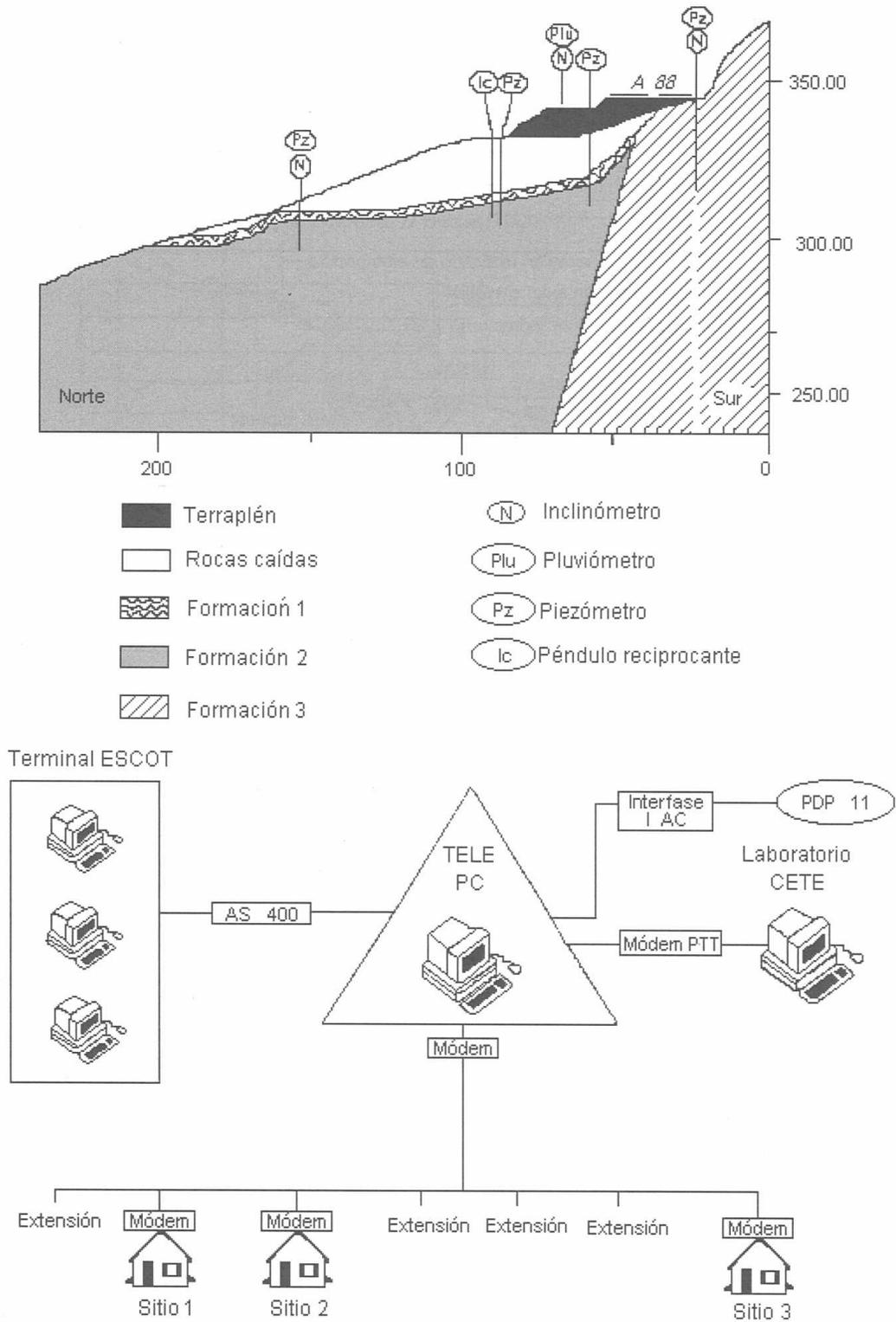


**Fig. 8.4 Evolución de las lecturas de extensómetros y pluviómetros**  
(Kimura y Takakura, 1989)

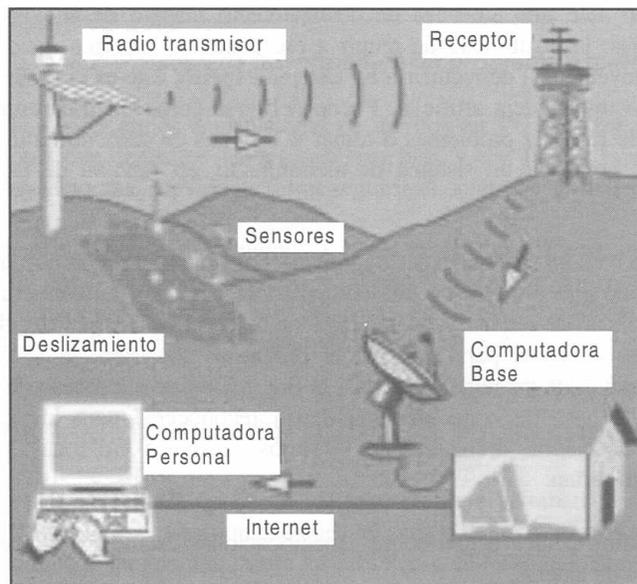
Una guía técnica para el monitoreo de laderas inestables se ha emitido en Francia (Durville *et al.*, 1993), en la que se describe el procedimiento general para la construcción de sistemas de monitoreo de fenómenos que van desde los flujos hasta los deslizamientos profundos; en la Fig. 8.5 se muestra un ejemplo de monitoreo automático de laderas peligrosas. Establece que el objetivo de estos sistemas es predecir la ocurrencia del fenómeno suficientemente antes de que suceda, para que se adopten las medidas necesarias para reducir los riesgos; para ello también reconoce que el nivel de seguridad alcanzado depende de la confiabilidad del sistema de monitoreo. No obstante, debe enfatizarse que la decisión final tiene que hacerla el administrador del sistema, a la luz de consideraciones ingenieriles.



**Fig. 8.5 Sistema de monitoreo de laderas en La Borne Romain, Francia**

En los Estados Unidos de América se lleva a cabo el monitoreo en tiempo real de un número considerable de deslizamientos. Frecuentemente éstos se mueven lentamente, pero algunos tienen el potencial de colapsarse catastróficamente. Así, para ayudar a reducir el riesgo que poseen estas laderas, el U.S. Geological Service (USGS), en cooperación con otras agencias, actúa con prontitud para proveer el monitoreo continuo en tiempo real, para lo que recurre a sistemas desarrollados por esa misma institución para monitorear volcanes activos en áreas remotas. En nuestro país se ha ganado una gran experiencia con el monitoreo del volcán Popocatepetl, y sin duda, las técnicas ahí puestas en práctica podrían aplicarse para el monitoreo de laderas con alto riesgo a la población.

Los datos de una gran variedad de sensores instalados en los deslizamientos son transmitidas por radio a las computadoras del USGS. La detección inmediata de la actividad de deslizamientos que proporcionan los sistemas en tiempo real, pueden ser cruciales para salvar vidas y proteger la propiedad. Las observaciones de campo tradicionales no pueden detectar los cambios al momento en que suceden, aun cuando su monitoreo sea periódico. Además, los deslizamientos activos pueden ser peligrosos para trabajar sobre ellos, y los grandes movimientos ocurren frecuentemente durante tormentas cuando la visibilidad es pobre. En las áreas que el USGS monitorea remotamente, utiliza un arreglo como el mostrado en la Fig. 8.6; así registra movimientos del terreno, presiones de poro, precipitación, aceleraciones del terreno, etc, se transmiten a las computadoras del USGS a cada 10 minutos, bajo condiciones normales; sin embargo, esta información se transmite inmediatamente si se detectan fuertes vibraciones del terreno, como resultado del movimiento masivo del deslizamiento. El USGS opera un número considerable de monitoreos de deslizamientos en tiempo real, algunos incluso con acceso del público en general a los datos que se están monitoreando, a través de la Internet; se sugiere visitar para ello el sitio <http://landslides.usgs.gov/hwy50>.



**Fig. 8.6 Red del USGS para la transmisión en tiempo real de datos de deslizamientos de ladera**

### 8.3 PANEL DE EXPERTOS O UN SISTEMA EXPERTO INTELIGENTE, CON FINES DE ALERTAMIENTO

Una vez que se tienen colocados en el campo los sensores que registran las variables más significativas ya descritas de los fenómenos, debe contarse con un profesional o un panel de ellos que interpreten los resultados; el campo de acción es primordialmente de los ingenieros geotécnicos. Un proyecto de instrumentación no concluye con la medición y menos con la instalación de aparatos; es menester analizarlos. Precisamente por no concluir este proceso, en ocasiones se cuestiona la valía de la instrumentación; en efecto, cuando no se analizan los datos, no se

aporta nada y con justificada razón la utilidad de la instrumentación queda en entredicho y su costo, recursos que podrían no ser despreciables, se torna en un gasto inútil.

Cabe advertir que una instrumentación geotécnica pertinente no garantiza una interpretación y toma de decisiones correctas; también es cierto que una instrumentación planeada e instalada inadecuadamente llevará a confusiones, e incluso podría convertirse en una herramienta peligrosa. De aquí que sea indispensable considerar dentro de un contexto general, sobre todo cuando se trata de implementar un sistema de alertamiento temprano, a los profesionales idóneos que aseguren el éxito en los rubros siguientes:

- Diseño, colocación, monitoreo y mantenimiento de la instrumentación, incluyendo la transmisión de datos a distancia, si ese es el caso,
- Análisis e interpretación de los datos registrados. y
- Toma de decisiones para los niveles de alertamiento a la población.

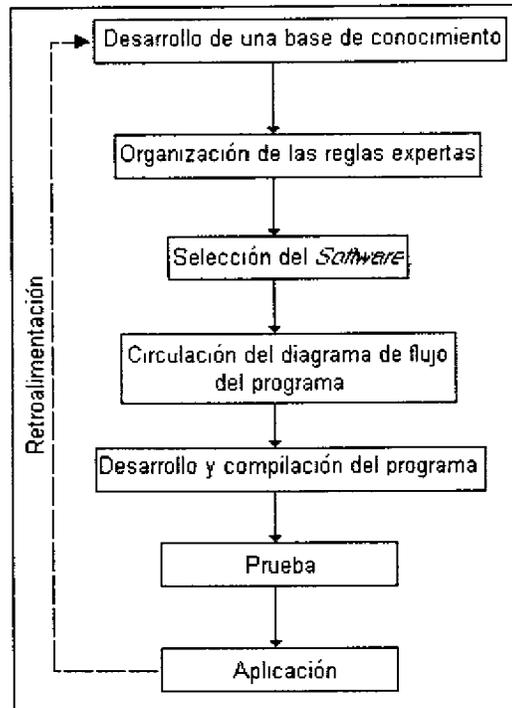
Un aspecto que es esencial para llevar a cabo un proyecto de instrumentación, es la participación comprometida y entusiasta de un grupo reducido de profesionales clave. Un proyecto de esta naturaleza resulta muy beneficiado si un grupo pequeño de ingenieros se involucra en todas las etapas del mismo, desde la planeación y el desarrollo del sistema hasta el análisis, interpretación de los datos y la toma de decisiones, pasando por su calibración, integración, colocación, mantenimiento y monitoreo periódico. La atención a un sinnúmero de detalles durante el diseño y la instalación de los instrumentos, es tan importante como conocer el qué y para qué se mide, no sólo el cómo.

El posible alertamiento ante una amenaza de deslizamiento masivo de suelos y rocas exige la toma de decisiones rápidas y pertinentes; la posibilidad de reunir a ese panel de expertos rápidamente es en general muy reducida. De aquí surge la conveniencia de recurrir a un sistema experto; éste es un intento tecnológico dentro de lo que podemos reconocer como inteligencia artificial. Puede definirse como un programa de computadora que usa conocimiento humano, a fin de resolver problemas o tomar decisiones en cada dominio específico; para este caso, tendría como tarea específica controlar un sistema de alertamiento, en función de las variables que se estarían registrando

La base del conocimiento en un sistema experto reúne hechos (datos) y reglas que se usan como el fundamento para la toma de decisiones, todo ello a través de una computadora personal. La estructura del sistema contiene un intérprete que decide cómo aplicar las reglas, y un catalogador o secuenciador que decide el orden en que éstas se deben aplicar. Las dos primeras etapas para elaborar el programa consisten en el desarrollo de una base de conocimientos y en la organización de las reglas expertas; la Fig. 8.7 reúne el proceso de desarrollo de un programa experto. A fin de construir la base de conocimientos deben reconocerse para los casos que nos ocupan, las características y condiciones de caídos, deslizamientos y flujos de suelos y/o rocas; para cada uno de ellos, la metodología y tareas al respecto serían:

- Revisar literatura técnica actual sobre especificaciones estándar y planes de diseño para prevenir deslizamientos de laderas,
- Reunir conocimientos de expertos humanos acerca de monitoreo y actividades preventivas contra tales deslizamientos, y
- establecer reglas que conduzcan a desechar o a ir confirmando la alta probabilidad de un deslizamiento de suelos y/o rocas.

En todo este proceso debe reconocerse que la ocurrencia de cada uno de los tipos de inestabilidad de laderas está muy influenciada por las condiciones regionales, por lo que no hay reglas generales, y por tanto no deben extrapolarse de una zona a otra; ello requiere acopiar y desarrollar información por provincias geomorfológicas e hidrográficas con características similares.



**Fig. 8.7 Proceso de desarrollo de un programa experto**

A manera de ejemplo, en los flujos o avalanchas de detritos en Taiwan (Lin, 2000) se reconoce que éstos ocurren en terrenos montañosos con depósitos sueltos o deleznales, y con fuertes lluvias; así pues, las reglas de un sistema experto para el alertamiento ante ese tipo de flujos seguiría el diagrama de flujo decisivo de la Fig 8.8.

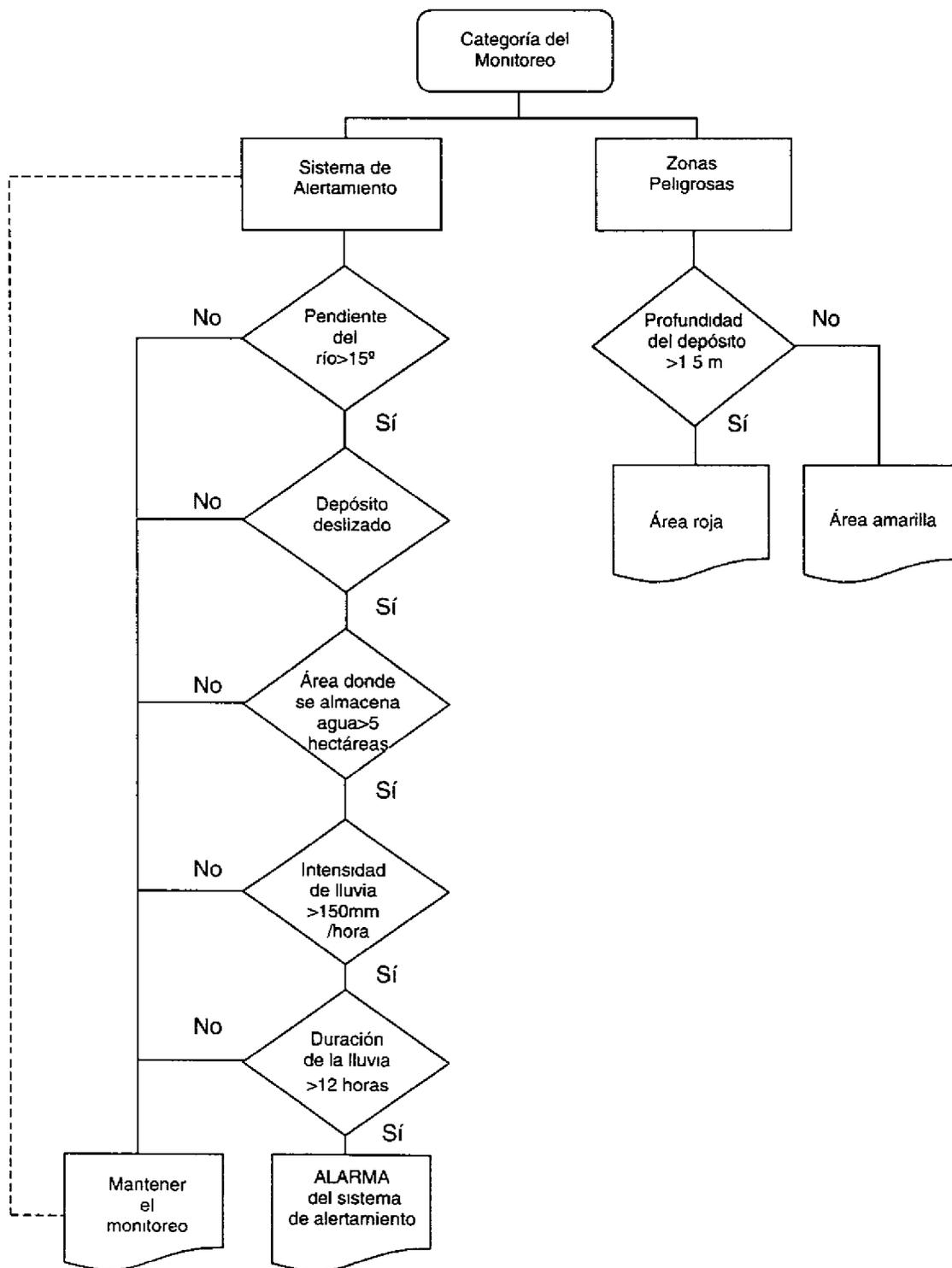
La tarea siguiente dentro del esquema general es la selección del software experto. Puede recurrirse a los disponibles en el mercado, tal como el "KnowledgePro Windows", el cual proporciona un ambiente flexible para la aplicación de un sistema experto desde una plataforma Windows; posee las capacidades de la programación orientada a objetos, cuando sirve a un comando, un hipertexto, una variable o a un conjunto de reglas del sistema experto.

#### **8.4 OTROS TIPOS DE SENSORES ORIENTADOS A LA AUTOMATIZACIÓN**

Podría asegurarse que se vive en la época de los sensores y la automatización. Dado el gran desarrollo e impulso que ha tenido la computación y las comunicaciones, el campo de la instrumentación, monitoreo y transmisión de datos relativos a la condición que guarda una ladera ha exhibido continuas aportaciones, varias de ellas ingeniosas. También es cierto que esos desarrollos tienen un costo mayor que las técnicas convencionales, aunque sin duda son preferibles en términos de la gran cantidad de información que se puede adquirir, incluso bajo condiciones peligrosas, en las que ya no podrían acceder la ladera los miembros de una brigada de monitoreo. Se han descrito en esta guía los equipos automatizados relativamente más usados; sin embargo, no se ha abundado en aquellos propuestos más recientemente. Sin pretender ser exhaustivos, se mencionan sólo algunos de éstos y su objetivo:

- Videocámara fija y sensores ultrasónicos para medir la velocidad superficial de flujos y avalanchas de detritos.
- Sismógrafos para registrar la vibración del terreno, a fin de estimar volúmenes y velocidades de descarga de avalanchas
- Celdas de presión total para medir el esfuerzo en la base de una garganta, por la que potencialmente fluirá una masa térrica.

- Sistemas de geoposicionamiento integrados en masas potencialmente en movimiento, para su seguimiento a distancia.



**Fig. 8.8 Diagrama de flujo para la toma de decisiones ante avalanchas de detritos en Taiwan (Lin, 2000)**