

SEGUIMIENTO DE LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA: ESTACIONES MULTIPARAMÉTRICAS Y SISTEMAS DE COMUNICACIONES.

M. Tárraga¹, R. Abella¹, R. Ortiz¹, A. García¹, M. Astiz²

¹ Dpto. de Volcanología. Museo Nacional de Ciencias Naturales. CSIC. C/ José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid

² Dpto. de Matemática Aplicada. E.T.S. Arquitectura. UPM. Avda. Juan de Herrera, 4. 28040 Madrid

INTRODUCCIÓN

La única manera de percibir y poder evaluar el estado de actividad de un volcán y el riesgo asociado, es a través de la observación y vigilancia sistemática mediante diversos métodos visuales e instrumentales. Si éstos se aplican de forma anticipada en las fases previas a un proceso eruptivo es posible, en la mayoría de los casos, detectar oportunamente un cambio cualitativo y cuantitativo de la actividad. Esto incluso puede conducir a una predicción a corto plazo de un proceso eruptivo inminente y poner en marcha un plan de emergencia previamente establecido.

En relación con la erupción volcánica, hay que considerar gran variedad de fenómenos: la emisión de lavas, piroclastos y gases, terremotos volcánicos, deformaciones corticales, procesos geotérmicos, etc. Por tanto, la vigilancia de volcanes debe cubrir todo este tipo de fenómenos.

El seguimiento de la actividad de un volcán, en general supone situar una serie de sensores en sus proximidades y recibir los datos con el mínimo retardo posible en el centro en el que se procede a su análisis. La instrumentación para el seguimiento de la actividad volcánica es muy variada; un resumen de los distintos equipos que se pueden instalar viene reflejado en la tabla 1.

A pesar de lo diferentes que son las medidas a realizar podemos simplificar conceptualmente toda esta instrumentación a tres elementos. En un primer lugar estarían los sensores característicos de cada magnitud a medir y, común a todos ellos, estarían por un lado los enlaces y líneas de transmisión y por otro los sistemas de registro y procesado de datos. Los métodos más utilizados para el seguimiento de la actividad volcánica son la medida de la actividad sísmica y la medida de deformaciones.

INSTRUMENTACIÓN RECOMENDADA PARA EL SEGUIMIENTO DE LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA.	
SÍSMICA	<ul style="list-style-type: none"> • Una estación digital en registro continuo. • Red telemétrica en tiempo real (3 ó 4 estaciones). • Estaciones autónomas (4). • Array sísmico (4 módulos de 8 canales).
DEFORMACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> • Clinómetros de dos componentes. • Distanciómetro.
METEOROLOGÍA	<ul style="list-style-type: none"> • Estación meteorológica: <ul style="list-style-type: none"> - Veleta. - Anemómetro. - Pluviómetro.
VOLCANOMAGNETISMO	<ul style="list-style-type: none"> • Red de magnetómetros
GASES	<ul style="list-style-type: none"> • Laboratorio para muestreo y análisis de gases: <ul style="list-style-type: none"> - CO₂, CO, SO₂, H₂S, H₂O
TEMPERATURA	<ul style="list-style-type: none"> • Termómetros: <ul style="list-style-type: none"> - Termopar para 1200 °C. - Termómetro de radiación o cámara térmica.
EMISIÓN ACÚSTICA	<ul style="list-style-type: none"> • Microbarógrafo.
VISUAL	<ul style="list-style-type: none"> • Cámara y sistema de vídeo digital.

Tabla 1. Instrumentación recomendada para la instalación de un Observatorio Volcanológico.

ESTACIÓN SÍSMICA DIGITAL DE 24 BITS

Las estaciones sísmicas tradicionales están compuestas por

Un geófono que convierte los movimientos del suelo en señales eléctricas

Un preamplificador encargado de amplificar la señal que pueda ser tratada por un sistema de adquisición de datos

Un filtro anti-aliasing para limitar la frecuencia de respuesta según la velocidad de muestro del sistema

Un sistema de adquisición de datos con conversor analógico digital

Un ordenador.

El preamplificador es un elemento crítico en todo diseño ya que, si no se diseña con muchos circuitos integrados y muchos componentes, puede causar numerosos problemas porque introduce un nivel de offset, aumenta el nivel de ruido y limita el rango dinámico. Una solución a estos problemas es utilizar un conversor A-D de alta resolución como el AD7710 de Analog

Device (Analog Device, 1991). Este conversor incorpora un preamplificador y un filtro digital, que, por ello, no depende de las variaciones de los sistemas analógicos. De esta manera, la estación sísmica queda reducida a un geófono, un conversor analógico digital y un ordenador.

Conversor Analógico Digital

La propiedad característica de un conversor analógico digital (CAD) es que es capaz de generar un registro digital a partir de una señal eléctrica analógica generada por un sensor. Este registro ya puede ser tratado y almacenado de forma digital.

El conversor cuantifica la señal analógica en distintas porciones del valor de un potencial de referencia usado. Un CAD tiene 2^N códigos, siendo N es el número de bits del conversor. En la actualidad existen conversores de hasta 24 bits. Cuanto mayor es el número de bits, menor es el bit menos significativo LSB (Less Significant Bit) y por tanto mayor es la resolución del conversor. La resolución que tiene el CAD vendrá dada por la mínima cantidad que puede llegar a detectar. De esta forma, si el voltaje de entrada varía, por ejemplo, entre -3 y $+3$ Voltios, el LSB o una cuenta será

$$LSB = \frac{6\text{voltios}}{2^N}$$

En el caso de un CAD de 24 bits una cuenta será $0.36\mu\text{V}$.

Los errores que tienen los CAD son:

Error de Cuantificación: la relación entre la entrada analógica (voltios) y la salida digital (números) es lineal, y la resolución es igual al incremento más pequeño que puede experimentar la señal digital. Entonces, el error es siempre menor al bit menos significativo.

Error de cero o de offset: para una tensión de entrada igual a cero le puede corresponder una salida digital distinta de cero.

Error de linealidad: la relación entre la señal analógica y la digital tiene ligeras variaciones de la dependencia lineal que debería tener. Este problema solo se puede compensar por software.

Error de amplificación: la discrepancia entre la salida real y la salida teórica aumenta con el valor de la entrada.

Error de monotonidad: cuando a una señal creciente analógica no le corresponde una señal creciente digital.

Podemos dividir las distintas arquitecturas para los CAD en cuatro tipos bien diferenciados, cada una con sus particularidades características. Una representación de estos cuatro tipos en función de la resolución y la frecuencia de muestreo aparece en la figura 1.

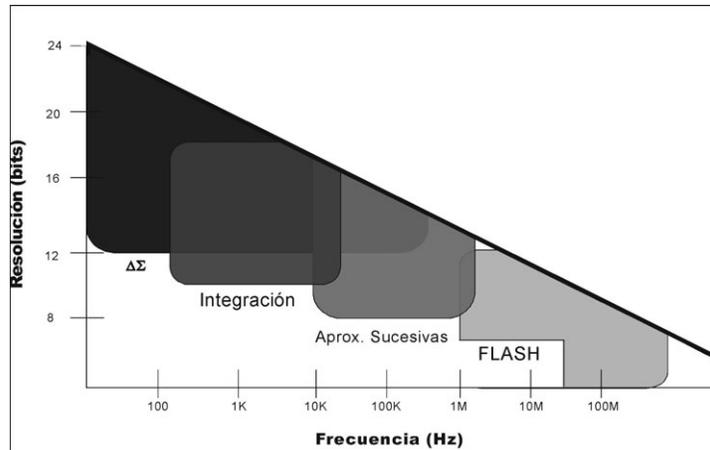


Figura 1. Relación entre la velocidad y la resolución de los CAD.

Los cuatro tipos son

CAD flash: son convertidores de gran velocidad de muestreo. La conversión se realiza con un solo pulso de reloj. Es utilizada para frecuencias muy altas (por encima de 1MHz), pero su resolución es baja (menor que 12 bits). Se utiliza para vídeo digital o radar.

CAD de aproximaciones sucesivas: son convertidores utilizados con un rango de frecuencias intermedias, entre 10KHz y 1 MHz. Usados para multiplexar varios canales pero con baja información en frecuencias. Presentan una excelente linealidad y elevada precisión pudiéndose alcanzar hasta 16 bits de resolución a bajo costo. La conversión la hacen comparando con un valor: si es menor que este valor comparan con la mitad de éste y así sucesivamente; de igual modo se realiza si es mayor. Algunos de estos convertidores se han utilizado en sismica pero con baja resolución.

CAD de integración: para realizar la conversión, miden el tiempo transcurrido entre el momento en que se abre el interruptor y el momento en el que la carga del condensador del integrador hace conmutar al comparador, es decir el tiempo que tarda en alcanzar un valor determinado. Esta operación se realiza con N+1 golpes de reloj, siendo N el número de bits. La mayoría de los voltímetros digitales que se encuentran en el mercado operan con este tipo de convertidores.

CAD $\Delta\Sigma$: son convertidores de sobremuestreo y actúan bien a frecuencias por debajo de 200 KHz. Tienen gran resolución conseguida gracias a un sobremuestreo y a un filtro digital. La comparación se realiza con un solo bit: si es mayor se le suma otro y así sucesivamente; por eso se le conoce también como convertidor de seguimiento. Este proceso se realiza a frecuencias de muestreo muy rápidas en comparación con la frecuencia que está siendo digitalizada. El sobremuestreo por si solo no es suficiente para conseguir esta alta resolución por lo que lleva además un filtro digital.

A pesar de que los conversores A-D tienen una resolución teórica de 24 bits trabajamos con una resolución de 16 bits. Para las señales sísmicas que nos interesa estudiar nos basta con una resolución de 2^{16} , ya que sólo con terremotos grandes se saturaría la señal. El ruido térmico generado por los componentes o los contactos es mayor que 2^{-16} . Esto implica que usando un sobremuestreo y un procesamiento digital posterior se pueden obtener mayores resoluciones. Con esta resolución tenemos un buen compromiso entre la calidad de los datos y la extensión de los ficheros

El CAD utilizado para las estaciones sísmicas es el AD7710 (Analog Device, 1991) de 24 bits que es un convertidor para aplicaciones de medida de baja frecuencia. Acepta señales de bajo nivel directamente de un medidor de deformación, un transductor o una salida digital por puerto serie. Usa la tecnología Delta-Sigma y tiene un control de la amplificación con rango entre 2^0 y 2^7 . La salida del modulador está procesada por un filtro digital anti-aliasing. De esta manera se puede conectar directamente el sensor al convertidor sin necesidad de conectar ningún circuito auxiliar.

Este convertidor puede operar con una resolución de 16 ó 24 bits. El límite de ruido que tiene el sistema dependerá de la resolución con la que estemos trabajando, de forma que a 24 bits el ruido está por debajo de 10 Hz, a 20 bits es del orden de 100 Hz y a 16 bits de 200 Hz. Esta limitación no presenta ningún problema para las aplicaciones relativas a la sismicidad volcánica y a otros tipos de señales volcánicas ya que el ruido propio del sensor está siempre por encima de estos límites.

El uso práctico de los convertidores de 24 bits requiere el uso de la transferencia de datos vía serie. Esto no es un gran problema ya que la frecuencia de muestreo es relativamente lenta. Cuando se usan tres o cuatro componentes, el tiempo que se necesita para leer los datos es el mismo que si se tuvieran que leer series de 3 ó 4 bits. Cuando se usan estos convertidores, hay que tener especial cuidado con el ruido ya que un aumento de la resolución del convertidor bajo condiciones de ruido en la entrada provocaría un registro de datos inservibles por su mala relación señal-ruido.

Debido al sobremuestreo, un simple circuito RC hace de filtro anti-aliasing. Por lo tanto, debe ser cuidadosamente diseñado, debido a los altos valores de la resistencia de entrada ya que el ruido térmico generado es mayor que el bit menos significativo. El filtro incluido en este chip tiene una respuesta del tipo $((\text{sen}X)/X)^3$. El convertidor AD7710 puede operar en diferentes modos, de esta manera se eligen la frecuencia de corte del filtro y la frecuencia de muestreo a través del código de 24 bits que es escrito en el registro de control.

El AD7710 opera con un reloj de 10MHz (reloj principal). Este reloj es tomado directamente de un oscilador de cristal de cuarzo interno. Si se quieren usar varios convertidores sincronizados, se utiliza un oscilador externo.

Para la salida de los datos y la entrada del código de operación se usa un protocolo de comunicaciones serie con una línea bidireccional para los datos (SDATA, datos serie) y otra para el reloj.

MEDIDA DE DEFORMACIÓN

Cuando un volcán está en reposo, o bien el punto de observación está alejado, las deformaciones que se producen son muy pequeñas, tan pequeñas que están por debajo de la resolución de las técnicas geodésicas más avanzadas. Además, en muchos casos se desea la medida continua de la deformación, lo cual se realiza mediante una serie de instrumentos diseñados específicamente. El mayor problema radica en que estas pequeñas deformaciones que pretendemos medir son menores que los efectos provocados por otros factores como la temperatura, el viento, las mareas, los cambios de presión, etc. Por ello, cuando se pretende alcanzar un determinado nivel de detectabilidad, la instrumentación se complica, debiendo manejar cada vez más parámetros para poder corregir las lecturas de todos estos efectos indirectos.

La primera condición es que estos instrumentos van a requerir un emplazamiento muy bien seleccionado y donde las perturbaciones sean mínimas. Después se necesitará una fuente de energía relativamente importante porque van a ser muchos los instrumentos que van a operar y finalmente se requiere un sistema de telemetría, adquisición y proceso de datos. En general, estos instrumentos sólo se pueden disponer en galerías subterráneas (JMA, 1995), donde la temperatura sea estable y en las que no circule agua en sus proximidades. Una solución alternativa es la utilización de cuevas, túneles lávicos (Arnosó et al., 1997), pozo (“borehole”), sondeos o incluso el sótano de algunos edificios.

Existe una gran variedad de instrumentos para la medida de pequeñas deformaciones, pero que en realidad se pueden reducir a dos tipos fundamentales: extensómetros y clinómetros, a los que debemos añadir los instrumentos de medida indirecta de la deformación, como son los gravímetros y mareógrafos (tabla 2).

Familia		Objetivo
Extensómetro		Medida de distancias entre dos puntos
Clinómetro	Nivel	Inclinación en larga base
	Péndulo	Inclinación puntual
Indirectos	Mareógrafo	Variación de nivel del mar o lago
	Gravímetro	Variación de la gravedad

Tabla 2. Instrumentación para pequeñas deformaciones

Todos ellos, gracias a los dispositivos electrónicos de que van dotados, pueden alcanzar una resolución muy elevada, pero que en la práctica está limitada por las perturbaciones de otros parámetros sobre el instrumento y lo que es más difícil de conocer, sobre el propio medio en el que está instalado. La investigación sobre el modelado de estos efectos indirectos es hoy el

caballo de batalla para que estos instrumentos sean de utilidad práctica en la vigilancia de volcanes.

La base de todos estos instrumentos la constituye el sensor electrónico de desplazamiento. De estos hay múltiples tipos, aunque se pueden reducir a unas pocas familias. En la tabla 2 se recogen los tipos más utilizados

Familia		Montaje	Medida
Capacitivo	Simple	Oscilador	Frecuencia
	Diferencial	Montaje en puente	Tensión
Inductivo	Inductancia	Oscilador	Frecuencia
	Diferencial	Transformador diferencial	Tensión
	Reluctancia	Pérdidas circuito oscilante	Tensión
Magnético	Núcleo saturado	Transformador diferencial	Tensión
	Magnetorresistencia	Montaje en puente	Tensión
	Efecto Hall	Elemento Hall	Tensión
Óptico	Interferométrico	Láser	Frecuencia

Tabla 3. Tipos de sensores de desplazamiento

De todos los captadores de desplazamiento, el captador capacitivo es el más sencillo y económico y se puede construir sin demasiados problemas (figura 2). Además constituye una buena experiencia de tipo didáctico para familiarizarse con la medida de pequeños desplazamientos. En función de las características mecánicas del instrumento se elige el circuito de medida.

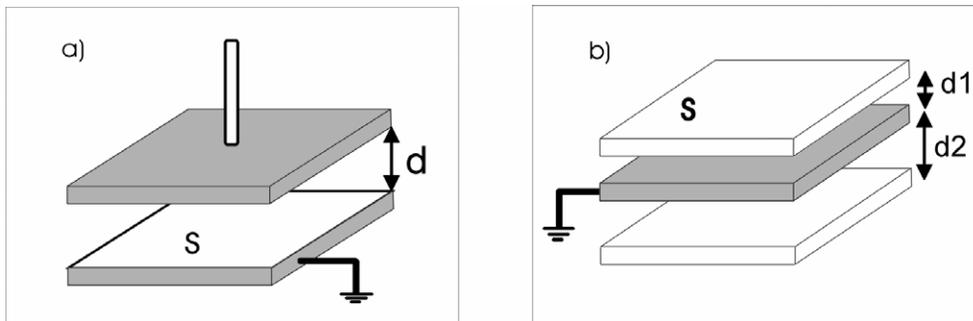


Figura 2. Principio de funcionamiento de un captador: (a) Capacitivo normal y (b) diferencial

En algunos casos se puede realizar un montaje diferencial que, si bien complica la mecánica permite obtener mejor linealidad y resolución, siendo especialmente menos sensible a las variaciones de temperatura (figura 2).

EXTENSÓMETRO

Un extensómetro es un instrumento muy simple y que, sin embargo, puede alcanzar grandes sensibilidades. Pueden utilizarse para aplicaciones típicas de ingeniería como es la medida directa de la deformación en una construcción, o para el registro de las mareas terrestres o sismología de banda ancha. Aplicaciones propias en volcanología incluyen el control de las fracturas abiertas en el curso de una erupción, evolución de un domo, control geodésico de intrusiones, colapsos de laderas, evolución de calderas, etc. Las dimensiones de los extensómetros van desde unos pocos milímetros, utilizados en la industria para la medida de la deformación en materiales o el control de grietas, a varias decenas de metros en las aplicaciones de geofísica básica y geodinámica.

Un extensómetro típico utilizado en volcanología (Agnew, 1986) consiste en una barra, tubo o hilo sujeto a la roca por un extremo y a un captador de desplazamiento en el otro. La deformación de la roca se traduce en una variación de la distancia entre el extremo libre del extensómetro y la roca; el captador de desplazamiento da la medida directa de la deformación. En función de la sensibilidad que se quiera alcanzar se puede utilizar uno u otro tipo de sensor. En cada caso es necesario ensayar cual puede ser la mejor solución.

Existen varios tipos de extensómetros que podemos clasificar en tres grupos diferentes: de hilo, de barra y ópticos. Para medir deformaciones muy pequeñas en grandes extensiones hay que acudir a un extensómetro de tipo rígido o de barra. Este extensómetro consta de un tubo de material no deformable y bajo coeficiente de dilatación térmica, como cuarzo, porcelana, invar o inox, sujeto firmemente por un extremo a la roca. En el extremo libre se sitúa un captador de desplazamiento que mide la distancia entre una armadura fija a la roca y el extremo del tubo. Si el extensómetro es muy largo hay que incluir periódicamente un conjunto de soportes y suspensiones. Un sistema muy eficaz de suspensión desarrollado por el Prof. Cai Weixin del Instituto de Sismología del State Seismological Bureau de Wuhan (China) consiste en utilizar una suspensión de hilo doble. De esta forma es posible centrar el tubo del extensómetro en vertical y horizontal. Los pequeños desplazamientos de los dos hilos que forman la suspensión se consigue girando los tornillos que sujetan los hilos. La poca altura de estas suspensiones comparada con la longitud del extensómetro y la necesaria estabilidad térmica del emplazamiento, hacen que sea despreciable el efecto térmico sobre la suspensión. Esto permite construir los puentes y los soportes de las cabeceras en materiales fácilmente mecanizables como el latón. Algunos factores que deben considerarse al seleccionar el sensor son el margen de variación de longitud a medir, la amplitud de la oscilación de temperatura en el emplazamiento o la posibilidad de que el agua inunde al captor (figura 3)

La instalación de un extensómetro para aplicaciones geodésicas plantea muchos problemas en cuanto a estabilidad de la temperatura de la roca. Sólo instalaciones en túneles con más de 100 m de cobertera rocosa permiten eliminar la influencia de las variaciones estacionales de temperatura. Para poder determinar el estado tensional de la roca es necesario disponer de un mínimo de tres extensómetros a 120°.

El lugar más idóneo para la instalación de un extensómetro es en el interior de un túnel, en el cual las variaciones de temperatura son más suaves. Como esto, no siempre es posible, se realizan extensómetros de pequeñas dimensiones, y se entierran. A este tipo se le conoce como extensómetros de pozo o “borehole”. Dependiendo del grado de deformación al que está siendo sometido el edificio volcánico podemos desprestigiar los efectos térmicos. Uno de los mayores problemas que hay que controlar, tanto en instalaciones en el interior de túneles como en el exterior, es el de la corrosión de los instrumentos debido a la humedad.

En volcanología, el monitoreo de la actividad del volcán a varios kilómetros del mismo, requiere también el emplazamiento de los extensómetros en túneles. Sin embargo, otras muchas de las aplicaciones se realizan con extensómetros de pequeñas dimensiones que se emplazan al aire libre, o a lo sumo con una pequeña protección. La gran magnitud de los fenómenos a controlar permite desprestigiar los efectos térmicos. Sin embargo, se deberá cuidar, especialmente en estos casos, el problema de la corrosión.

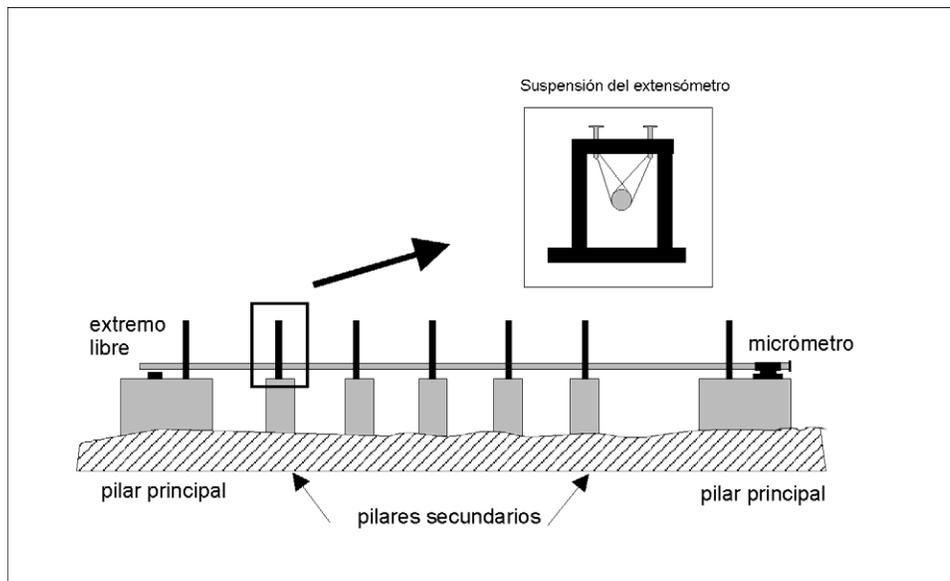


Figura 3. Esquema de un extensómetro horizontal. Detalle del sistema de suspensión.

La evolución de un domo puede seguirse a distancia con extensómetros situados en los taludes del domo (siempre que alguien pueda instalarlos). Las fracturas activas en muchas áreas volcánicas son en ocasiones identificables y por ello se puede hacer un seguimiento instrumental. Extensómetros situados a cada lado de la fractura permiten hacer un seguimiento

de la evolución de la misma. Esta misma técnica se utiliza para el control de la deformación en laderas o el colapso de taludes.

En todos los casos en que el extensómetro se emplace en el exterior deberá, en lo posible, aislarse térmicamente y protegerlo de las inclemencias del tiempo. Hay que cuidar que la protección no altere la marcha del instrumento, debe poderse deformar con el terreno y además ser lo suficientemente resistente. El mismo tipo de protección se aplicará a la cabeza sensora, donde además habrá que cuidar la protección contra los gases, en caso de existir. Para ello lo mejor es encerrar todo el conjunto dentro de una caja hermética, entrando la barra del extensómetro a través de un fuelle. Para los extensómetros de cable se hará un pasamuros mediante una junta llena de grasa de silicona.

CLINÓMETROS

Otro de los sensores utilizados para la medida de la deformación son los clinómetros. En función del diseño de éstos, los podemos clasificarlos en clinómetros de base corta o base larga. De los de base corta tenemos tres tipos fundamentales: los péndulos horizontales, los clinómetros de burbuja y los péndulos simples.

Los péndulos horizontales basan su funcionamiento en la suspensión de Zöllner. Este tipo de suspensión se fundamenta en la amplificación de las oscilaciones del péndulo mediante una suspensión bifilar. En la actualidad es el péndulo de Verbaandert y Melchior (VM) el que mejores resultados proporciona, aunque existen otros más como los de tipo Ostrovsky, Blum, etc. Su uso más extendido es para el estudio de mareas. Estos péndulos VM constan de una estructura rígida fijada, mediante una basada, a 3 tornillos de nivelación (figura 4) . De su estructura principal pende el brazo del péndulo, en cuyo extremo se localiza la masa, que esta fijada en dos posiciones, de tal forma que permiten un movimiento de rotación cuyo eje es la línea que une los puntos A y B señalados en la figura. Descripciones más detalladas pueden verse en (Agnew, 1986) y (Vieira et al., 1989).

Los clinómetros de burbuja basan su funcionamiento en la sensibilidad a la inclinación que presenta una burbuja introducida en una superficie curva y con cuatro electrodos situados en forma de cuadrado, de forma que pueden detectar inclinación en los dos ejes. Si la curvatura es pequeña, las pequeñas inclinaciones producirán desplazamientos grandes de la burbuja (figura 4)

El péndulo simple es mucho más fácil de construir que un péndulo horizontal y con sensores capacitivos puede alcanzar con longitudes de 300 mm sensibilidades de mareas. La instalación típica es en agujeros verticales subterráneos, por lo que se les conoce también como “borehole” (“hoyo perforado”). La instalación es muy complicada, ya que la inclinación del péndulo vertical no debe ser superior a 0.1 rad.

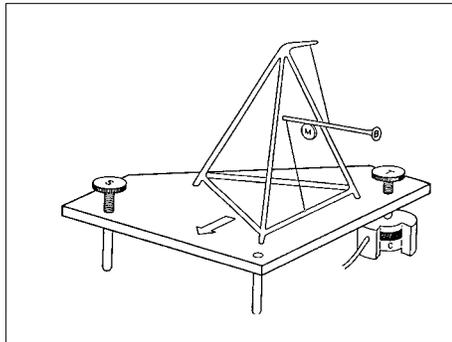
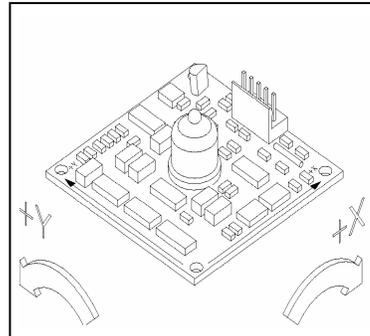


Figura 4. Péndulo horizontal de Verbaandert-Melchior



Clinómetro de burbuja con la plataforma niveladora

Clinómetro de larga base o de agua (Water Tube). Son instrumentos que presentan unas excelentes características, bajo costo y pueden construirse fácilmente. Su sensibilidad se puede adaptar con facilidad a las condiciones de trabajo más variables y sólo está limitada por las condiciones del emplazamiento, especialmente la estabilidad térmica del mismo. El empleo de agua como indicador también limita la utilización de estos clinómetros a zonas donde las temperaturas no desciendan por debajo de los 5 °C.

El instrumento es un sistema de vasos comunicantes que consta de dos depósitos unidos por un tubo lleno de agua. Cuando se trata de instrumentos de considerable longitud se añade otro tubo para igualar la presión de los dos depósitos y disminuir el ruido provocado por la circulación de aire. Las dos cabezas se disponen sobre pilares sólidamente anclados en la roca. Para soportar el sistema de tubos se dispone una serie de pilares intermedios. Los mejores resultados se obtienen con tubos de unión entre los depósitos rígidos (tubo de vidrio), pero en muchos casos se pueden utilizar satisfactoriamente tubo de plástico flexible (figura 5).

Dentro de cada depósito hay un flotador cuya posición se mide mediante un sensor de desplazamiento, que puede ser capacitivo, de inducción o de reluctancia variable. En algunas realizaciones se ha dispuesto de un sistema interferométrico. Estos instrumentos tienen una gran tradición en la vigilancia de volcanes, pues fueron los primeros que se utilizaron en los volcanes hawaianos (Delaney et al., 1993). En estas primeras realizaciones la medida de las inclinaciones se realizaba mediante un sistema micrométrico que se observaba visualmente.

La distancia entre las dos cabezas suele ser del orden de varias decenas de metros y depende de la sensibilidad que se quiera alcanzar y de las disponibilidades de espacio. Como en todos estos instrumentos, las variaciones de temperatura establecen el límite de la sensibilidad del instrumento, tanto en sus efectos directos, que se pueden parcialmente corregir posteriormente en el procesado de los datos, como por su efecto en las rocas que es muy difícil de modelar.

Hay que disponer una capa de aceite encima del agua para evitar pérdidas por evaporación. Igualmente hay que cuidar que no exista ninguna pérdida por goteo. A pesar de todas las precauciones siempre se produce alguna pérdida de agua, por lo que es necesario colocar dos

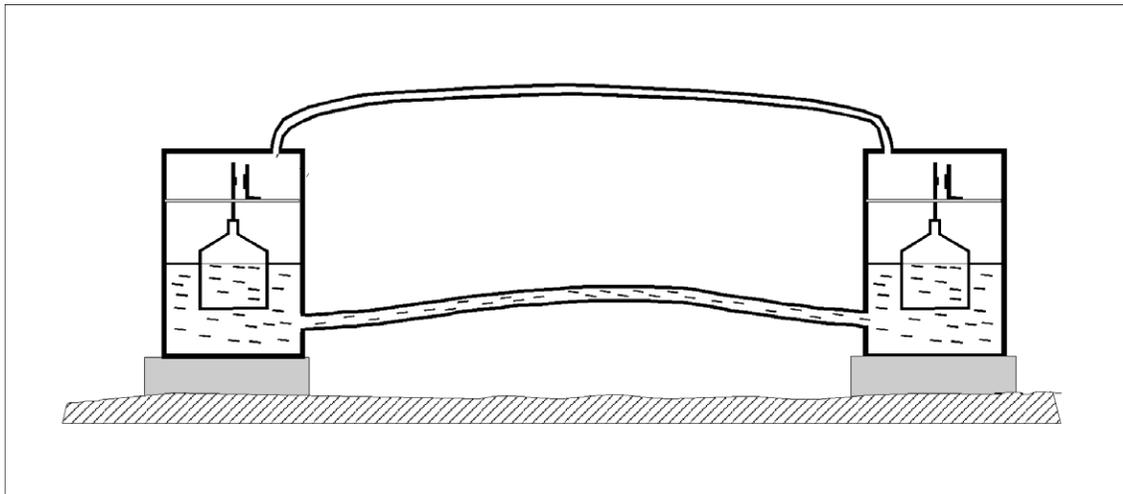


Figura 5. Esquema de un clinómetro de agua

cabezas activas para poder compensar las variaciones de nivel debidas a las pérdidas que afectan por igual a ambas cabezas. La relación de diámetros entre las cabezas y los tubos de conexión define la frecuencia propia del sistema. Es importante alejar esta frecuencia del ruido microsísmico de la zona, especialmente importante en regiones costeras.

CONTROLADOR

Los sistemas de adquisición de datos para las medidas de deformación son similares a los SAD utilizados para las estaciones sísmicas, ya que están basadas en el mismo CAD. El sistema de tiempo es también similar al descrito anteriormente.

El gran número de sensores que podemos tener instalado para realizar el seguimiento de la actividad volcánica hace necesaria la existencia de un controlador que regule la toma de datos. El hecho de que cada canal tuviera asociado un ordenador para el almacenaje de sus datos carece de sentido. Por este motivo, se ha desarrollado un concentrador de señales.

El controlador es un concentrador de señales que nos permite introducir hasta 8 canales con sus distintos sensores, como clinómetro, extensómetro, termómetro, GPS, etc. Su funcionamiento es controlado por un microcontrolador PIC 16C54 que es el encargado de comprobar que canales están conectados y además gestiona la entrada de datos. El PIC se puede programar para que diferentes sensores tengan distintas frecuencias de muestreo aunque por lo general todos los sensores tienen la misma frecuencia. Las muestras son promediadas de forma que finalmente solo disponemos de una muestra por minuto.

El protocolo de comunicaciones que se ha elegido es el estándar 485, protocolo de bajo nivel, que nos permite mandar los datos vía puerto serie y comunica directamente en tiempo real los sensores con un computador central. También es posible mandar la señal por un modem radio

hasta la estación central. Una de las características principales del controlador es que se puede instalar en modo cascada, esto es, por un canal podemos introducir los datos de otro concentrador y de esta forma podemos tener en lugar de 8, 16 o incluso más canales activos.

SISTEMAS DE COMUNICACIONES

Uno de los aspectos importantes en el seguimiento y evaluación inmediata de los fenómenos volcánicos es contar con un sistema de comunicaciones que permita la centralización y acceso inmediato a todos los datos disponibles (Quaas et al., 1995). Actualmente, existe un amplio desarrollo en tecnologías de la comunicación, pero con un coste demasiado elevado para su aplicación en regiones de riesgo volcánico moderado o para vigilar volcanes que no están en crisis; sin embargo, un cuidadoso estudio de las diferentes opciones permite aprovechar las ventajas que ofrecen las distintas tecnologías a un precio razonable. Telefonía móvil o fija, radioenlaces VHF, UHF y especialmente *spread spectrum* o satélite son algunas de estas tecnologías, a las que se debe añadir la conexión a la red INTERNET para el acceso remoto y múltiple a los datos. En general, la elección de un tipo de transmisión va a requerir adaptar, comprimir y, en algunos casos, reducir el volumen de datos a transmitir. Esta operación es muy delicada, debiéndose conocer muy bien cuál es la información importante a transmitir, de otro modo puede ser que se transmitan datos muy significativos, a efectos de investigación, pero poco relevantes para pronosticar cuál es la evolución del volcán o de una crisis. Es importante tener también presente que en caso de crisis muchas de estas tecnologías de comunicación fallan, por ello es imprescindible tener un sistema redundante que permita seguir recibiendo datos en el centro de control de la crisis. Un sistema radio punto a punto entre las estaciones remotas y los nodos, normalmente situados en los centros locales de recepción de datos (ceranos al volcán), combinado con un enlace entre éstos y el centro de registro o centro de recepción de datos situado a varios kilómetros del volcán, mediante vía telefónica en condiciones normales y satélite en caso de crisis, es hoy una de las mejores opciones. (figura 6)

El enlace entre los distintos instrumentos y los distintos nodos, puede hacerse por cualquiera de las técnicas habituales como VHF, UHF y, especialmente, mediante sistemas *spread spectrum* en función de las distancias y el volumen de datos a transmitir. La tecnología de enlaces digitales *frecuencia libre* o *spread spectrum* permite la implementación de redes de intercambio de datos de forma simple y eficiente. El sistema se basa en módulos bidireccionales (transmisor y receptor) que transmiten en la banda 2.4 GHz con modulación GFSK *spread spectrum*. Este tipo de enlace está variando continuamente en forma pseudoaleatoria la frecuencia, buscando aquélla que está libre y que sólo la ocupa durante una breve fracción de segundo. De este modo, el sistema no produce ni sufre interferencias. La única limitación radica en que al aumentar el número de unidades disminuye la capacidad de transmisión de las mismas. Con un 70% de frecuencias libres es posible alcanzar 115.2 KBaud. La potencia media del transmisor es de 400 mW, ajustable en función de las condiciones de cada enlace en particular. Estas unidades pueden configurarse en red con varios tipos de geometría, pudiendo actuar también como repetidoras. Existe gran variedad de antenas,

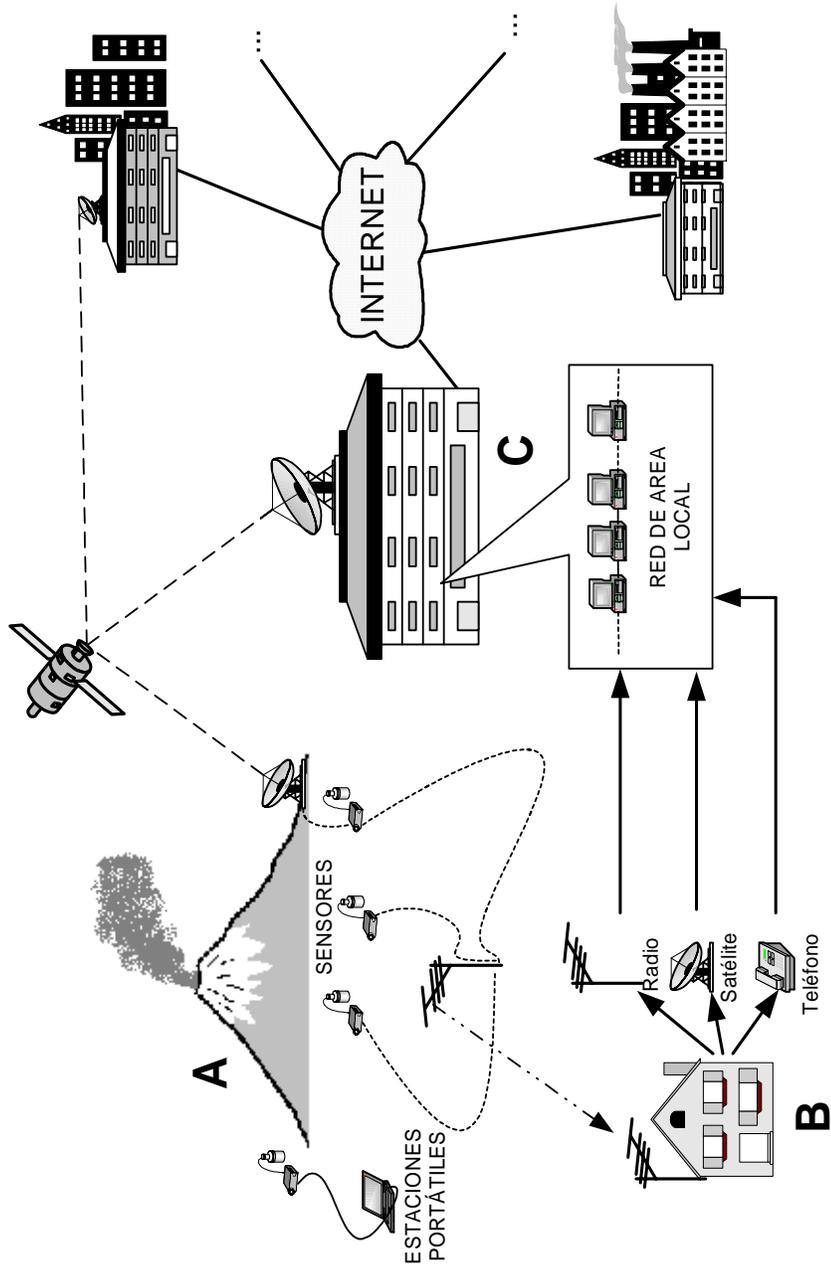


Figura 1. Esquema de un sistema de comunicaciones para vigilancia volcánica. (A) Estaciones remotas. (B) Centro local de recepción de datos (a pocos km del volcán). (C) Centro de recepción de datos (a varios km del volcán) donde se almacenan y procesan los datos.

direccionales y omnidireccionales en función de cada aplicación concreta y de la geometría de la red. La alimentación del sistema se realiza a 12V nominales, con un consumo máximo de 600 mA. Esto permite utilizar un sistema de paneles solares y baterías.

En muchos emplazamientos, y para poder garantizar su operación en caso de crisis, puede ser necesario disminuir considerablemente la potencia del transmisor, ya que no es posible utilizar un gran conjunto de paneles solares y baterías. Para estas situaciones se dispone de pequeños transmisores digitales de pocos mW de potencia, utilizando frecuencias previamente asignadas y que permiten realizar enlaces de pocos kilómetros hasta un pequeño computador, conectado a un módulo *spread spectrum* situado en un emplazamiento habitado. De esta forma, es posible conectar varios sensores distribuidos en la zona a un solo módulo, facilitando la operación y reduciendo los costos de instalación y mantenimiento. La utilización de enlaces punto a punto en VHF, UHF y *spread spectrum* exige visión directa o la utilización de múltiples repetidores. Además, el espectro está muy saturado y generalmente hay una falta absoluta de respeto a las frecuencias asignadas. Los sistemas *spread spectrum* presentan una relativa inmunidad a este tipo de interferencias, especialmente cuando no han de repartirse el espectro disponible muchas unidades de este tipo.

CENTRO DE RECEPCIÓN DE DATOS

El centro de recepción de datos es un observatorio automático situado a varios kilómetros del volcán. Está basado en la conexión, mediante una red local (LAN) (Sheldon, 1996), de los PC encargados de la adquisición y almacenamiento de datos procedentes de los sensores. Los datos se adquieren en modo continuo durante las 24 horas del día y se hace un resumen y compresión de los mismos, se transmiten a un ordenador central en el cual se procede al análisis de todos los parámetros y, en el caso de que haya alguna variación anómala de uno o varios de estos parámetros, se gestiona automáticamente la transmisión de alertas previamente establecidas (figura 6). Con este tipo de red se hará el seguimiento de la actividad volcánica, de forma que los PC de adquisición de datos transmitan toda la información (Ray, 1999) a otros que se encargaran del almacenamiento y procesado de los datos. Así, los PC de las estaciones remotas no ocuparán el disco duro cada poco tiempo y no será necesario el volcado manual de los datos. La transmisión de los datos hacia otros centros de control situados en diferentes lugares del mundo se hace de distintas formas; por un lado mediante la red Internet por correo electrónico utilizando las líneas de teléfono convencionales y RDSI, y por otro vía satélite.

El centro de recepción de datos debe contar con un computador de gran capacidad. Este computador controla el módulo central del sistema *spread spectrum* y dispone de ocho canales en serie para poder soportar otros tantos enlaces de conexión directa, radio y teléfono. La necesidad de que el sistema sea tolerante a fallos obliga a disponer de una fuente de alimentación ininterrumpida con reserva para 48 horas. El sistema de disco debe tener capacidad para almacenar más de un mes de registro continuo de todos los sensores conectados. En este computador debe correr un programa de cualificación de la actividad que emita diariamente un informe de la misma.

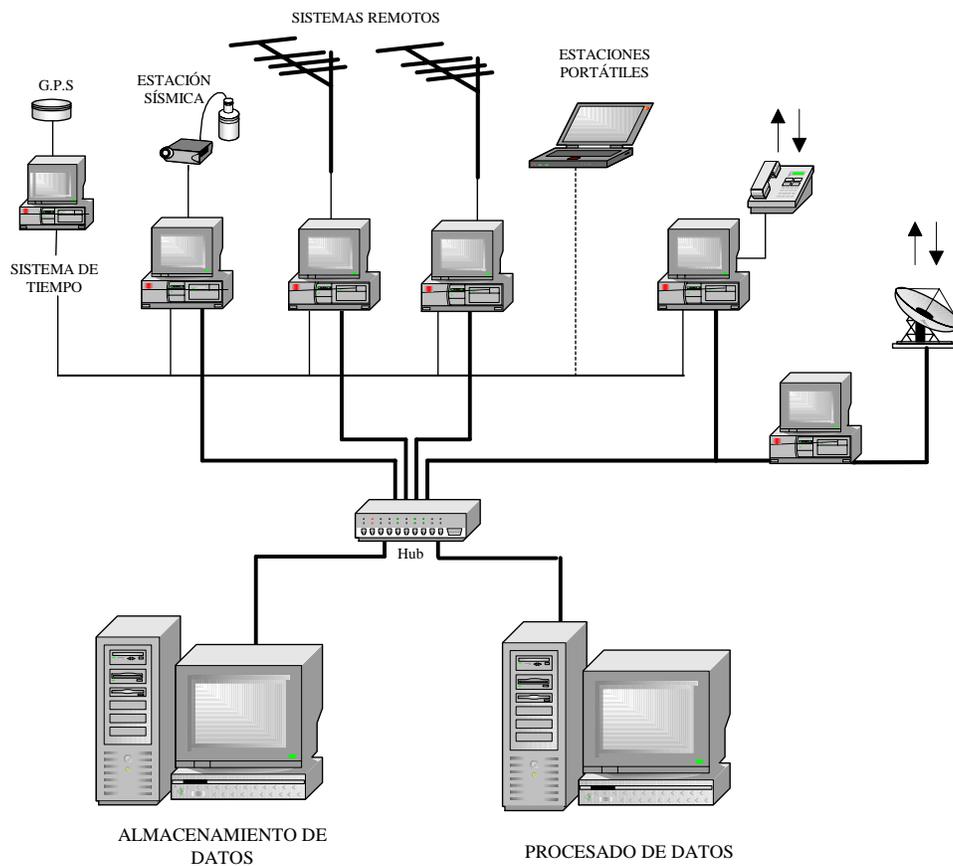


Figura 6. Esquema del centro de recepción de datos

En caso de presentarse una incidencia, el sistema debe comunicarla inmediatamente. Todos los equipos deben estar provistos de un circuito supervisor (*Watchdog*) que evite que el sistema se quede bloqueado. La triplicidad de los enlaces que se obtiene al utilizar simultáneamente redes RDSI, enlaces radio *spread spectrum* y enlaces satélite, permite garantizar la operación en caso de crisis sísmica o volcánica o, incluso, en un simple fallo de las líneas telefónicas o de energía. Todo el sistema es redundante con enlaces telefónicos RDSI, lo que le confiere una gran fiabilidad, especialmente en una aplicación donde el acceso a los datos en tiempo real es necesario para gestionar adecuadamente una crisis sísmica o volcánica, lo que implica rapidez, rigor y eficacia.

TRANSMISIÓN DE DATOS VÍA SATÉLITE

La utilización de enlaces a través de los sistemas de comunicación por satélite supone una importante mejora en la utilización práctica de las modernas estaciones para la vigilancia de volcanes (figura 7) ya que todavía se presentan problemas para la transmisión de la información, como son

- Muchos volcanes de alto riesgo están en zonas de difícil acceso y fuera de la cobertura de los sistemas de comunicación habituales.
- En caso de crisis sísmica o volcánica fallan las líneas telefónicas, la red eléctrica, etc., dejando así la zona incomunicada.
- La utilización de enlaces punto a punto en VHF o UHF exige visión directa o la utilización de múltiples repetidores.
- En el caso de que un volcán se reactive se hace necesario instalar rápidamente una (o varias) estaciones para el seguimiento en tiempo real de la crisis, sin exponer al personal técnico a riesgos inaceptables.

La transmisión vía satélite es una tecnología perfectamente conocida que permite mantener comunicaciones seguras de un gran volumen de datos, pero demasiado cara para transmitir datos referentes a la vigilancia de volcanes (Barberi et al., 1990). Al precio de explotación del enlace satélite hay que sumarle el de adquisición y mantenimiento de terminales y antenas. Por esto, el terminal debe ser de bajo coste (menos de 5000 \$) y transmitir a bajas velocidades. Otra posibilidad es la utilización de un canal completo del satélite. Para que sea económico hay que ocuparlo completamente, con unas 70 estaciones aproximadamente, transmitiendo a 1200 bd. El coste de operación transmitiendo el resumen de la señal sísmica y la información de un clinómetro de 2 componentes y la temperatura, más 5 minutos de peticiones suplementarias de trazas sísmicas, debe reducirse a menos de un dólar diario por estación. El sistema está concebido para realizar la recepción de la señal en un centro de control de donde se distribuye vía Internet a los distintos usuarios. En caso de crisis puede utilizarse un terminal similar a las estaciones de campo para la recepción directa de los datos. Las posibilidades del sistema son:

- Acceso remoto a la información sobre la actividad del volcán.
- Acceso simultáneo por varios especialistas desde distintos centros a los mismos datos.
- Seguridad de acceso ante el posible fallo de todos los otros sistemas de comunicaciones.
- Posibilidad de adaptar la información según la evolución de la crisis volcánica.
- Automatización del análisis de los datos en circunstancias estacionarias.

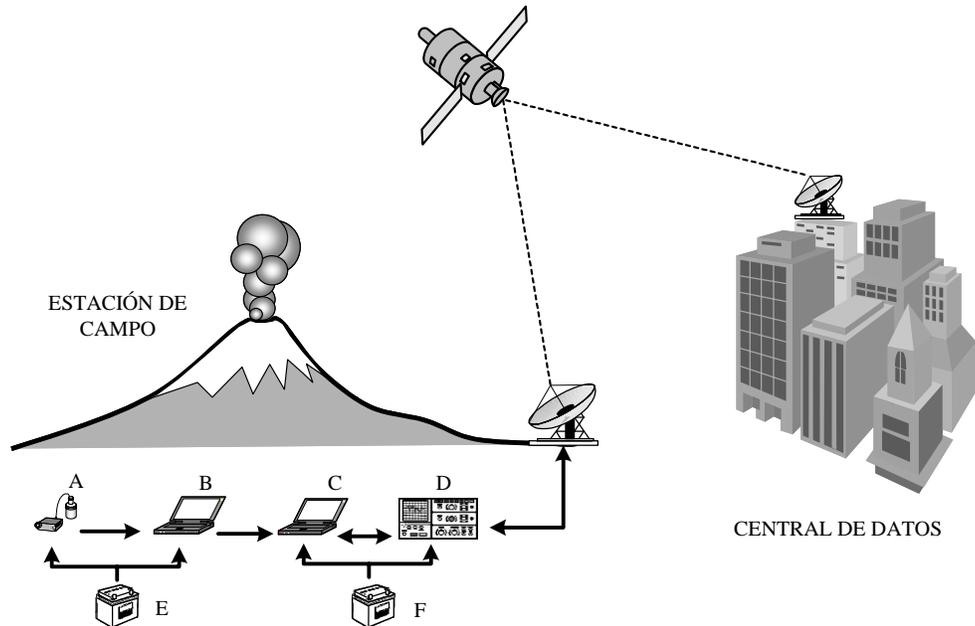


Figura 6. Esquema de transmisión de datos vía satélite. (A) Sensor. (B) PC de adquisición de datos. (C) Software de reducción del volumen de datos para que la transmisión sea de bajo coste (1 KB por estación al día). (D) Módem. (E) y (F) Baterías (12V).

TIPOS DE USUARIOS EN UN SISTEMA DE VIGILANCIA VOLCÁNICA

Los volcanólogos y los observatorios volcanológicos mantienen fuertes restricciones al acceso a los datos. La distribución de la información en una red de vigilancia volcánica respeta la confidencialidad de los datos y por esto la información va dirigida a cuatro tipos de usuarios diferentes

1. Responsables de la vigilancia volcánica en cada volcán
 - Acceso libre a todos los datos (acceso directo a la red de vigilancia, datos manuales, archivos históricos, etc.).
 - Capacidad de configurar y modificar los parámetros del sistema de seguimiento.
2. Volcanólogos que colaboran con la vigilancia (o investigan) de cada volcán
 - Acceso libre a todos los datos del sistema de vigilancia (posible pago por utilización del sistema satélite)
3. Otros científicos
 - Sólo acceso a los datos autorizados (posible pago por uso)
4. Público general
 - Sólo acceso a la página web del volcán

REDUCCIÓN DEL VOLUMEN DE DATOS A TRANSMITIR

El seguimiento de una crisis volcánica exige la participación de especialistas de distintas disciplinas y la coordinación con Protección Civil. En general, es muy difícil que todos estos especialistas puedan estar en el mismo lugar durante toda la crisis, especialmente cuando ésta dura mucho tiempo o se desarrolla en un país con bajos recursos. Incluso en los países con grandes instituciones para atender una crisis volcánica se requiere la colaboración de otros colegas, con lo que se exige poder acceder a los datos en tiempo cuasi-real desde cualquier lugar del mundo. Esto es posible hacerlo a través de Internet a un precio razonable. El problema es que el volumen de datos que realmente se pueden transmitir por Internet es mucho menor que el teórico, especialmente cuando el acceso no se puede realizar a través de un canal de alta velocidad. Por ejemplo, para una estación sísmica de tres componentes a 50 muestras por segundo, utilizando un conversor de 16 bits se requiere transmitir permanentemente 5500 baudios. Esto imposibilita la utilización de enlaces telefónicos ya que, a pesar de que las velocidades nominales de los modems pueden alcanzar velocidades de 56000 baudios, las líneas telefónicas en las zonas rurales difícilmente mantienen 9600 bd.

Actualmente se está realizando un gran esfuerzo en el desarrollo de métodos para el procesado automático de los datos (Endo and Murray, 1991; Cornelius and Voight, 1996; Murray et al., 1996). De esta forma, será posible transmitir sólo el resultado del análisis reduciendo en varios ordenes de magnitud el volumen de datos. Por ejemplo, un sensor de deformación produce muy pocos datos al día ya que se suele transmitir a 1 muestra por minuto o menos. Es importante que esta muestra sea el valor medio de todo el intervalo de tiempo entre muestras para que cumpla el teorema de Nyquist.

La sísmica es una de las técnicas principales para el seguimiento de la actividad volcánica y es también la que más recursos exige para la transmisión de datos. Por eso se ha desarrollado un método para reducir el volumen de datos a transmitir manteniendo un nivel de información suficiente para la toma de decisiones. En caso de dudas sobre el contenido de la señal se puede realizar una petición de información complementaria. El método (Tárraga et al., 2000) consiste en sustituir la señal sísmica por el valor máximo y mínimo cada 6 segundos. Estos valores normalmente de 16 bits se transforman a 8 bits mediante una escala pseudologarítmica. Un fichero de una hora a 50 mps es de 360 KB por canal; por este método se reduce a 1.2 KB. Un fichero de 24 horas de registro se reduce a 28.8 KB. Estos ficheros, lógicamente, no permiten realizar un análisis completo de la señal sísmica pero contienen suficiente información para el seguimiento remoto de la actividad del volcán. El reducido tamaño de estos ficheros permite que puedan ser enviados por e-mail a todos los miembros del equipo científico encargado de la vigilancia del volcán. Mediante otro e-mail los usuarios (con diferentes niveles de restricciones de acceso) pueden pedir pequeños fragmentos del registro sísmico original para identificar claramente un evento o conocer otras características de la señal. Este procedimiento usado con buen criterio no aumenta demasiado el volumen de datos a transmitir. Para mayor facilidad de los usuarios el sistema opera bajo Windows 95/98. El software se ha desarrollado en C++ Builder 4 (Borland, 1999) por permitir realizar programas ejecutables más rápidos bajo el entorno Windows.

El sistema de tráfico de mensajes debe poderse utilizar en un amplio abanico de aplicaciones. Cada instrumento situado en un volcán es un sistema completamente distinto, cada usuario tiene una problemática diferente y además coexisten tecnologías muy diversas, muchas de ellas con muchos años de funcionamiento. Por ello, se propone un formato único para todos los mensajes, pero que en su interior pueda contener cualquier tipo de información, comando o parámetro. El responsable de cada estación remota será quien defina concretamente como será su mensaje. En algunos casos (muy pocos) las estaciones y los sensores van a poder aceptar comandos de calibración o cambio de escala. En general, los instrumentos van a funcionar siempre con los mismos parámetros y su modificación obliga a la visita de un técnico a la estación.

SOFTWARE

El sistema de comunicaciones debe disponer de un soporte informático adecuado para su operación. En él podemos distinguir tres paquetes independientes

- Operación de las estaciones de campo y comunicación de éstas con las unidades de acceso a la red.
- Adquisición de datos en las estaciones remotas.
- Preprocesado en las estaciones de campo.
- Transmisión punto a punto (estación de campo a nodo) y entrada en la red.
- Operación rutinaria de almacenamiento de datos, supervisión del funcionamiento y elaboración automática de informes.
 - Bases de datos.
 - Gestión automática de alertas en función de la actividad detectada.
 - Gestión de errores en el sistema.
 - Actualización automática de la página WEB.
 - Automatización del informe periódico de la actividad registrada y su envío mediante e-mail a la lista de usuarios.
- Servicios de usuarios. Acceso a las bases de datos, información detallada en tiempo casi real. Acceso remoto por parte de los usuarios con tres niveles.
 - Usuarios responsables (instituciones responsables de la instrumentación).
 - Usuarios invitados (científicos autorizados con distinto nivel de acceso).
 - Acceso público a través de pagina WEB.

El software correspondiente a las estaciones de campo deberá desarrollarse específicamente para cada unidad, debido a que estos sistemas utilizan microcomputadores específicos ya que las disponibilidades de potencia no permiten el empleo de computadores estándar. Los programas correspondientes a las unidades centrales, es decir los de procesado, almacenamiento y transmisión de datos se desarrollan en C++ por su mayor eficiencia en cuanto a la gestión de los recursos de la máquina y la facilidad de exportación a otras plataformas.

CONCLUSIONES

La aplicación de las nuevas tecnologías en comunicaciones como parte integrante de los equipos de adquisición de datos permite el desarrollo de sistemas para la vigilancia remota de volcanes. Estos sistemas aportan información periódica sobre el estado del volcán con un bajo coste de instalación, operación y mantenimiento. Ello va a permitir instrumentar un elevado número de volcanes potencialmente peligrosos y que actualmente carecen de sistemas de vigilancia por las elevadas inversiones que suponen los métodos tradicionales.

BIBLIOGRAFÍA

- AGNEW, D.C. (1986). *Strainmeters and tiltmeters*. Reviews of Geophysics, **34-3**: 579-624
- ANALOG DEVICE (1991). *Evaluation board for the ADC AD7710, 24 bit Sigma Delta A/D Converter. Application note*. Analog Devices, One Technology Way, PO Box 9106, Norwood, MA 02062-9106. USA .29 pp.
- ARNOSO, J.; CAI, W.; VIEIRA, R.; TAN, S.; VÉLEZ, E. (1997). *Tidal tilt and strain measurements in the Geodynamics Laboratory of Lanzarote*. Proceedings of the thirteenth International Symposium on Earth tides: 149-156
- BARBERI, F.; BLONG, R.; DE LA CRUZ, S.; HALL, M.; KAMO, K.; MOTHES, P.; NEWHALL, C.; PETERSON, D.; PUNONGBAYAN, P.; SIGVALSON, G.; ZANA, N. (1990). *Reducing volcanic disasters in the 1990's*. Bull. Volcanol. Soc. Japan., **35**: 80-95
- BORLAND C++ Builder 4. (1999). *Developer's Guide*. Inprise Corporation, 100 Enterprise Way, Scott Valley, CA 95066-3249, 982 pp.
- CORNELIUS, R.R.; VOIGHT, B. (1996). *Real – time seismic amplitude measurement (RSAM) and seismic spectral amplitude measurement (SSAM) analyses with the materials Failure Forecast Method (FFM), June 1991 explosive eruption at Mount Pinatubo*. En C.G. Newhall y R.S. Punongbayan (eds.), *Fire and Mud. Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines*, Philippine Institute of Volcanology and Seismology, Quezon City, University of Washinton Press, Seattle and London: 249 – 267
- ENDO, E.T.; MURRAY, T. (1991). *Real-time Seismic Amplitude Measurement (RSAM): a volcano monitoring and prediction tool*. Bulletin of Volcanology, **53**: 533-545
- Delaney, P.T., MIKLIUS, A.; ARNADOTTIR, T.; OKAMURA, A. T.; SAKO, M.K. (1993). *Motion of Kilauea Volcano during sustained Eruption from the Puu Oo and Kupaianaha Vents, 1983-1991*. Journal of Geophysical Research, . **98, No. B10**: 17.801-17.820
- JMA (1995). *Volcanoes, Monitoring and Disaster Reduction, IDNDR*. Japan Meteorological Agency
- MURRAY, J.L.; POWER J.A.; DAVIDSON, G.; MARSO, J. N. (1996). *A PC- based real – time volcano – monitoring data – acquisition and analysis system*. En C.G. Newhall y R.S. Punongbayan (eds.), *Fire and Mud. Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines*, Philippine Institute of Volcanology and Seismology, Quezon City, University of Washinton Press, Seattle and London: 225-232

- QUAAS, R.; GONZÁLEZ, R.; GUEVARA, E.; RAMOS, E.; DE LA CRUZ-REYNA, S. (1995). *Monitoreo Volcánico: Instrumentación y Métodos de Vigilancia*. En O. Zepeda y T.A. Sánchez (eds.), Volcán Popocatepetl, CENAPRED, México: 25-76
- RAY, J. (1999). *TCP/IP*. Ed. Prentice Hall, Madrid. 936 pp.
- SHELDON, T.(1996). *LAN TIMES Encyclopedia of NetWorking*. Ed. Osborne Mc Graw-Hill. 1156 pp.
- TÁRRAGA, M.; GARCÍA, A.; ORTIZ, R.; ABELLA, R.; PEÑA, J. (2000). *SANARIS Project: A Satellite Network for Natural Risk Monitoring*. Natural Hazards (en prensa).
- VIEIRA, R.; VAN RUYMBEKE, M.; FERNÁNDEZ, J.; ARNOSO, J.; TORO. C. (1989). *The Lanzarote underground laboratory. Geodynamical Instrumentation applied to volcanic areas*. Cahiers de Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie, **4**: 71-86