

(imagen Geophysical Service Inc.)



“இயற்கை வளங்களை
என்றால் பாதுகாப்பு தவறு
நடந்தால், வேறு எதுவும்
ரைட் போகலாம்.”

[“Si la conservación de los recursos naturales
va mal, ninguna otra cosa irá bien.”]

Mankombu Sambasivan
Swaminathan (2001)

INSTRUMENTAL SÍSMICO Y MEDIOAMBIENTE

Gondwana (pronunciado Gondvana) significa bosque de Gond y es la región central de la India, patria de la etnia drávida epónima. El austríaco **Eduard Suess** en 1855 en su libro *Das antiltz der Erde* dio este nombre al supercontinente austral cuya fragmentación comenzó hace 140 millones de años y uno de cuyos pedazos fue la placa del subcontinente índico que, como un barco sismográfico, navegó raudo a través del mar de Tethys –hasta a 15 cm/año, fierro a la tabla– dejando a popa el océano al que dio nombre, surcado de estelas geotectónicas en el fondo de la mar. Nave cortical que, sin freno, colisionó hace 50 millones de años contra el puerto eurasiático al que se dirigía, provocando así el *grosso* amasijo rocoso del Himalaya y cadenas vecinas. Y que sigue todavía hoy empujando y subductando a unos 5 cm/año, engrosando las raíces y sus antirraíces con máximo en los 8.850 metros del monte que los tibetanos –subyugados por China– llaman *Chomolungma* (madre del Universo) y que los invasores británicos en 1865 rebautizaron en honor a su gran exjefe de topografía, el geógrafo galés **George Everest**. (Ese mismo año otros galeses que no querían servir a ese imperio, cansados de la prepotencia inglesa, emigraron a la remota Patagonia, buscando un nuevo hogar donde preservar su lengua celta y sus tradiciones). Independizada de Gran Bretaña en 1947, la India (que ellos llaman भारत, Bhārat) tiene un área equivalente a la suma de Argentina, Uruguay y Paraguay (que con el Alto Perú –Bolivia– formaron la unidad territorial balcanizada principalmente a causa del unitarismo egoísta de las élites porteñas). Pero la nación de los indios originales también era mayor: incluía Pakistán y Bangladesh, separados tras la descolonización a causa de sus mayorías musulmanas en vez de hinduistas. Aun así, dentro de la India actual conviven minorías musulmanas, budistas, cristianas y gentes de otras varias religiones, y son hablados 30 idiomas –además del inglés, oficial–, entre ellos el tamil, los drávidas y otros, aunque el hindí es el mayoritario (de origen ario o indoeuropeo, igual que el arcano sánscrito y que las lenguas celtas, latinas, anglosajonas, escandinavas, eslavas, bálticas, holandesa, albanesa, griega, armenia, persa y otras que proceden de una cultura que irradió desde el norte del Cáucaso hace más de 5.000 años). En fin, total que hay 25 indios por cada argentino, paraguayo y uruguayo sumados y ya superaron la población china. No es raro entonces que exista un extenso elenco de celebridades procedentes de esa nación hoy en rápido crecimiento económico, con altísimo desarrollo informático, pero todavía



Templo vishnuísta de Sarangapani en Kumbakonam, Tamil Nadu
(foto indianmandirs.com)

padeciendo las desigualdades enormes y la miseria tan típicas del libre capitalismo periférico.

Allí nació, por ejemplo, **Satyendra Bose** (Calcuta, 1897), eminente físico en cuyo honor se han bautizado como bosones a las partículas mediadoras (fotones, gluones, etc.) y otros grandes científicos que hemos ido citando. También el máximo líder pacifista de la historia humana, el Mahatma Gandhi (región de Gujarat, 1869) a quien el frecuentemente insólito comité noruego le negó el premio Nobel de la paz. E hijo de indios, también de Gujarat, emigrados a la isla africana oriental de Zanzíbar –camino inverso al recorrido por su terruño durante el Cretácico y el Paleógeno– fue Farrokh Bulsara, mejor conocido por su nombre artístico, Freddie Mercury, emigrado él a su vez a la capital británica, donde devino compositor y vocalista de la mítica Queen.

Como es esperable para un país tan grande, existen diversas cuencas petrolíferas en tierra firme y en áreas marítimas, incluyendo la región Tamil (sureste del subcontinente indio) de la que es oriundo **Mankombu Swaminathan** (nacido en la ciudad de Kumbakonam en 1925), genetista de quien al principio referimos una cita en su lengua natal, el tamil, líder de la revolución ambiental verde y aún activo en su lucha contra el hambre sin destruir el medio ambiente. (Por ejemplo sin el glifosato que liquida casi toda la flora y fauna excepto la soja, causalmente obra de la misma Monsanto que fabricaba el agente naranja para destruir la selva vietnamita y abrir camino al aún más perverso napalm de la Dow Chemical). Ahora se procura que quienes por aquellas latitudes hacen prospección sísmica (y en general geofísica aplicada) tengan respeto por una naturaleza que ya ha sido demasiado cascoteada por tanta sobrepoblación y tan inmoral subdesarrollo.

También indio es **Amartya Sen** (Bengala, 1933), el economista premio Nobel en 1998 que hizo muchísimos aportes a la teoría del desarrollo humano, la lucha contra la desigualdad y la ética económica, buena parte de ellas junto al admirable **Bernardo Klichsberg** (nacido en Buenos Aires en 1940), referente mundial sobre el combate a la desigualdad socioeconómica y la responsabilidad social empresaria.

Volveremos al final de este tema sobre los cuidados medioambientales y laborales en la adquisición de datos geofísicos. Pero antes veremos las alternativas de instrumental sísmico para registrar en la tierra y el agua.

Ya sea que se trabaje en prospección sísmica con el método de refracción o el de reflexión, se requiere de alguna fuente de energía artificial, de receptores o sismómetros apropiados y de un sismógrafo donde grabar y eventualmente graficar los datos a fin de controlar su calidad. En general el equipamiento de sísmica de refracción es más sencillo que el necesario para la adquisición de campo de la sísmica de reflexión, sobre todo si ésta tiene objetivos que no son someros. Pero siempre se requerirá de una cantidad de instrumentos para ejecutar los fuertes y roncós sonidos que harán vibrar el subsuelo, que nos devolverá esos ecos que habremos de percibir y grabar como auténtica música *underground* con su particular melodía, ritmo y armonía.

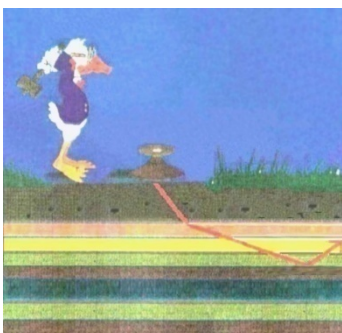
FUENTES DE ENERGÍA

Fuentes Impulsivas

Cualquiera sea el tipo de fuente (en inglés *source*), las impulsivas se caracterizan por generar una forma de onda básica u **ondícula (wavelet) de fase mínima**, llamada así por su adelanto de fase: es asimétrica, ya que está más cargada de energía en la proa de la forma ondulatoria (figura adyacente).

En tierra firme

- **Caída de peso, para trabajos someros que no requieren de mucha energía.** Puede recurrirse desde una maza de unos 5 a 7 kg sobre una plancha metálica gruesa, hasta grandes bochas de metal cayendo desde una altura de 1 a 3 metros.



Percusión manual.



Golpeador (foto Bison Instruments)



Golpeador acelerado (foto C. Générale Géophysique)

Actualmente existen móviles con una guía del peso en caída, los **golpeadores (thumpers)**, foto a la izquierda) **muy utilizados en sísmica de refracción**, y otros con aceleración adicional de caída (foto acá arriba) cuya emisión (hasta unos 100 Hz) ilumina a más de 500 m de profundidad.



Emisores EM sísmicos Geoton, Rusia (foto neftegaz.ru)

También existen fuentes, desarrolladas en Rusia, de **impacto usando energía electromagnética** (*geoton*, foto lindante con 4 traccionadas y operando en simultáneo).

- **Explosivos, opción cuando se necesita mayor energía;** pueden utilizarse cartuchos plásticos con la mezcla explosiva de nitroglicerina, nitrato de amonio, etc. y detonadores eléctricos a base de fulminato de mercurio. La nitroglicerina fue sintetizada por el italiano **Ascanio Sobrero** en 1847, que fue la base sobre la que en 1867 el sueco **Alfred Nobel** en Alemania inventó la dinamita –y el temor al recuerdo que se tendría de él como promotor de

tanta muerte hizo que un año antes de fallecer destinase gran parte de su fortuna al famoso premio–.

Si se emplean explosivos en sismica es conveniente realizar pozos, por motivos ambientales y para un eficiente aprovechamiento de la energía, si es posible atravesando toda la capa intemperizada o meteorizada (*weathering layer*). A veces, antiguamente, se detonaban cargas en la superficie (foto en Tema 12, pág.324), cosa que por seguridad y medioambiente ya no ocurre. La perforación (usualmente con agua y bentonita) se hace con equipos montados en camiones, que se rebaten durante el transporte, con capacidad de 100 ó más metros de profundidad (imagen izquierda central), o perforación con aire que puede penetrar cientos de metros, y a veces con equipos portátiles (para pocos metros) en zonas de difícil acceso (foto abajo a la izquierda, al pie del Himalaya). Allí se baja el explosivo, con un cable hasta el disparador (*blaster*) y esto da lugar a una onda impulsiva, como se ve en las fotos a la derecha, donde el soplado al aire debería ser mucho menor que el aquí mostrado en razón del aprovechamiento de la energía en el subsuelo y por obvios motivos de riesgo laboral, lo cual se logra tapando y apisonando bien el pozo luego de colocada la carga, previo a la detonación (*shot*) que emite hasta 200 Hz.



Chubut, camión perforador (foto Unión Geofísica Argentina)

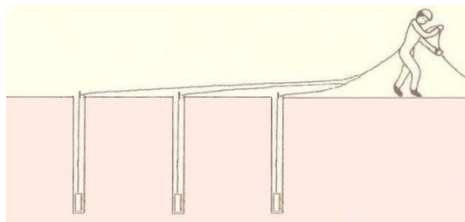


India, equipo portátil (foto Compagnie Gén. Géophysique)

También puede elegirse el sistema de **pozos múltiples**: varios pozos adyacentes perforados a poca profundidad (esquema contiguo), que en conjunto pueden resultar de menor costo que uno profundo y no pocas veces permite



Secuencia de soplado de un pozo al detonar su carga (fotos A. Domínguez)



Pozos múltiples.

resultados comparables al hacer estallar todas las cargas en simultáneo. Es una alternativa empleada cuando se recurre a las perforadoras portátiles o en afloramientos de roca dura.

- **Explosores o dinos** (*dinoseis*, derecha), muy empleados entre 1970 y 1980, hoy prácticamente en desuso, han sido otra forma de fuente impulsiva, muy potente, a partir de una explosión de gas (una mezcla de propano y oxígeno, en forma análoga a un motor de combustión interna) dentro de un tanque apoyado en el suelo, solevado tras la emisión.



Explosor montado en un todoterreno (foto Teledyne)

- **Pistolete** (*machine gun*), alternativa

explosiva moderna, acotada y segura, que se hinca en el terreno con un cartucho en la punta y se detona con un martillazo (foto a la izquierda y en acción en Tema 12, pág.324).



Pistolete Buffalo (foto allied-associates.com)

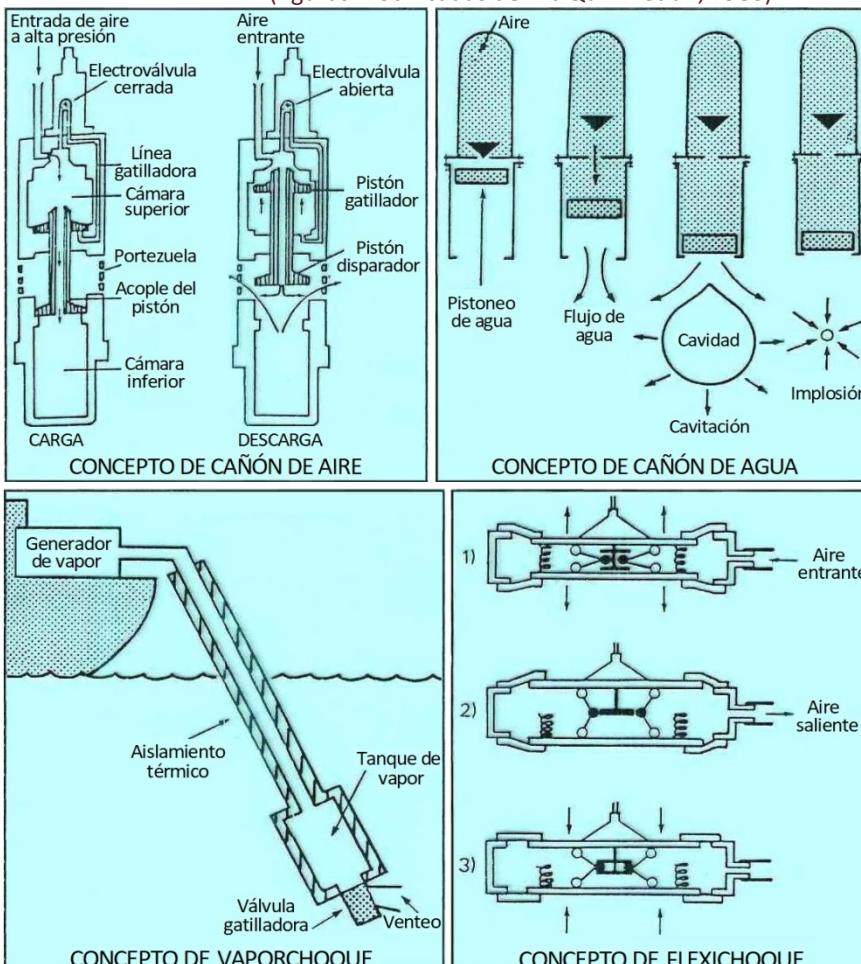
- **Cordón detonante**, otra variante superficial aunque actualmente poco utilizada; posee un núcleo de material explosivo recubierto de policloruro de vinilo (PVC), que se detona extendido sobre el terreno, en forma lineal o circular, la cantidad de metros necesaria. Es apto para trabajos someros, como el pistolete, los golpeadores y la maza, si bien de variable efectividad y alcance en cada caso particular.



Izquierda, perforación; derecha, pulsador en posición para el golpe (fotos geodevice.com)

- **Pulsador acústico** (fotos a la derecha) que

(figuras modificadas de Mc Quillin *et al.*, 1980)



se hinca como el pistolete antes mencionado, en un pocito de 0,5 m de profundidad, pero no es una fuente explosiva sino que genera un pulso de ondas de sonido (o sea altas frecuencias) e ilumina hasta a unos 500 metros bajo la superficie.

En mares o lagos, en los primeros tiempos simplemente se arrojaban explosivos sueltos (pobres peces)... Pero luego se optó por:

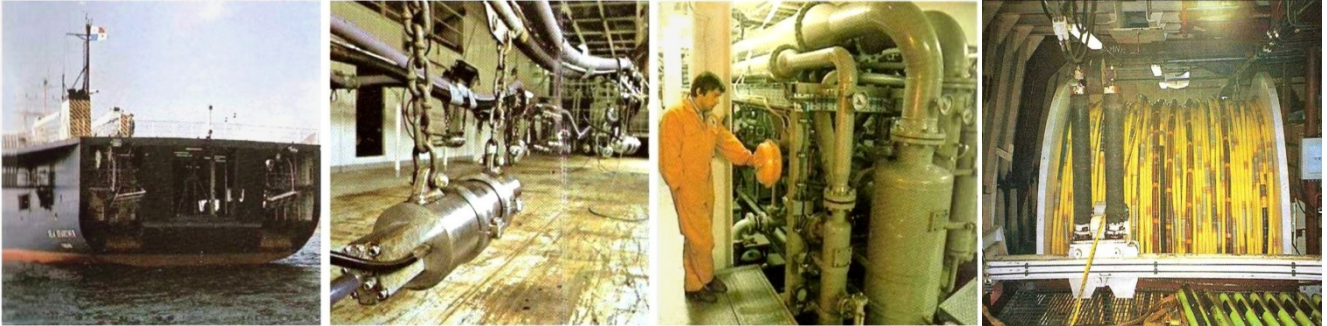
- **Cañón de aire** (*air gun*), **la fuente más usada** desde 1964 hasta hoy, uno o varios sumergidos a popa. El empuje de un pistón genera una salida brusca de aire comprimido hacia el medio acuático para causar el pulso sísmico omnidireccional de hasta 140 Hz y energía de hasta 0,5 ML; ver esquema en esta página y fotos en la siguiente.

- **Cañón de agua** (*water gun*), cuyo pistón provoca un desplazamiento brusco de un volumen de agua, como se esquematiza al lado, y su implosión genera la onda sísmica.

- **Vaporchoque** (*vaporchoc*, ver el esquema a la izquierda) que opera

mediante la inyección súbita de una gran cantidad de vapor dentro del agua, el cual enseguida implosiona.

- **Flexichoque** (*flexichoc*), con una fuente de aire comprimido que causa una expansión rápida tipo fuelle, la cual produce la onda de presión en el agua que genera el microsismo (esquema al final de la página precedente).



De izquierda a derecha: popa de un barco sismográfico, cañón de aire sobre la cubierta, equipo compresor de aire y malacate con enrollamiento de líneas de receptores acuáticos o hidrófonos (fotografías GeCo-Veritas Noruega)

- **Electrocánula** (*sparker*), llevado por un pequeño catamarán inflable y constituido por un tubo de goma que se sumerge al menos 20 cm y contiene un cable coaxial. En su extremo dos electrodos adyacentes originan la descarga de alto voltaje vaporizando el agua en forma de plasma y burbujas que se expanden y luego colapsan generando así ondas de alta frecuencia (hasta 4.000 Hz) con un pulso de 2 a 4 ms. Pueden usarse de a tres superpuestos en simultáneo (foto a la izquierda) para tener más energía y lograr imágenes provenientes de hasta 500 m de profundidad. La resolución es de 0,5 a 5 m, cuanto más profundo siempre capas más gruesas.

Hay una variante muy liviana, con forma de esqueleto de pez (foto siguiente), flota y se la debe arrastrar en forma continua tras la lancha o gomón. Los múltiples terminales ofician de cátodo y el ánodo está en la cánula.

El *sparker* más convencional (foto central) **suele emplearse para ciertos registros dentro de pozos** (petroleros o con otros fines prospectivos) como el caso de las dromocronas verticales citado en el Tema 12 (pág.325).



Fotografías de izquierda a derecha: 3 bandejas de *sparkers* superpuestos siendo bajadas al mar en un mini catamarán (GeoMarine Survey Systems), *sparker* liviano de arrastre superficial (SIG marine-seismic-equipments), *sparker* de pozo con su consola de mandos (georeva.eu) y *boomer* sobre un pequeño catamarán inflable (geodevice.com)

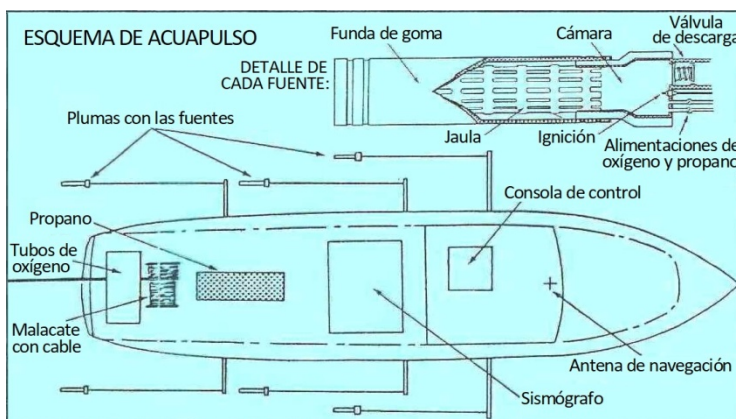
- **Electroplato** (*boomer*) accionado por una descarga eléctrica desde capacitores hacia una bobina que empuja un plato de cobre de medio metro de diámetro unos 20 cm bajo el pelo de agua. Produce una onda sísmica de

hasta 5.000 Hz, resolución desde unos 30 cm de espesor en capas muy someras y visualización de hasta unos 150 m de profundidad.

- **Explosivos**, detonados al interior del medio acuoso en cilindros o esferas a tal fin, tales los casos de *maxipulse* y *flexotir*. Casi en desuso.

- **Acuapulso** (*aquapulse*), que es equivalente marino de los dinos; detona propano y oxígeno en una cámara de combustión interna, como se esquematiza a la izquierda. Ya poco empleado.

La frecuencia máxima que entregan las fuentes impulsivas, desde 100 hasta 5.000 Hz según su tecnología, es crítica para el grado de



(modificado de Western Geophysical)

detalle de capas que podemos llegar a ver, pero siempre las frecuencias se van filtrando con el viaje, tanto más cuanto mayores son, por lo cual a gran profundidad cuentan sólo las bajas frecuencias que han podido llegar, y esto depende mucho de la potencia de la fuente. En general las fuentes de más alta frecuencia son menos energéticas, útiles para estudios someros de detalle, mientras que las más potentes, aunque produzcan menores frecuencias máximas, permiten que sus bajas frecuencias iluminen a miles de metros de profundidad. Lo cual no obsta para que una fuente poco potente y de baja frecuencia, como un impacto, sea útil a muchos fines someros.

Fuentes Vibratorias

Se caracterizan por generar una forma de onda (**ondícula**) de fase cero (figura en la segunda página), es decir, simétrica y centrada en la interfaz reflectiva, la cual es el resultado de la emisión de un barrido de frecuencias y su posterior procesamiento de **correlación cruzada** con la respuesta generada en el terreno –lo cual se trata brevemente en el Tema 15–. Por lo tanto se trata de fuentes controladas en cuanto a tipo y frecuencia de onda.

- Los vibradores o **vibros** (*vibroiseis*, fotos siguientes) son las fuentes más utilizadas en tierra desde la década de 1980, son seguros y producen un barrido controlado de frecuencias que inicia con valores bajos (de entre alrededor 2 y 12 Hz) que va aumentando gradualmente (según una función lineal o logarítmica, elegida en base a pruebas de campo) hasta llegar a unos 80 a 140 ó más Hz al cabo de unos 6 a 16 ó más segundos (tiempo de barrido), según sea el caso. Pueden ir montados en camiones o vehículos todoterreno.



Chubut, vibros a campo travesía e impronta de la plancha en el suelo luego de la emisión (fotos Unión Geofísica Argentina)

- Los **martillos vibratorios** (fotos a la derecha) son la alternativa neumática portátil cuando la complejidad del terreno (por una topografía abrupta, selva densa, ciudad, etc.) no permite el tránsito de los camiones vibradores o lo encarece mucho o no lo hace ambientalmente sustentable. La potencia emitida es bastante menor, sobre todo en el caso del manual *mini-Sosie*, y éste será un aspecto a evaluar mediante pruebas de señal y ruido previas a la adquisición.

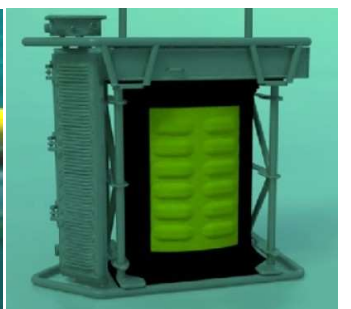
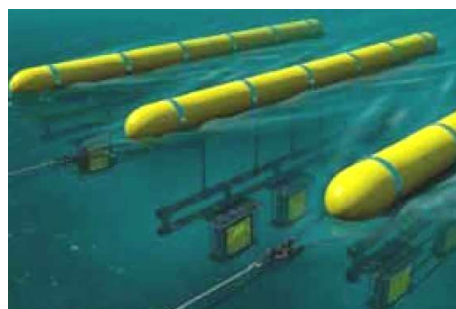


Mini-Sosie (foto velseis.com)



Martillo vibrador en tractor (foto vibrometric.com)

- Los **vibros marinos** de movimiento electrohidráulico van suspendidos desde flotadores en un medio acuático (a veces varios cerca, imagen adyacente) y existen varios modelos en desarrollo. Se prevé que reemplazarán a los cañones de aire y otras fuentes marinas potentes porque producen mucha menos perturbación acústica a la fauna, en especial cetáceos.



Arreglo de vibros marinos. Vibro Flextensional PGS (imagen Hanssen, 2018)

La frecuencia máxima de las fuentes

vibratorias suele ser de entre 140 y 160 Hz, pero puede superar los 1.000 Hz en algunos martillos neumáticos que operan a niveles energéticos bajos y son empleados para investigación muy somera.

Fuentes de Ondas de Cizalla

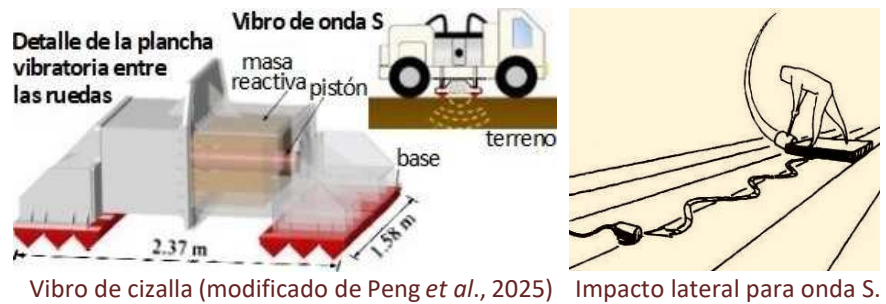
Todas las fuentes hasta ahora vistas generan principalmente ondas P, a pesar de lo cual no es un obstáculo su utilización cuando se requiere el registro de ondas S –algo que es más bien ocasional, sólo para trabajos de prospección muy específicos–. De manera que la inmensa mayoría de los casos –poco habituales– en los que se adquiere ondas S las fuentes utilizadas son las convencionales, ya sea que se opte por fuentes impulsivas o vibratorias, porque en el subsuelo una parte de la energía en cada interfaz cambia de P a S y viceversa. Incluso hay particulares técnicas de adquisición y procesamiento (ejemplo Duan *et al.*, 2023) para mejorar los registros de ondas S polarizadas horizontal o verticalmente para estudios de anisotropía u otros (Tema 18, pág.477). Pero existen algunas opciones, rarísimamente empleadas, de dispositivos de emisión especialmente diseñados para generar ondas de corte en mayor proporción que las ondas longitudinales, acá referidas brevemente.

Los recientes **vibradores horizontales** (figura acá) asemejan a los verticales en su principio de funcionamiento, pero efectúan una vibración lateral que consigue causar una onda predominante de cizalla. Son menos efectivos que los verticales en términos de energía inyectada en subsuelo y aún se los usa poco.

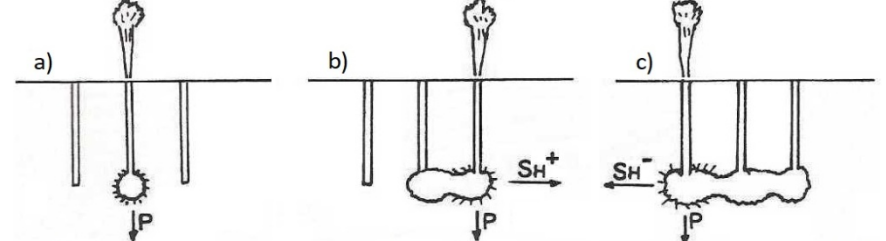
El grupo de **fuentes impulsivas de ondas S** incluye otras dos posibilidades bastante sencillas. Una, para trabajos que requieren muy poca energía, es el **impacto horizontal** sobre una masa de base plana (boceto a la derecha).

La otra opción es la detonación de **cargas en pozos múltiples** según la secuencia que se esquematiza y describe en la figura colindante.

Una suerte de combinación de efectos impulsivo y vibratorio es el modelo experimental de **vibro por detonación** (*blasting vibroseis*, Cui *et al.*, 2017). Y hay otros.

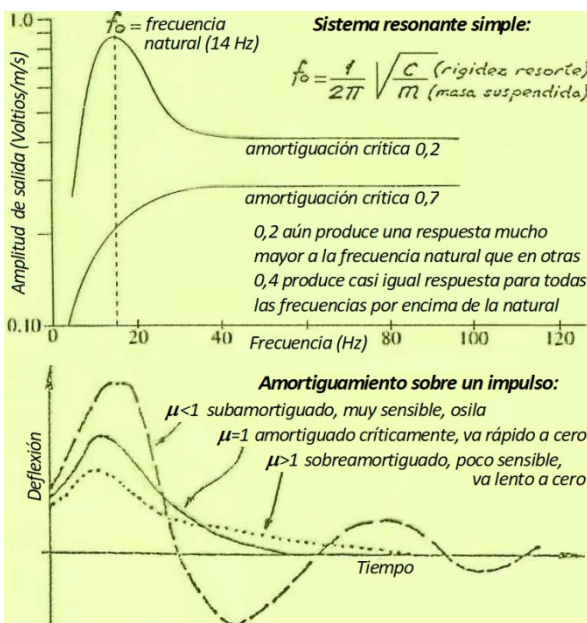


Vibro de cizalla (modificado de Peng *et al.*, 2025) Impacto lateral para onda S.



Método Syslap: a) una detonación en el pozo central genera mayormente ondas P; b) debido a la asimetría causada por la detonación en el pozo central, la detonación en el pozo de la derecha genera ondas SH más P; c) el pozo de la izquierda produce ondas P más SH de polaridad opuesta a la del pozo de la derecha. La resta entre los registros de los pozos de los costados duplica la contribución de SH y casi elimina la contribución de P. (modificado de Compagnie Générale Géophysique)

Fuentes acústicas (en el Tema 16), emiten hasta 40 kHz y permiten imágenes detalladísimas y muy someras.

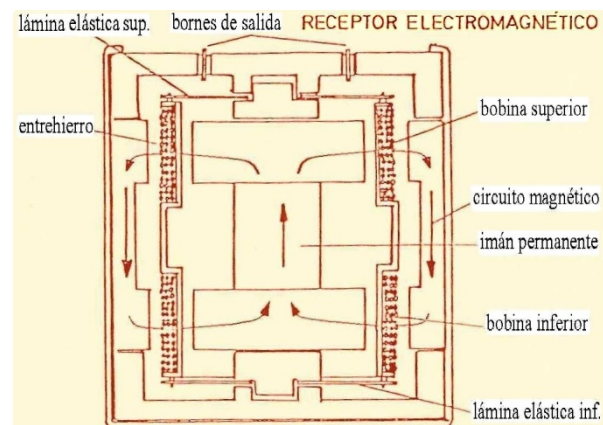


(figuras modificadas de Geofísica Exploración YPF)

SISMÓMETROS O RECEPTORES

(seismometers o receivers)

Los **geófonos** (*geophones*) **de tierra firme** son transductores mecánico-eléctricos en los cuales la vibración del suelo hace oscilar un imán que se encuentra dentro de un campo eléctrico generado por una bobina (figuras abajo y al lado).



Puede verse que el geófono tiene una frecuencia natural de oscilación que debe ser críticamente amortiguada para obtener una respuesta efectiva, tendiendo a que manifieste una sola oscilación fuerte ante la llegada de cada impulso del subsuelo, evitando sub o sobreamortiguación. Se produce así una FEM representativa del frente de onda, cuya señal eléctrica viaja luego hacia el sismógrafo. Algunos de estos receptores electromagnéticos tienen base plana en lugar de puntiaguda (imagen a la derecha) para aquellos sitios en los que no pueden ser clavados (roca muy dura o veredas y calles en registros dentro de las zonas urbanas).

Los geófonos van conectados en ristas a lo largo de cables eléctricos que son transportados en rollos sobre camiones denominados **tiracables** o



Geófonos con punta y con base plana (foto Geofísica Exploración YPF)



Interior de un geófono triaxial (fotos Compagnie Générale Géophysique)



Carro tiracables en India septentrional

eventualmente en carros con tracción animal en sitios de difícil acceso para vehículos pesados (foto acá a la derecha).

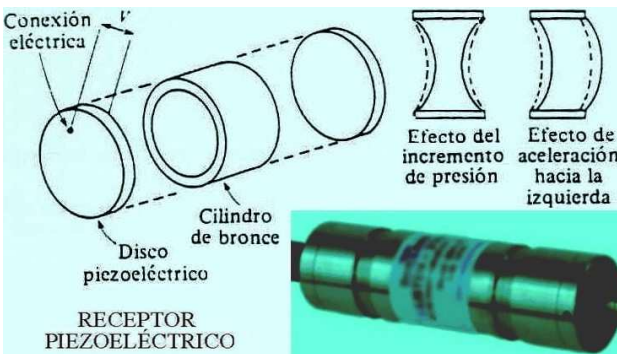
Cuando se desea registrar ondas de corte, se utilizan **geófonos triaxiales o 3C** (a izquierda uno abierto). **también muy habituales en sísmica de pozo, que captan las componentes de la vibración en x,y,z**, a diferencia de los geófonos tradicionales que registran



Geófonos 3C en el campo (foto thgeophysiscs.com)

sólo la componente vertical de la vibración sísmica que viaja por los sólidos. En años recientes se usan cada vez más los geófonos triaxiales por su abaratamiento, así como por estrategias de adquisición económicas y más aún el procesado posterior de los datos. Y **se están dejando de usar cables, reemplazados por señal remota**.

Los **sismómetros marinos** se denominan **hidrófonos** (*hydrophones*) y funcionan por piezoelectricidad debido a las variación oscilatoria de presión que ejercen las ondas sísmicas compresionales en el agua (esquema adyacente). Al comprimirse el retículo cristalino de cuarzo produce corriente. No registran ondas de cizalla porque éstas no pueden transmitirse a través de los fluidos. Estos receptores son arrastrados a lo largo de una o varias **líneas o transmisiones** (*streamers*) que se desenrollan desde la popa (esquema abajo, fotos en la página siguiente) para ser llevadas un poco sumergidas tras el barco sismográfico. Una línea permite registrar secciones sísmicas individuales, también llamadas 2D o

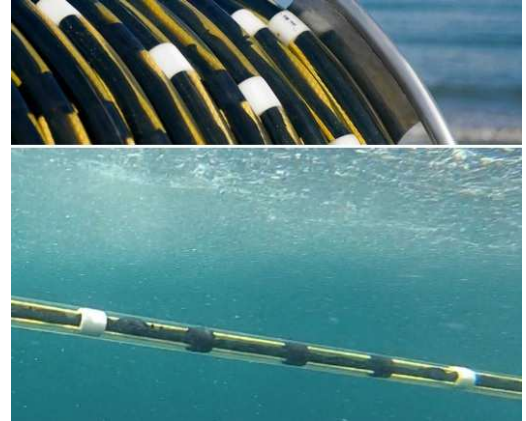


(modificado de Sheriff & Geldart, 1991)

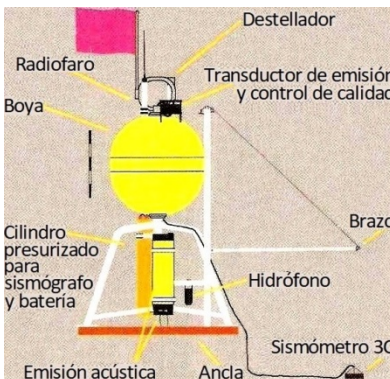


Esquema de barco sismográfico arrastrando una línea de grupos de hidrófonos (modificado de Sheriff & Geldart, 1991)

bidimensionales. En cambio varias líneas paralelas de hidrófonos –lo usual en este siglo– permiten registrar datos para sísmica de reflexión 3D. Cada una tiene un alma de acero, cables eléctricos y su funda impermeable. Además lleva reguladores de profundidad (llamados *birds*) entre los grupos de hidrófonos y una boya de cola.

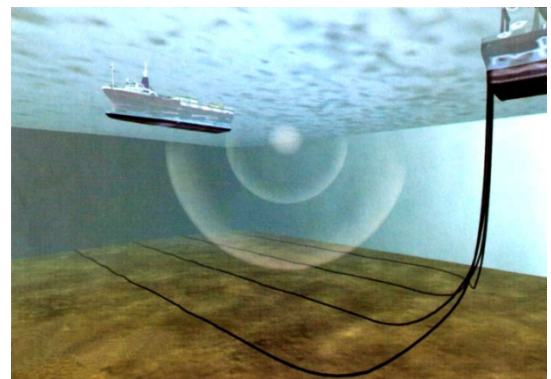


Izquierda, barco sísmográfico y líneas de hidrófonos (foto Seismograph Service). Arriba, detalle del malacate y línea receptora a 1 o varios metros bajo del pelo de agua (foto geosense.com)



Esquema de sonoboya; el sísmómetro 3C apoya en el lecho (modificado de Bittgenbach & Schieisiek, 2002)

Gráfico de adquisición de ondas S con geófonos 3C en el lecho conectados a una nave y otro barco en navegación perpendicular lleva la fuente (modificado de PGS)

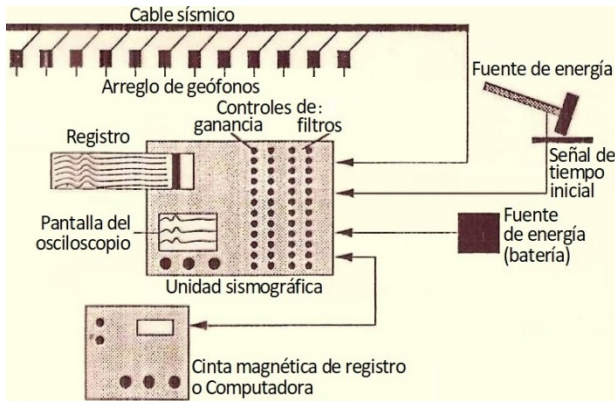


Ahora bien, en prospectos especiales que requieren el registro de ondas S en el mar o en un lago se deben bajar hasta el lecho los geófonos triaxiales (como en tierra, 3C: con componentes en x , y , z) que pueden llevarse a lo largo de cables sumergidos al fondo (figura derecha) o bien ir conectados separadamente a sonoboyas (figura izquierda) que además disponen de un hidrófono para volver a registrar ondas P, ya que **en el sísmómetro apoyado en el lecho marino o lacustre la oscilación de su sensor orientado en z registra las P y los sensores en x e y registran las ondas S. Y una alternativa muy reciente es el empleo de geófonos triaxiales instalados dentro de campanas individuales en el fondo**, que además contienen una batería y un sistema de grabación miniaturizado que, incluyendo el registro del hidrófono, envía la señal de manera remota hacia el sísmógrafo.

Los **acelerómetros digitales** (citados en el Tema 11, pág.299) son la alternativa reciente a los geófonos en mar y tierra, captan mayor banda de frecuencias, pero requieren batería y son más caros y menos resistentes por ahora.

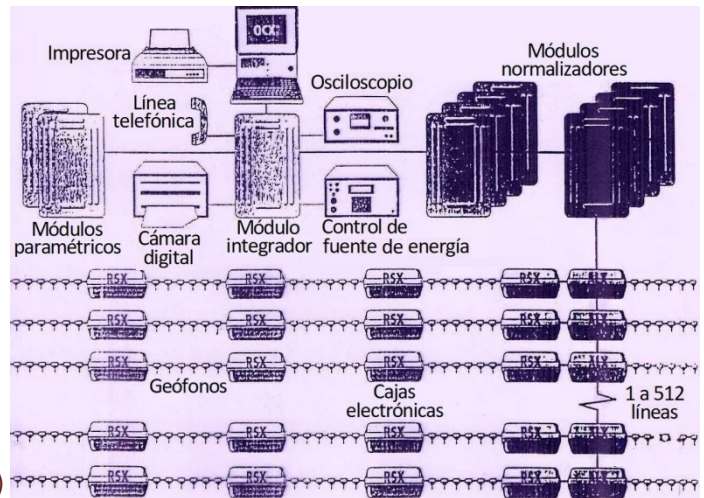
SISMÓGRAFO (*seismograph*)

Operado por un **observador** o dos, es el sistema de registro de los datos, donde llegan los cables que transmiten la información proveniente de los sísmómetros (geófonos o hidrófonos). Puede ir montado dentro de un **camión**, sobre un **barco** o consistir en una **versión portátil** dentro de una valija especial. Antiguamente eran analógicos, se hicieron digitales hacia 1960 y siguieron tecnificándose. Tienen una serie de dispositivos de acondicionamiento electrónico de la señal (filtros, amplificadores y otros), un osciloscopio para monitorear la respuesta de los receptores, una computadora desde donde se opera y donde son visualizados y archivados los registros, también una impresora, un sistema de radioseñal para las fuentes de energía y, si éstas fueran vibratorias, una caja electrónica controladora de sus parámetros. Al inicio de la página siguiente pueden verse los esquemas del sistema de información que llega a un sísmógrafo en una versión tradicional (izquierda) y moderna para sísmica de reflexión 3D (derecha) en la que se indican las **caja electrónicas conectoras** que, por grupos de receptores, acondicionan la señal (ganancia, filtrado, etc.) y la envían teleméricamente al sísmógrafo.



Arriba, esquema de un equipo antiguo de adquisición sísmica (modificado de McQuillin *et al.*, 1979)

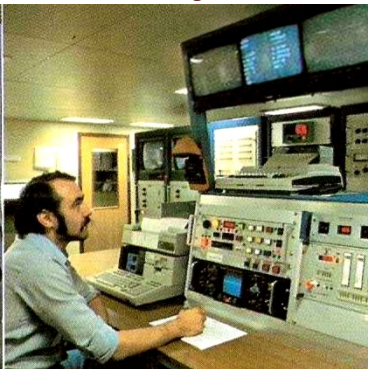
Derecha, equipo para 3D (modificado de OCX System)



En los sismógrafos también se efectúa un procesamiento preliminar de los datos para control de calidad. Los portátiles (fotografía abajo a la izquierda) suelen operar hasta 48 canales y en general se los emplea para trabajos prospectivos a menor escala.

Caja conectora telemétrica (foto Compagnie Générale Géophysique)

A la izquierda interior de un sismógrafo instalado en un barco (fotos GECO) y a la derecha vista exterior de la cabina –dog house– de un sismógrafo en tierra firme en Chubut (foto Tecpetrol)



Sismógrafo portátil Spectra (foto Bison Instr.)



Teodolito electrónico, GPS y reflector para el relevamiento topográfico (fotografías Compagnie Générale Géophysique)



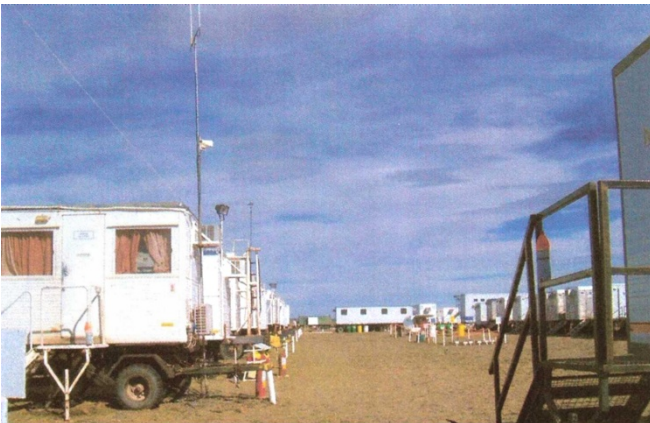
GEOGRAFÍA DEL ÁREA A PROSPECTAR

En tierra *el relevamiento topográfico es un trabajo imprescindible previo a la adquisición de los datos sísmicos*, sean éstos de refracción o reflexión, clásicamente ejecutado con teodolito y plancheta y actualmente mediante posicionadores satelitales (fotos a la derecha). *En el agua se mide la profundidad con un sonar.*

Los trabajos de registro sísmico de campo pueden tener muy variados desafíos, más allá de los casos típicos de adquisición marina o terrestre. Existen innumerables posibles complejidades topográficas, biogeográficas y medioambientales. Entre éstas puede citarse el trabajo en zonas transicionales intermareales, como es el caso de la Patagonia, con gran amplitud de mareas, lo que requiere moverse con gomones o detonar durante la bajamar, a veces con explosivos en perforaciones hechas con equipos portátiles, si la playa es fangosa (dominada por acción de marea). O bien pueden presentarse casos de áreas pantanosas, como muestran las siguientes fotos.



Vehículo a oruga anfibio en una zona pantanosa llevando los cables y ristras de los geófonos (fotos Compagnie Générale Géophysique)



Campamentos sísmicos: uno en topografía operativamente favorable, y otro más complicado, pero con mejor paisaje (fotos: izquierda, Chubut, Unión Geofísica Argentina; derecha, India septentrional, Compagnie Générale Géophysique)

RESGUARDO MEDIOAMBIENTAL

Los hunos eran nómades originarios de un área de Asia central cercana a los montes Altai y su lengua por ende compartía origen con la de turcos, mongoles y otros. Se habían establecido en la danubiana llanura de Panonia (hoy Hungría), sea que el Danubio se viera azul o no, y su imperio abarcaba desde el río Rin hasta los Urales. Atila fue su mayor líder guerrero, entre 434 y 453; lo llamaban *flagellum Dei* (el azote de Dios) y poco faltó para que llegase a Roma. “*Por donde pisa mi caballo no vuelve a crecer la hierba*”, se ufanaba Atila. Pues bien, por donde pisaban las (mansas) hordas sísmicas tampoco. Aparte de dejar basura de todo tipo, abrían una picada para cada línea sísmica levantando con “la moto”(niveladora) la delgada capa de suelo fértil y encima, en el barro invernal por lluvia, nieve o descongelamiento, los camiones hacían huellones que obligaban a las chatas a abrir una calle paralela de ida a un lado y de vuelta al otro lado. En suma, una autopista rústica donde décadas después aún se ve el substrato casi sin hierbas ni matas. Y no una: muchísimas autopistas.

En efecto, hasta finales de la década de 1980 la **conciencia medioambiental** era muy pobre a nivel de las empresas y también de los Estados, y la seguridad en el trabajo se limitaba a principios muy básicos. Esto fue cambiando para mejor desde entonces, aunque todavía el cumplimiento de estos ítems suele no ser el deseable.

El terreno o el lago o mar donde se trabaje debiera poder quedar igual después que antes de la tarea prospectiva. Esto es en rigor imposible, pero es imperativo minimizar el impacto ambiental. Deben tomarse medidas como: no arrojar residuos de ningún tipo, procurar suprimir el uso de explosivos, disminuir los vuelos en áreas de numerosa avifauna o directamente no registrar en áreas críticas de reservas donde pudiera afectarse de algún modo el ecosistema, por ejemplo si la contaminación acústica de los cañones de aire u otras fuentes altera el comportamiento de cetáceos, tortugas, calamares u otras especies con audición muy sensible. Por lo cual se establece iniciar con baja potencia de la fuente para provocar el alejamiento de estos animales hasta al menos 500 metros y tras 20 o 30 minutos comenzar recién los registros de rutina. Y no se debe trabajar en época de apareamiento o crianza de especies sensibles y/o en riesgo de extinción –aunque en muchas regiones del mundo la simple navegación de numerosísimos barcos (no sísmicos) hace que los pobres bichos marinos estén viviendo como en un permanente festival de *heavy rock* pésimamente interpretado–. Es también cierto que a veces se sobrevalora el impacto de la sísmica sobre los cardúmenes que son ahuyentados temporalmente: el muy petrolero mar del Norte, tan trillado con sísmica 3D, sigue siendo muy pesquero. (A la inversa, la biota del mar Argentino está siendo devastada por la pesca de arrastre de fondo desde grandes naves extranjeras sin control).



Arriba a la izquierda, tanque-bolsa para contener sustancias; abajo, sector de abastecimiento de combustible impermeabilizado evitando contaminación (fotos Geofísica Exploración YPF, Chubut) Arriba, picada sísmica que está recuperando su vegetación tras un año y medio gracias al movimiento de suelo mínimo realizado únicamente a los fines de la seguridad de los vibros (foto Tecpetrol, Chubut)

En la prospección terrestre debe abrirse la menor cantidad posible de picadas, para lo cual se suele recurrir a helicópteros, y, cuando la picada es inevitable, no debe removerse todo el espesor edáfico

para facilitar la recuperación de la cubierta vegetal natural (foto arriba), algo esencial en climas semiáridos.

Cuando se trabaja en zonas pobladas **deben respetarse las pautas culturales** de los habitantes, además de la obvia preservación de sus bienes materiales. Por ejemplo en trabajos con vibros ha de reducirse la potencia de vibración a valores acordes con la seguridad de las edificaciones más débiles, según sea la localización de los puntos de emisión respecto a éstas, o directamente suprimir la emisión sísmica cercana. En general los cuidados culturales y medioambientales tienen que ser realmente efectivos y no una mera tarea de maquillaje, como muchas veces lamentablemente aún ocurre. Existen normativas legales nacionales, provinciales e incluso municipales referidas a estos temas y todo trabajo prospectivo requiere de un **estudio de previsión de impacto ambiental** a cargo de profesionales especializados (biólogos, geólogos, etc.). Y **se ha de propender a la descarbonización** –minimizar emisiones de CO₂– empleando vehículos de motor eléctrico o al menos de alta eficiencia, miniaturizando equipos, consumiendo menos energía, acortando tiempos con mejores estrategias, etc. Lógicamente un cateo geofísico requiere la **solicitud de permisos de los superficiarios**, sean éstos particulares o el mismo Estado, en este último caso incluyendo aguas territoriales. En actividades terrestres se abona un canon por servidumbre, legalmente estipulado y reglamentado, en compensación por los inconvenientes causados a través de un desarrollo cuidadoso. En Argentina el decreto N° 861/96 y sus actualizaciones (como parte de la ley nacional 17.319) regula el concepto de **servidumbres mineras**, daños emergentes, lucro cesante y gastos de control y vigilancia inherentes a las actividades hidrocarburíferas que se desarrollan. Existen asimismo **normativas legales que se aplican a prospección de agua, minerales diversos y otras**, por ejemplo las contenidas en las leyes nacionales 24.498 (actualización minera) y 24.585 (protección ambiental) de 1995, luego más acabadamente definidas por la ley General de Ambiente 25.675 de 2002. Eventualmente puede haber casos en los que el propietario no deba percibir el pago de un canon, si la tarea de relevamiento tiene una magnitud y modalidad tal que el impacto es nulo, situación que puede darse, por ejemplo, en adquisición gravimétrica, magnetométrica, etc. Así como puede también suceder que, en casos de alto impacto, el monto normal de servidumbre no satisfaga al superficiario y éste pueda reclamar judicialmente un pago mayor o bien poner limitaciones extraordinarias previas a la ejecución de las labores de campo. Como ejemplo de judicialización puede mencionarse la situación derivada de un caso de prospección sísmica en el extremo sudeste de la provincia de Santa Cruz, cuenca Austral, donde en la década de 1980 una tranquera olvidada de cerrar representó una oportunidad de encuentro entre un grupo de ovejas cualesquiera y otra majada resultante de selección genética de rancio linaje, en época de celo...

SEGURIDAD Y SALUD OCUPACIONAL

Cordero al asador con vino tinto era menú frecuente en los tiempos heroicos, duros pero felices, hasta hace unas tres décadas. Y, salvo raras excepciones, los viejos tenían un excelente autocontrol ético. Hoy las normas son

estrictas, nada de fueguitos improvisados y cero alcohol. Súper razonable. Aunque desmotivante...

Pero en tantas facetas los tiempos cambiaron para mejor y cada vez más países aceptan y hasta promueven en trabajos de campo la enriquecedora participación de mujeres, de las otras diversidades de género y de personas con capacidades diferentes, y se procura evitar y eventualmente condenar las muchas variantes del acoso.

En Argentina las leyes 19.587 (de 1972) y 24.557 (de 1995) establecen las normas de **higiene y seguridad** respecto a los riesgos laborales y la salud ocupacional en sentido amplio. Han de seguirse rigurosos protocolos para no correr riesgos personales ni hacérselos correr a terceros, muy especialmente cuando se deba trabajar con elementos técnicos peligrosos (como ejemplos, cargas explosivas, sistemas de alto voltaje, etc., o material radiactivo en perfilaje de pozos). Lo mismo en el caso de entornos ocupacionales que entrañen riesgos geográficos, tales como pendientes fuertes, terrenos derrumbables, sectores cenagosos y otras características del área a transitar en la prospección terrestre. O en el mar, lagos o ríos, atender a las condiciones de navegación segura (corrientes, vientos, tránsito de otros buques y demás). Y en general todas las circunstancias del entorno laboral, incluyendo plantas y animales potencialmente peligrosos, riesgos climáticos (tornados, tormentas eléctricas, posibles inundaciones o aludes, etc.), como igualmente si hay población local problemática, bandas delictivas o conflictos de cualquier índole.

También debe disponerse de equipamiento y personal entrenado para primeros auxilios si es un grupo pequeño o la presencia de un paramédico y ambulancia en los grupos grandes. Y deben practicarse rutinas de extinción de incendios, evacuación segura y otras alternativas, según sea el ámbito de labores considerado.

Es siempre obligatoria la contratación de una **aseguradora de riesgos de trabajo** y deben realizarse exámenes médicos anuales a cargo del sector de **medicina laboral** para prevenir o controlar cualquier posible tipo de afección ocupacional. También es de gran utilidad la práctica empresaria de elaborar índices accidentológicos o de afecciones que pudieran ser atribuibles directa o indirectamente a las actividades laborales. El seguimiento de tales indicadores estadísticos permitirá una mejor implementación de políticas preventivas y optimizar los protocolos a ese fin. Debe propenderse a una muy efectiva cultura de la seguridad y la salud en la que sean contemplados también los diversos factores psico y sociológicos, incluyendo las posibles adicciones.

En síntesis, ni el medioambiente ni la salud ocupacional debieran ser nunca variables de la ecuación económica de las labores de prospección geofísica, como no debieran serlo de ninguna actividad humana en general. Objetivos de difícil logro en países cuyos habitantes arrojan basura a la calle y puchos al costado de la ruta, o votan gobernantes que ya en campaña prometen fomentar la precarización laboral, a la vez que denostan las políticas solidarias. O gobernantes que avalan arrasar bosques nativos para plantar soja, o que directamente niegan la abrumadora evidencia del cambio climático inducido y la ciencia en general.

A pesar de eso –o por eso mismo– debemos seguir bregando por un mundo mejor.



(caricatura de Illustrator)

CUESTIONARIO BÁSICO

- ¿Cuáles son los dos tipos básicos de ondículas y a qué fuentes corresponden en general?
- ¿Qué distintos tipos de fuentes de energía sísmica pueden utilizarse en mar y en tierra?, ¿cuáles se usan más?
- Explicar brevemente el principio de funcionamiento de los geófonos e hidrófonos y cómo se conectan entre sí.
- ¿Qué elementos tiene y qué funciones realiza un sismógrafo?
- Comentar situaciones no convencionales en cuanto a fuentes de energía, sismógrafos y transportes.
- ¿Cuáles son las consideraciones principales a tener acerca del impacto ambiental?
- ¿Cómo se previenen las problemáticas referidas a la seguridad y salud ocupacional?

BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA

- Attia, H., Gaya, S., Alamoudi, A., Alshehri, F., Al-Suhaimi, A., Alsulaim, N., Al Naser, A., Eddin, M. Alqahtani, A., Rojas, J., Al-Dharrab, S. & Al-Dirini, F., 2020. Wireless geophone sensing system for real-time seismic data acquisition. IEEE Access, V.8 (p. 81116-81128).

- Barbier, M., Bondon, P., Mellinger, R. & Viallix, J., 1976. Mini-Sosie for land seismology. *Geophysical Prospecting*, V.24 N°3 (p 518–527).
- Bittgenbach, T. & Schieisiek, K., 2002. 4-C system goes ultradeep. *Hart's E&P*, January (p 67-69).
- Burger, H., 1992. *Exploration geophysics of the shallow subsurface* (p 42-56). Prentice-Hall.
- Cantos Figuerola, J., 1972. *Tratado de geofísica aplicada* (p 204-234). Librería de Ciencia e Industria.
- Cui, X., Tian, Z., Cui, S. & Jin, Q., 2017. Development of a new blasting vibroseis technique and its application to the exploration of geological structures. *International Journal of Technology*, N°5 (p 789-799).
- Dobrin, M., 1976. *Introduction to geophysical prospecting* (p 58-77). McGraw-Hill.
- Duan, H., Zhu, P. & Peng, S., 2023. Characteristic and processing method of SH-wave data generated by vibroseis source. *Journal of Applied Geophysics*, V.214 (12 p).
- Drim, K., Reveleigh, M. & Bartlett, K., 2001. Mini-Sosie – Successful shallow 3D seismic data acquisition in an environmentally sensitive area. *A.S.E.G. Extended Abstracts*, V.1 (4 p).
- Evans, B., 1997. *Seismic energy sources, a handbook for seismic data acquisition in exploration* (305 p). Society of Exploration Geophysicists.
- Gibson, D. & Rice, S., 2003. Fomento de la responsabilidad ambiental en operaciones sísmicas. *Oilfield Review* V.15 N°2 (p 10-21).
- Godfrey, L., Stewart, J. & Schweiger, F., 1968. Application of Dinoseis in Canada. *Geophysics*, V.33 N°1 (p 65–77).
- Griffiths & King, 1972. *Geofísica aplicada para ingenieros y geólogos* (p 85-104 y 133-145). Editorial Paraninfo.
- Hanssen, P., 2018. Economical viability utilizing environmentally friendlier acquisition strategies. *EAGE 80° Annual Conference-Exhibition* (5 p).
- Klicksberg, B., 2002. *Ética y desarrollo, la relación marginada* (465 p). Editorial El Ateneo.
- McCauley, R., Fewtrell, J., Duncan, A., Jenner, C., Jenner, M-N., Penrose, J., Prince, R., Adhitya, A., Murdoch, J., & McCabe, K., 2000. *Marine seismic surveys: A study of environmental implications*. *APPEA Journal* (p 692-708).
- McQuillin, R., Bacon, M. & Barclay, W., 1985. *An introduction to seismic interpretation* (p 17-36). Gulf Publishing.
- Naghizadeh, M., Crook, A., Montano, M., Birce, A., Hons, M. & Ross, S., 2023. Decarbonization of seismic survey acquisitions. *SPE/AAPG/SEG Latin America Unconventional Resources Technology Conference*, V.1 (201-206).
- OGC & IAGC, 2011. *An overview of marine seismic operations*. Report N°448 (43p).
- Orji O., Oscarsson-Nagel, M., Söllner, W., Asgedom, E., Trætten, Ø. & Voldsbekk, R., 2020. The music of marine seismic: A marine vibrator system based on folded surfaces. *The Leading Edge*, V.39 N°4 (p 254-263).
- Peng, X., Sun, J., Li, Y., Teng, Z. & Hao, L., 2025. Modeling and analysis of a shear-wave vibrator-ground coupled system dynamics. *International Journal of Mechanical Sciences*, V.289 (12 p).
- Prarnik, B., Lee Bell, M., Grier, A. & Lindsay, A., 2015. Field testing the AquaVib: An alternate marine seismic source. *SEG Technical Program Expanded Abstracts* (p 181-185).
- Robinson, E. & Coruh, C., 1988. *Basic exploration geophysics* (p 117-139). John Wiley & Sons.
- Sharma, P., 1976. *Geophysical methods in geology* (p 43-46). Elsevier Scientific Publishing Co.
- Sheriff, R., 1991. *Encyclopedic dictionary of exploration geophysics* (376 p). Society of Exploration Geophysicists.
- Sheriff, R. & Geldart, L., 1995. *Exploration seismology* (p 191-240). Cambridge University Press.
- Stone C. & Tasker, M., 2006. The effects of seismic airguns on cetaceans in UK waters. *J. Cetacean Res. Manage*, V.8 N°3 (p 255-263).
- Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R. & Keys, D., 1976. *Applied geophysics* (p 308-346). Cambridge University Press.
- YPF S.A. *Geofísica, Vicepresidencia de Exploración y Producción*, 2007. *Manual de seguridad* (210 p).
- Zhao, M., Qiu, X., Wang, P., Xia S., Li, Y., Xu, H., Ye, C. & Kang, Y., 2008. Large volume air-gun sources and its seismic waveform characters. *Chinese Journal of Geophysics*, V.51 N°2 (p 400-408).

Los posibles errores y sesgos contenidos en estas Glosas de Geofísica son sólo atribuibles al primero de los autores.