

6.4 MONITOREO DE LA PRESIÓN DEL AGUA EN EL SUBSUELO

Como se ha mencionado en el capítulo 3 de esta guía, las fluctuaciones en los niveles del agua dentro del terreno, provocadas por las variaciones estacionales y los cambios climáticos, generan diferentes estados de esfuerzos en la masa del suelo.

En tiempos de sequía el suelo se mantiene parcialmente saturado, lo que provoca presión negativa en el agua contenida en sus poros, favoreciendo con ello el aumento de su resistencia cortante. La presión negativa, succión o presión mátrica en el agua contenida en los poros del subsuelo, se genera cuando el agua se adhiere y es atraída hacia las partículas del suelo. A esta presión negativa contribuyen a) el fenómeno de capilaridad que ocurre en los espacios “capilares” o “pequeños poros entre partículas” del suelo; y, b) el fenómeno de adsorción que se establece entre las partículas minerales cargadas eléctricamente, y el agua que las rodea. Los tensiómetros o sensores de succión son los instrumentos que se utilizan para medir las tensiones que se generan en el agua atrapada en los espacios capilares de una masa de suelo.

Con la llegada de las lluvias, la succión o presión negativa en el agua contenida en el subsuelo se pierde, e incluso se genera una presión positiva (presión de poro). Este aumento de la presión de poro reduce la resistencia del subsuelo favoreciendo la inestabilidad de las laderas. Ello se debe primordialmente a que la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos disminuye proporcionalmente con el aumento de la presión de poro, de acuerdo con el principio fundamental de los esfuerzos efectivos.

Por lo anterior, el monitoreo de la succión, y principalmente de la presión de poro, resultan indispensables para conocer la variación de la resistencia de los suelos en la potencial superficie de falla, y con ello prevenir la inestabilidad de las laderas. Existen diversos dispositivos de gran precisión que permiten medir las variaciones de la succión y de la presión de poro in-situ, para prácticamente cualquier tipo de terreno.

6.4.1 Sensores de succión

Un tensiómetro consiste de un tubo hermético con una punta de cerámica porosa en la base, un manómetro cerca de la tapa y una tapa-sello hermética, Fig. 6.13. Cuando el tensiómetro se llena con agua y se inserta en el suelo, el agua se puede mover dentro y fuera del tubo a través de los poros de la punta. Conforme se va secando el suelo y el agua se mueve hacia fuera del tensiómetro, se crea un vacío dentro del tubo que se mide en el manómetro ubicado en la superficie cerca de la tapa del tensiómetro. Cuando el vacío generado por el movimiento del agua hacia fuera del tensiómetro es igual a la succión del suelo, el agua deja de fluir, y en ese momento el manómetro mide la tensión o succión del suelo.

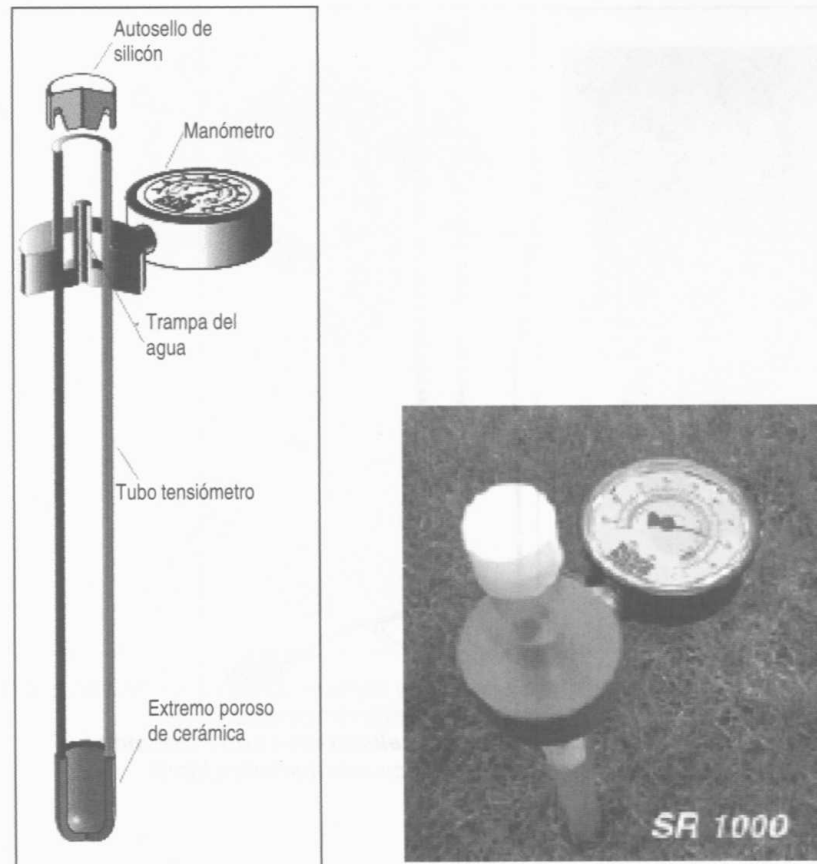


Fig. 6.13 Elementos que componen un tensiómetro
 (www.sdec-france.com/us/index.html)

Si el suelo continúa secándose, el agua seguirá moviéndose hacia afuera del tensiómetro hasta que alcance el nivel de vacío más alto. Cuando se agrega agua al suelo se lleva a cabo el proceso opuesto; el suelo ve reducida su succión y el agua es devuelta al tensiómetro a través de los poros de la punta de cerámica, hasta que el nivel de vacío se reduce a un valor igual al de la succión más baja, por lo que en este punto el movimiento del agua se detiene.

En la actualidad existe una amplia variedad de tensiómetros electrónicos de gran precisión, Fig. 6.14, cuyo principio de funcionamiento es exactamente igual al descrito anteriormente. Algunos de ellos tienen la virtud de contar con sensores electrónicos que permiten compensar las variaciones de presión por temperatura, obtener lecturas en forma digital, y se pueden interconectar a un sistema de monitoreo a distancia. Otro aspecto a tomar en cuenta en los tensiómetros electrónicos consiste en su fácil instalación, aun para profundidades mayores a 10 m.

En el mercado existen diferentes tipos de tensiómetros equipados con tramos de tubo flexible que, entre otras ventajas, les permite seguir los movimientos del terreno sin perder su precisión. En la Figura 6.15 se muestran diferentes modelos de tensiómetros equipados con tubo flexible. En la Fig. 6.16 se muestra el arreglo esquemático de un tensiómetro electrónico y las vistas de un tensiómetro con su dispositivo de medición digital.

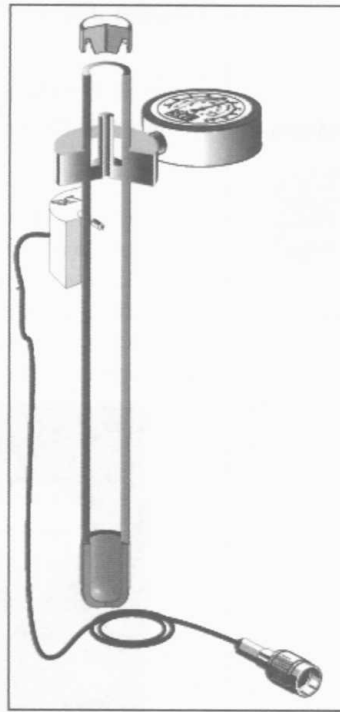


Fig. 6.14 Tensiómetro electrónico con manómetro
(www.sdec-france.com/as/index.html)

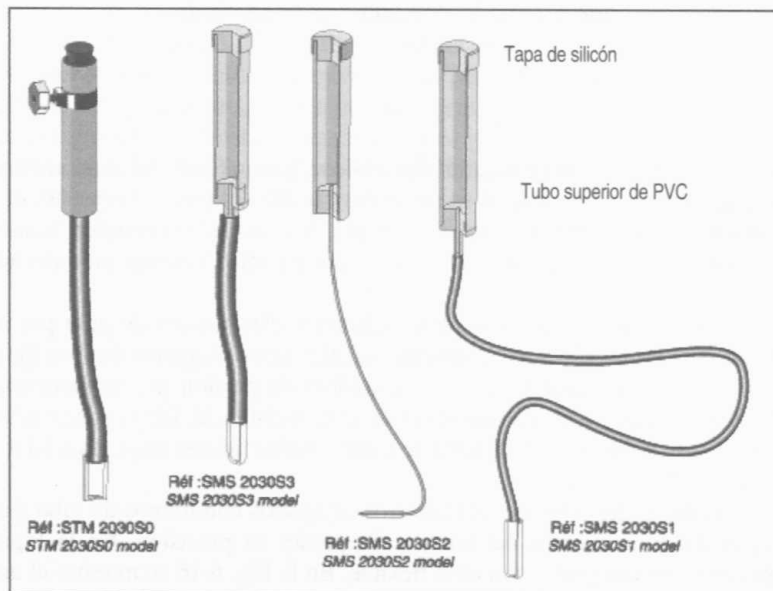


Fig. 6.15 Tensiómetros de cuerpo elástico y cabeza porosa de cerámica
(www.sdec-france.com/as/index.html)

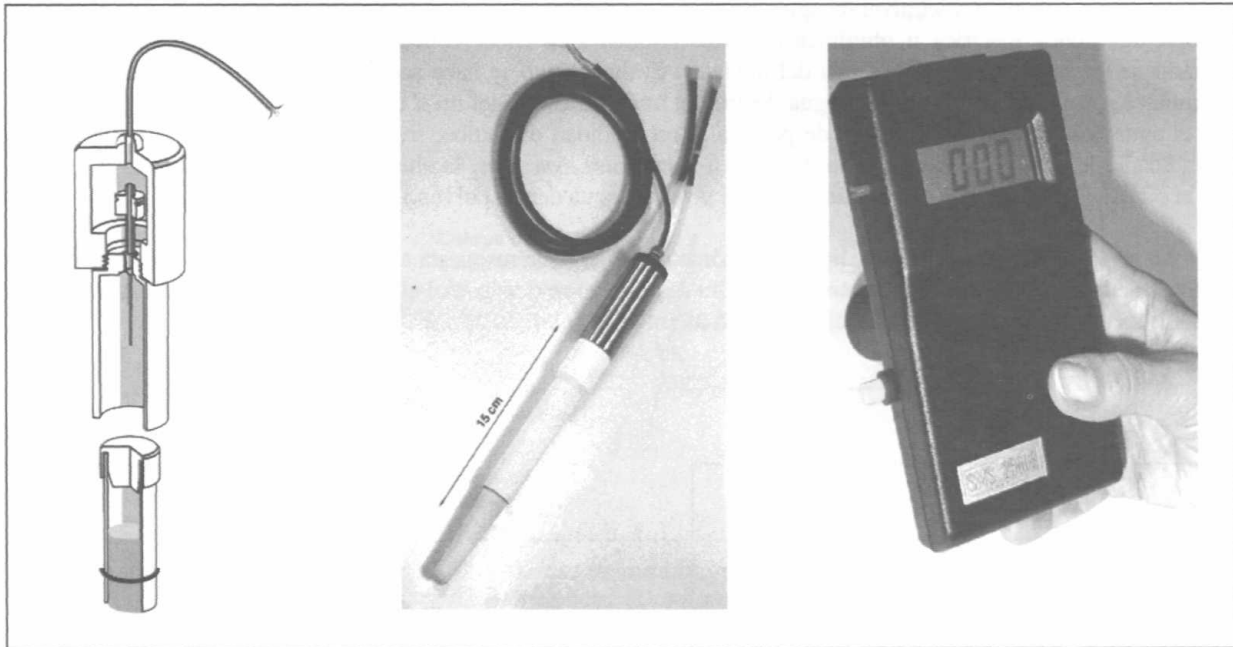


Fig. 6.16 Tensiómetro electrónico y equipo portátil de medición
(www.sdec-france.com/as/index.html)

6.4.2 Piezómetros

En México y en la mayoría de los países del mundo a los equipos que permiten medir la presión de poro positiva in-situ, se les conoce como piezómetros. Al igual que los tensiómetros, los piezómetros son dispositivos que se instalan en el interior de la masa de suelo. Existen varios tipos de piezómetros, de entre los que pueden distinguirse tres grupos principales: de tubo abierto, neumáticos y electrónicos.

Los piezómetros generalmente se colocan dentro de un bulbo poroso confinado en su base y lateralmente por el propio suelo, y en su parte superior, mediante un sello formado artificialmente. Este método de instalación permite que los piezómetros sólo respondan a la presión del agua que se transmite al bulbo poroso en el que se aloja el dispositivo de medición, y no a presiones de agua correspondientes a otras elevaciones. El sello impide la comunicación del dispositivo con el agua que se puede acumular en la perforación realizada para su instalación.

Piezómetros de tubo abierto: Este tipo de piezómetros, conocidos también como piezómetros tipo Casagrande, consisten de un tubo de 1 a 2 pulgadas de diámetro, generalmente de PVC, conectado en uno de sus extremos a un elemento poroso; el cual puede ser un tramo de tubo multiperforado o un pequeño cilindro poroso de cerámica de escasos 10 cm de longitud. Este extremo del tubo se lleva al fondo de una perforación previamente realizada, y el otro extremo se deja al ras o ligeramente por arriba de la boca de la perforación, Fig. 6.17. Posteriormente se coloca un filtro de suelo granular en el espacio dejado entre el elemento poroso y las paredes del fondo de la perforación. La cantidad de material granular que se coloca entre el elemento poroso y las paredes de la perforación debe ser suficiente para cubrir el elemento poroso en toda su longitud, e incluso algunos centímetros arriba. Finalmente, para sellar el bulbo poroso y aislarlo del resto de la perforación, se aplica un sello con bentonita en el espacio ubicado entre el tubo y las paredes de la perforación. Este arreglo permite que el agua del subsuelo, alrededor del bulbo, fluya hacia el interior del tubo y ascienda hasta que se establece a un nivel equivalente a la presión a la que está sujeta el agua del suelo a esa profundidad. De esta manera el piezómetro sólo responderá a la presión del agua que se transmite al bulbo, y no a presiones correspondientes a otras elevaciones. En la Fig. 6.18 se observa un dispositivo cuyo elemento poroso está resuelto con un material plástico, al igual que el tubo roscado.

La altura que alcanza el nivel de agua dentro del tubo piezométrico se determina introduciendo por el interior del tubo una sonda eléctrica u ohmímetro, cuyas terminales al hacer contacto con el agua cierran el circuito, generándose un salto brusco de la aguja del medidor. El dispositivo se hace acompañar con una cinta métrica para determinar la profundidad del nivel de agua dentro del tubo. La altura del nivel de agua, equivalente a la presión que tiene el agua del suelo *in-situ* (presión de poro) a la profundidad del bulbo, se determina fácilmente conociendo la profundidad a la que se colocó el bulbo durante su instalación. Así pues, la altura de agua será igual a la diferencia entre la profundidad del bulbo y la profundidad del nivel del agua dentro del tubo.

La principal desventaja de este tipo de piezómetros es su lenta respuesta a cambios de presión del agua, debido a la necesidad de que un volumen relativamente alto de agua entre o salga del elemento poroso, a fin de establecer el equilibrio mediante el correspondiente cambio en la altura de la columna de agua dentro del tubo.



Fig. 6.17 Esquema de un piezómetro de tubo abierto tipo Casagrande, (Dunnicliff, 1993)

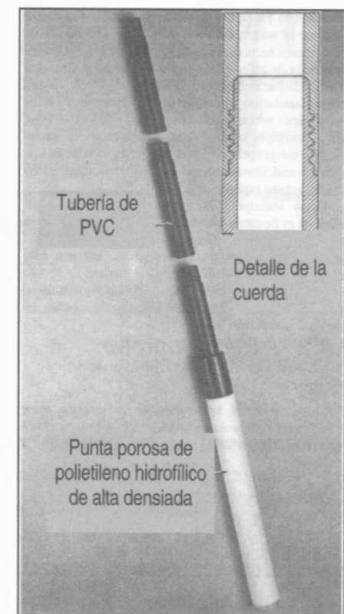


Fig. 6.18 Piezómetro de tubo abierto tipo Casagrande con punta porosa plástica (Dunnicliff, 1993)

Piezómetros neumáticos. A fin de hacer más rápida la respuesta de los piezómetros a los cambios de presión en el agua, se han desarrollado otros equipos que requieren flujos y cambios volumétricos mucho menores dentro del aparato. En la Fig. 6.19 se muestra el esquema de un sistema neumático, así como la vista de un sensor de este tipo desarrollado en México. Como ahí se distingue, una delgada lámina o diafragma flexible recibe la presión del agua provocando su deflexión, y con ello la obturación de dos orificios en el lado seco del diafragma. Aplicando una presión neumática controlada, por uno de esos orificios, la presión requerida para separar el diafragma es justamente la presión en el agua, lo que se constata al detectar cierto flujo de aire de retorno por el otro orificio.

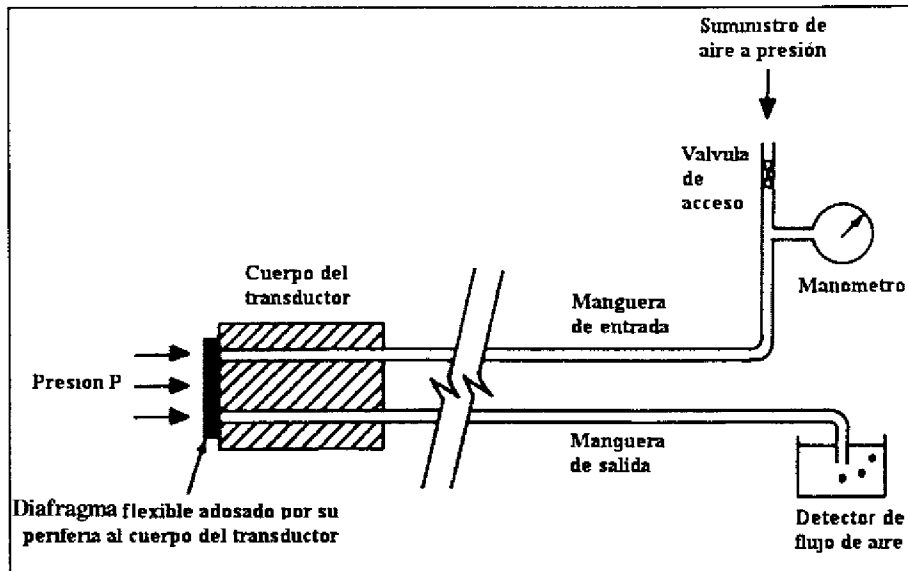


Fig. 6.19 Principio de medición de un piezómetro neumático, (Dunnicliff, 1993)

El sensor neumático va adosado a un elemento poroso que se aloja a la profundidad deseada, de manera similar a lo indicado para los piezómetros de tubo abierto. El sensor se conecta al sistema neumático de medición que se mantiene en la superficie del terreno, mediante mangueras plásticas a través de las que se conduce el aire a presión.

Piezómetros eléctricos: Este tipo de instrumentos guardan cierta similitud con los piezómetros neumáticos. Su diafragma es menos flexible, lo que determina que tengan una muy rápida respuesta a los cambios de presión en el agua, ya que los cambios volumétricos asociados son despreciables. En vez de los orificios para el sistema neumático, las deformaciones del propio diafragma funcionan como elemento de medición de la presión en el agua. Para ello se colocan o integran *strain gages* al diafragma, ya sea resistivos o de cuerda vibrante. Así pues, las deformaciones del diafragma están proporcionalmente relacionadas con los cambios de la presión que ejerce el agua sobre el diafragma, lo que se conoce mediante la respectiva calibración.

La señal de los *strain gages* se transmite a un equipo portátil de medición de microdeformaciones, la que se muestra digitalmente en pantalla. Desde luego la señal de estos sensores pueden ser monitoreados por un sistema automático de adquisición de datos, enviando incluso a distancia esa señal, como se describe en el capítulo 8. Como todos los piezómetros, los sensores electrónicos se colocan en el fondo de una perforación previamente realizada. El cable eléctrico con los conductores necesarios de excitación y respuesta se conducen hasta la superficie, donde se conectan a la unidad portátil de registro, o al sistema de registro.

6.5 APLICACIONES DE MEDICIONES DE PRESIÓN DEL AGUA Y DE PRECIPITACIÓN

Se muestra enseguida un par de casos en los que se han colocado los instrumentos antes descritos. En el primer caso-historia, el objetivo fue estudiar la variación de la precipitación pluvial y la succión en el terreno en una ladera en Malasia (Faisal, 2000). Las succiones fueron medidas con tensiómetros y bloques mátricos o de humedad, instalados a diferentes profundidades; y la precipitación, con un pluviómetro de cubeta automático. Se usaron estos bloques en virtud de que los tensiómetros sólo son capaces de medir valores de succión mátrica inferiores a 1 bar, en tanto que los bloques pueden medir más de 4 bars de presión negativa.

La Fig. 6.20 muestra el arreglo esquemático de la instrumentación de campo, así como un detalle en un sitio de colocación de tensiómetros. Para el monitoreo fue empleado un sistema automático de adquisición de datos (aspecto que se trata en el capítulo 8 de esta Guía), el cual permite un monitoreo prácticamente continuo y que resuelve los problemas de confiabilidad, accesibilidad y seguridad. La lectura de estos transductores fue registrada automáticamente con una periodicidad establecida (10 ó 30 minutos) atendiendo a la rapidez en el cambio de la succión medida. El sistema de adquisición de datos estaba soportado por una unidad de energía solar. La ladera estudiada forma parte de un corte en una autopista en Malasia, constituida por suelos residuales; en la Fig 6.21 se presenta su sección transversal y el arreglo de los sensores.

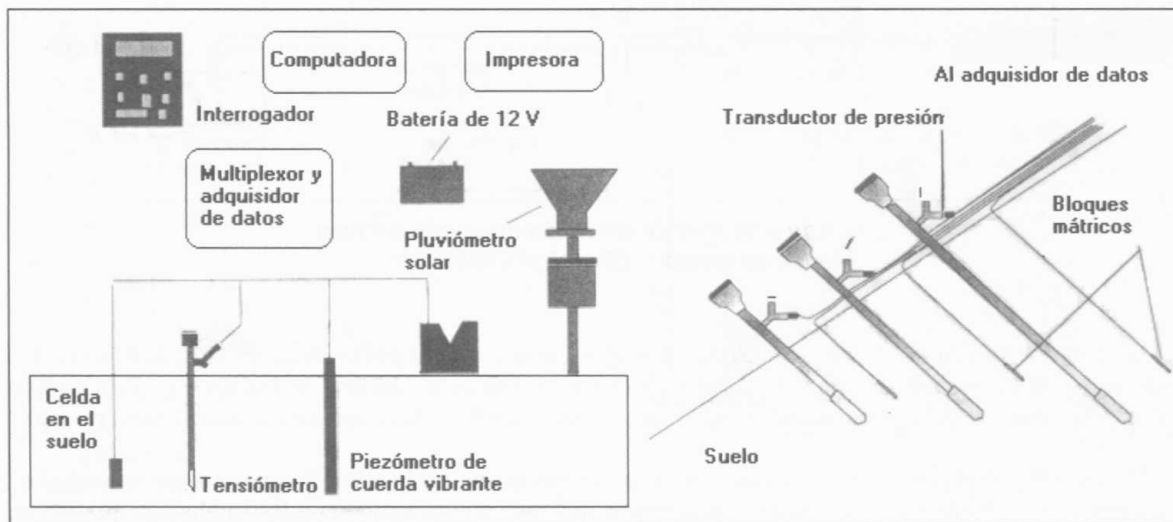


Fig. 6.20 Esquema de la instrumentación de una ladera en Malasia (Faisal, 2000)

La Fig. 6.22 da cuenta de las respuestas de los tensiómetros ubicados en la berma 4. Se distingue que las lecturas de succión para los sensores más superficiales son mayores que las de los relativamente más profundos. Además, la respuesta debida a la lluvia es menos pronunciada conforme aumenta la profundidad; así mismo, al ocurrir un cierto lapso sin lluvia, se aprecia un aumento de succión, y una reducción repentina con la ocurrencia de lluvias. Estos hechos muestran que antes de que se desarrolle presión positiva en el agua, que como se ha visto previamente provoca reducción de resistencia cortante de los suelos al punto de incluso provocar la falla de una ladera, la condición de inestabilidad se inicia con la reducción de la presión negativa o succión. En efecto, debe recordarse que el mecanismo de falla de una ladera comúnmente se inicia con la infiltración de agua de lluvia que causa una reducción de la succión mátrica en la zona de suelo no saturado; y con ello, una disminución de los esfuerzos efectivos.

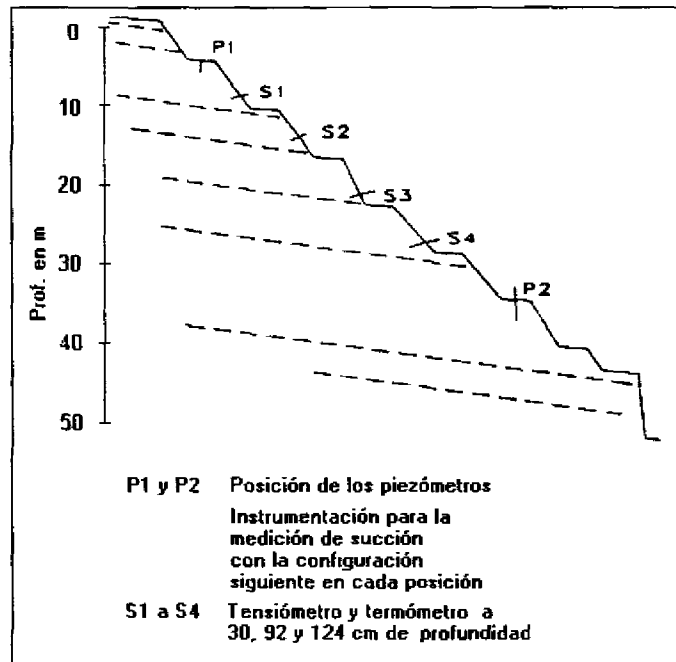


Fig. 6.21 Sección transversal del corte y arreglo de Instrumentos (Faisal, 2000)

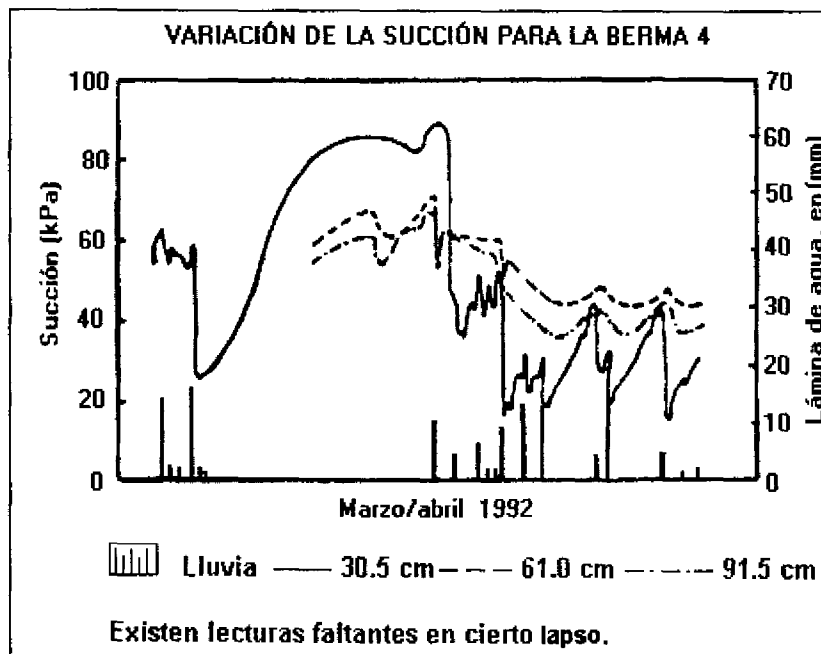


Fig. 6.22 Evolución de la succión mátrica en la berma 4, en el lapso de marzo-abril, 1992 (Faisal, 2000)

En efecto, las mediciones de succión en un segundo caso-historia ubicado en Singapur (Deutscher, 2000) muestran sin duda que el ascenso del nivel freático, resultado de la precipitación pluvial, provoca una disminución de la succión, tal como se muestra en la Fig. 6.23. Estos resultados nos indican también que existen periodos o tiempos clave que deben considerarse en el programa de monitoreo; éstos son.

- Al final de un periodo seco prolongado, cuando las presiones en el agua se encuentran en un mínimo (esto es, estabilidad de la ladera en un máximo).
- Siguiendo un evento o una serie de eventos de lluvias intensas, cuando la presión en el agua alcanza un máximo (o sea, estabilidad de la ladera en un mínimo).
- Durante un evento de lluvia significativa, cuando la distribución de la presión en el agua se encuentra en transición.

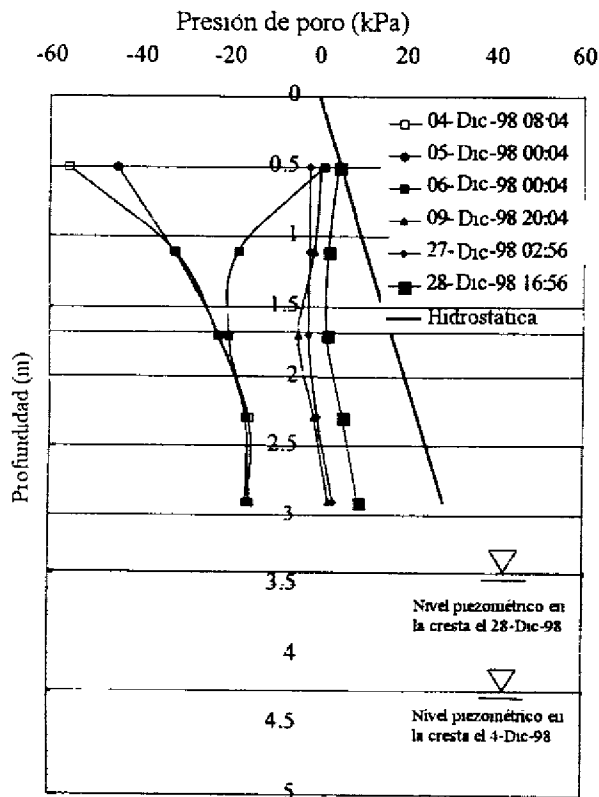


Fig. 6.23 Evolución de la presión en el agua del suelo de una ladera en Singapur (Deutscher, 2000)