias, entre 0.08 - 10 Hz.

**Sismógrafo Periodo Corto (Short Period seismograph):** Sismógrafo que tiene su respuesta constante en un rango de frecuencias de 1 Hz. Este tipo de sismógrafo está compuesto por un sensor con respuesta a 1 Hz con valores de filtros variables y registro en papel. Este tipo de instrumento es usado generalmente para campañas de microsismicidad o registro en el campo cercano.

**Sismograma (Seismogram):** Define al registro producido por un sismógrafo. Generalmente, este registro es en papel ahumado o a tinta y su duración depende del tamaño del registrador.

**Sismología (Seismology):** Ciencia que estudia los terremotos, fuentes sísmicas y propagación de ondas sísmicas a través de la Tierra.

**Sismómetro** (*Seismometer*): Componente principal de un sismógrafo. Es el sensor que responde al movimiento del suelo.

**Subducción, Zona de** (*Subduction zone*): Dícese al proceso en la cual una placa tectónica de tipo oceánica desciende hacia el interior de la tierra por debajo de una placa continental.

**Tectónica** (*Tectonics*): Adjetivo para referirse a la estructura de la superficie de la Tierra y a las fuerzas y deformaciones de la misma.

**Telemetría** (*Telemetry Data*): Sistema de transmisión de data para redes locales que consideran la necesidad de usar toda la base datos en tiempo real. Sistema útil para la transmisión de la data en tiempo real.

**Telesismo** (*Telesismic*): Define a los terremotos que ocurren a distancias mayores a 1000 km. y son registrados por sismógrafos muy sensibles.

**Terremoto** (*Earthquake*): Movimiento repentino de parte de la corteza terrestre o sacudida producida en la corteza terrestre o manto superior. Un terremoto puede ser. Un terremoto puede ser causado por el movimiento a lo largo de una falla o por actividad volcánica.

**Terremoto Intermedio** (*Intermediate earthquake*): Terremoto cuyo foco se localiza a una profundidad entre 60-350 km.

**Terremoto Local** (*Local earthquake*): Define a los terremotos que ocurren a distancias menores a 1000 km.

**Terremoto Profundo** (*Deep earthquake*): Terremoto cuyo foco se localiza a una profundidad mayor a 350 km. y donde el material está sometido a altas presiones y temperaturas no siendo probable ser explicado en términos de una simple fractura.

**Terremoto Superficial** (*Shallow earthquake*): Terremoto cuyo foco se localiza a una profundidad menor a 60 km. y están asociados directamente a los movimientos relativos de los lados de una falla y a veces pueden ser observadas en superficie.

**Terremoto Tectónico** (*Tectonic earthquake*): Terremoto que es el resultado de la liberación súbita de la energía acumulada por la deformación de la corteza terrestre y que dan origen a la formación de los continentes y montañas.

**Tiempo Origen** (*Origen Time*): Momento en el cual se produce el terremoto o se inicia la ruptura de la falla. Frecuentemente, el tiempo origen es dado en la Hora Universal (GMT).