

Incidencias del flujo lateral de agua en el suelo bajo condiciones naturales y en ausencia de evaporación e infiltración

ROMÁN ROMÁN ALBA (*)

RESUMEN Se ha estudiado la influencia que ejerce sobre una superficie impermeabilizada, las fluctuaciones de humedad de un terreno natural. Para ello se ha utilizado baterías de 10 tensiómetros, (hasta 2 m de profundidad) para determinar la succión y carga hidráulica y una sonda de neutrones para la humedad (hasta 2.5 m de profundidad).

Los resultados obtenidos después de 5 años de experiencias, demuestran que la humedad en la superficie impermeabilizada, no está afectada por las variaciones de humedad del terreno en condiciones naturales cuando la distancia al borde de impermeabilización es de 2.5 m. Para una distancia al borde de 0.5 m, la evolución de la humedad es paralela a la del terreno natural y desfasada en el tiempo. Para las cotas superficiales, el desfase es máximo (2-3 meses) y la intensidad y pérdida de humedad inferior bajo la superficie impermeabilizada. A partir de 1 m de profundidad no se observan diferencias.

INFLUENCE OF HORIZONTAL WATER FLOW FROM A SOIL IN NATURAL CONDITIONS ON A CONTIGUOUS COVERED SURFACE DEPRIVED OF EVAPORATION AND INFILTRATION

ABSTRACT A field experimentation over 5 years was conducted to study the influence of the variations of the moisture content in a soil profile under natural conditions on the moisture profile of a contiguous impermeabilized surface. Tensiometer were used for determining pressure head until 2 m depth and neutron probe for determining moisture profile until 2.5 m depth in 8 measurement point.

The soil moisture under the impermeabilized surface was not influenced by the soil-moisture in natural conditions if the distance to the cover is 2.5 m or more. For 0.5 m separation, the variations of the moisture in both soils were paralleled and displaced in time. The maximum elapsed time (2-3 month) was observed for the first 0.3 m soil depth, but for more than 1 m soil depth no difference was observed.

Palabras clave: Flujo horizontal agua; Superficie impermeabilizada; Condiciones naturales; Desfases de tiempo; Distancias; Profundidad.

INTRODUCCIÓN

Admitiendo que la estructura superior de la carretera actúe de capa impermeable, la humedad del terreno natural que la rodea, tanto en superficie como en profundidad, varía a lo largo de los distintos ciclos climáticos.

La humedad de la explanada depende del tipo de suelo, compactación, características de la construcción y de las fluctuaciones posteriores de la climatología. (Sánchez 1998).

Entre el suelo natural y la explanada se establecen flujos de agua por diferencias de presiones y en consecuencia las fluctuaciones de humedad del terreno natural afectan a la explanada (Parlange et al. 1982, Giraldez y Sposito 1985).

A densidad constante, la capacidad de soporte de un suelo varía con la humedad, siguiendo curvas análogas a las Proctor (Román 1971).

Cuando existen niveles freáticos próximos a la superficie, la incidencia del flujo de agua y variación de la humedad en la explanada es más acusada (Richards 1967).

Estas variaciones de la humedad en la explanada han sido también estudiadas en reconocimiento de carreteras. Ratnoğrajath (1972) concluye que la corrección de las deflexiones por la lluvia no pueden ser determinadas en la mayoría de los casos. Bellanger (1987) señala que el paralelismo existente entre el balance hídrico y las deflexiones no es suficiente para explicar todas las variaciones que se producen. Sánchez (1998) relaciona las deflexiones con las humedades en el borde de la carretera, poniendo de manifiesto la existencia de fenómenos de histéresis producidos por los desfases en la evolución de la humedad y el núcleo de la carretera y posiblemente por los asociados a las relaciones succión-humedad.

Una buena parte de los estudios realizados en la actualidad usan modelos teóricos. Se trata de evaluar los cambios de humedad que pueden esperarse en los terrenos y los posibles riesgos que producen (Alonso y Lloret 1983, Geramigad y Saxena 1986, Pollak 1986, Lloret y Alonso 1980).

(*) Doctor en Física. Laboratorio del Servicio de Tecnología de Carreteras D.G.C. En la actualidad en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Centro de Ciencias Medioambientales en Madrid.

En el presente trabajo se expone un desarrollo experimental para cuantificar, en condiciones de campo, los flujos de agua que se establecen en el entorno de una zona impermeabilizada en contacto con otra zona sometida a las condiciones naturales. El estudio se hace analizando las diferencias de humedad y succión hasta 2,5 m de profundidad en varios puntos separados entre sí un máximo de 2,5 m. Teniendo en cuenta que los procesos de movimiento de agua en la zona no saturada son extremadamente lentos, la investigación se ha desarrollado en un periodo de 5 años.

METODOLOGÍA

Anteriormente a hacer el diseño experimental y teniendo en cuenta la dispersión natural de la permeabilidad (3.000%) y de la humedad (15-65%, J. Salas 1985), se hizo un estudio previo de la variabilidad del terreno (Roman y Gómez 1993, Roman, 1996) a partir del cual se diseñó una experiencia con tres repeticiones (Fig. 1).

Sobre una hipotética vertical se sitúan los 10 tensiómetros a 0,1, 0,2, 0,3, 0,45, 0,6, 0,8, 1, 1,2, 1,5 y 2 m de profundidad y en medio el tubo de la sonda de neutrones. Respetando este orden y en paralelo se distribuyen los otros equipos. Cada equipo se numera y caracteriza por el número del tubo de la sonda de neutrones.

La disposición lineal de los tensiómetros no es la habitual en este tipo de experimentación pero consideramos que es la más adecuada para nuestro caso, ya que permite evaluar mejor las diferencias horizontales de humedad y succión que pueden presentarse.

La impermeabilización se hace tapando con una doble capa de plástico una superficie de 50 m² (10x5 m) para evitar la infiltración del agua de lluvia y la evaporación directa. Uno de los bordes del plástico coincide con la mediana

de separación de los tubos centrales quedando situados los correspondientes equipos a 0,5 m del borde. El extremo opuesto, a 2,5 m, permite que sobre los equipos centrales tengan el mismo efecto ambos bordes. Los otros dos extremos del plástico, también situados a 2,5 m de los tensiómetros más próximos, permiten independizar las medidas del efecto borde.

En medio de ambas capas de plástico se pone otra de paja para que actúe como aislante térmico y minimice los efectos de flujo agua que pueden producirse por gradientes térmicos.

La calibración de la sonda de neutrones se hizo por profundidades y utilizando solo tres tubos para determinar las rectas de calibración con el fin de no alterar las condiciones del terreno intermedio de los tubos (Roman 1996).

Las primeras determinaciones experimentales de humedad y succión son de abril de 1990, después de un periodo de lluvias importante.

Al principio, todos los equipos se mantienen al aire al objeto de observar el comportamiento de cada una de las localizaciones del ensayo. Como consecuencia de la heterogeneidad natural de los datos de succión hubo que eliminar de la experiencia una de las series de medida.

El 20 de octubre, después de precipitaciones de 81,6 l/m², se impermeabilizan los 50 m² de superficie en las dos instalaciones. El 21 de abril de 1992, dos años después de iniciada la experiencia, se produce una entrada incontrolada de agua. El 9 de junio, hay otra entrada del mismo origen y más cuantiosa. El agua procede del riego por superficie de la parcela colindante y separada unos 10 m del borde de plástico. Los puntos de medida más próximos, 4 y 8, son los más afectados en la primera fecha. En la segunda, se inunda toda la superficie experimental con diferentes consecuencias

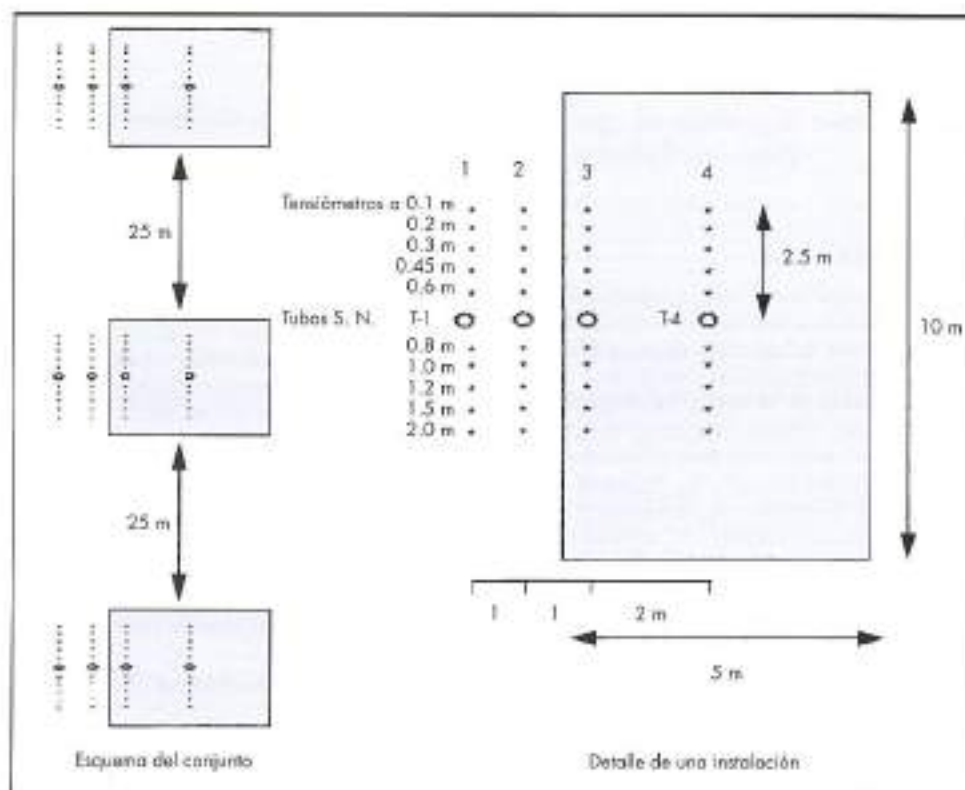


FIGURA 1. Diseño experimental.

en cada uno de los tubos. Así en los tubos 3-4 y 7-8 penetra todo el agua en el suelo ya que circula bajo el plástico y no se evapora. En los tubos 1-2 y 5-6 el agua penetra poco ya que la superficie del terreno está muy seca y hay una fuerte evaporación.

La experiencia continua hasta el 27 de julio de 1993 en que se elimina el plástico. Entre esta fecha y el 7 de octubre de 1994, se mantiene a la intemperie toda la superficie de la experiencia, con lo que se alcanza una situación análoga de flujos de agua en todos los tubos, lo que permite reiniciar el proceso de impermeabilización en las dos instalaciones.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Movimiento del agua en condiciones naturales

El flujo del agua en condiciones naturales se ha hecho anteriormente a impermeabilizar parcialmente la experiencia al objeto de verificar si el movimiento vertical en todos los puntos tiene el mismo comportamiento. Se ha realizado entre abril y noviembre del 90 que incluye condiciones climatológicas muy variadas. Al principio el suelo está saturado y la curva de carga hidráulica profundidad indica un movimiento del agua descendente (fig. 2). En ausencia de lluvia el agua del suelo se evapora y la succión de las primeras capas aumenta. En la curva de carga hidráulica se observa que hay un cambio de curvatura que indica que el gradiente hidráulico cambia de signo, haciéndose nulo a una determinada profundidad (Z_0) denominada como cota o plano de flujo nulo. En consecuencia el movimiento de agua es ascendente entre 0 y Z_0 y descendente desde Z_0 .

A medida que el suelo se deseca superficialmente Z_0 se hace más profunda y el gradiente para cotas superiores disminuye mientras aumenta en superficie. En la Fig. 2 puede verse que Z_0 vale 40 cm el 19.4, 50-60 cm el 3.5, 80 cm el 20.5 y 100 cm el 3.6.

Cuando la pérdida de humedad es más fuerte, la succión supera los 800 Hpa y los tensiómetros dejan de medir, por lo que el perfil de carga no puede representarse en su totalidad a partir de junio. El 5.9 el gradiente de carga, en profundidad ha cambiado de signo y hay un único movimiento del agua en el suelo en sentido hacia arriba.

Con las lluvias posteriores las capas superficiales ganan en humedad y volvemos a encontrar una cota de flujo nulo que nos separa un movimiento descendente en superficie y ascendente en profundidad. El 29.10 Z_0 vale 40 cm (Fig. 2) como al principio de la experiencia con los sentidos de los flujos de agua invertidos ya que al principio estábamos en un proceso de desecación del terreno y ahora en el de rehumectación.

Con esta situación de doble flujo descendente y ascendente se procede a tapar con plástico las series centrales.

Movimiento del agua en el suelo bajo capa impermeable

Para detectar los flujos de agua horizontales tenemos que examinar los gradientes de carga a una misma profundidad. Para ello hemos representado la carga hidráulica a las distintas profundidades con respecto al tiempo (días transcurridos desde el inicio de la experiencia).

En las Figuras 3 y 4 se da esta variación para la serie de tubos 1 a 4. No se incluyen los datos de carga a 10 y 20 cm de profundidad porque la succión supera la atmosférica durante la mayor parte del tiempo y los tensiómetros funcionan solo en los periodos más húmedos. El punto $t = 200$ es el momento de la impermeabilización. Hasta esa fecha no hay diferencias entre las cargas de los distintos tubos a profundidad constante por lo que solo hay movimiento vertical del

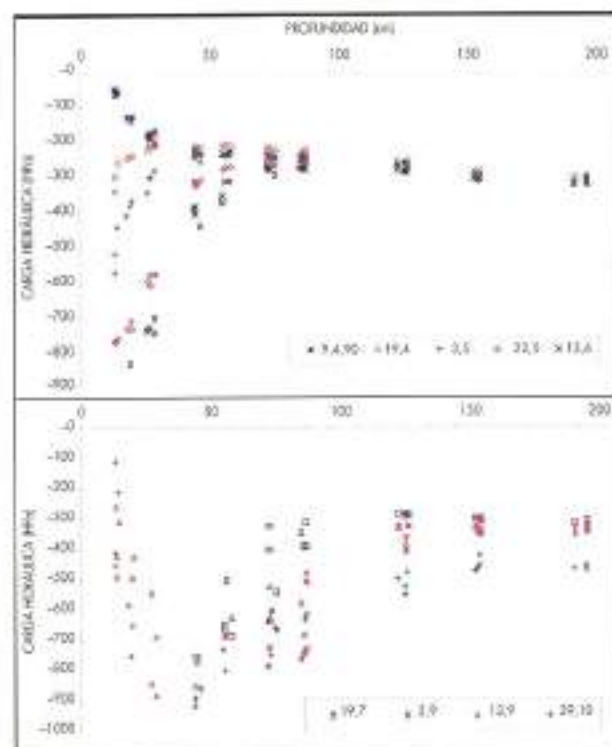


FIGURA 2. Variación de la carga hidráulica con la profundidad en los tubos 5 a 8 antes de impermeabilizar la zona central.

agua tal y como se acaba de comprobar en el apartado anterior.

A partir de $t = 200$, aparecen diferencias entre las cargas de los tubos situados bajo plástico y los situados en condiciones naturales. Estas diferencias varían según el tubo, la profundidad y el tiempo. Así para profundidades iguales o superiores a 130 cm solo aparecen después del verano de 1991 ($t = 480$); cae la carga hidráulica de los tubos 1-2 y más tarde la del tubo 3. Por consiguiente aparecen gradientes de carga laterales, primero entre ambas superficies (tubos 1-2 respecto a 3) y posteriormente dentro de la superficie impermeabilizada (diferencias entre el tubo 3 y 4).

Para 90 cm se observa que los gradientes laterales se establecen con anterioridad, tanto entre ambas superficies como en la propia superficie impermeabilizada lo que manifiesta flujos laterales de agua.

Para profundidades menores se observa el mismo proceso en tiempos anteriores.

Para las profundidades de 30 y 45 se comprueba que los tubos 1-2 están afectados por la lluvia que se produce en cada periodo y el gradiente lateral se establece muy rápidamente.

En resumen, podemos deducir de estas figuras que entre la zona impermeabilizada y no impermeabilizada se establecen unos flujos de agua que se manifiestan primero en superficie y posteriormente en profundidad. A los 2 m estos gradientes prácticamente no existen.

Desfases en los procesos de entre la superficie impermeabilizada y la superficie en condiciones naturales

En las Figuras 5 y 6 se dan las variaciones de la humedad con el tiempo a diferentes profundidades para los 4 tubos de la misma repetición (1 a 4).

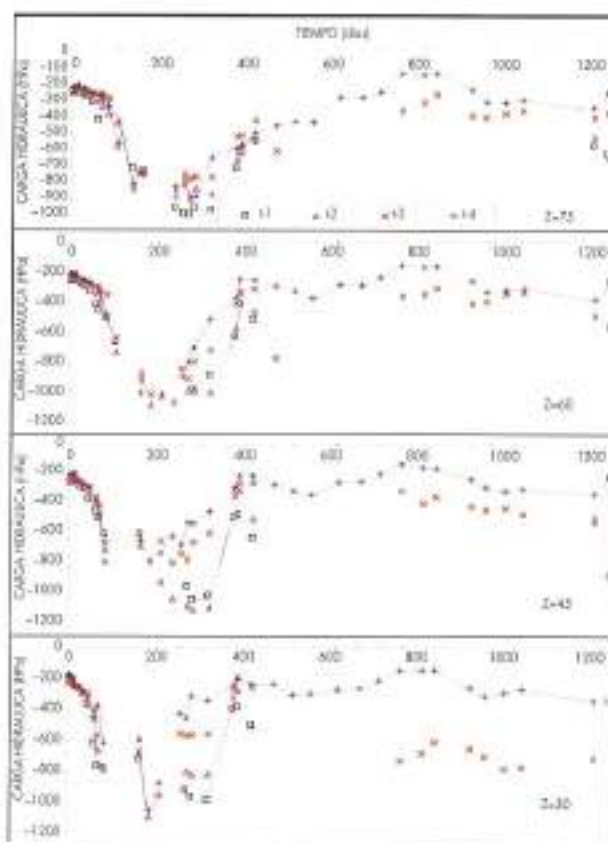


FIGURA 3. Variación de la carga hidráulica con el tiempo a 30-45-60-75 cm de profundidad.

Hasta la fecha de la impermeabilización, $t = 200$, la evolución de las humedades en todos los tubos y en todas las profundidades es paralela y está determinada por las condiciones climatológicas.

A partir de $t = 200$ las diferencias en la evolución de las humedades corresponderán a los flujos de agua que se han producido. Como en sentido horizontal, según la profundidad se manifiestan en diferentes tiempos el análisis se efectuará por profundidades y tubos.

Para 10 cm de profundidad y para el tubo 4, la humedad desciende suavemente al principio, y se estabiliza en el 28% desde el 22 de agosto del 91, lo que indica que el flujo lateral del agua no se detecta a esa distancia del borde de impermeabilización.

La evolución de la humedad de los tubos 1 y 2 son paralelas. Siguen una línea sinusoidal pasando por sucesivos máximos y mínimos relativos en función de las condiciones climatológicas. La variación de la humedad del tubo 3 es paralela a estas pero desfasada en el tiempo. Así el primer máximo de humedad se produce en el tubo 3, 67 días después que en los tubos 1-2 (del 14 de febrero al 23 de abril del 91). El mínimo se desplaza 64 días y el segundo máximo 93 días.

Estos valores de los desfases están afectados por las fechas en las que se hace el control de humedad. Un control diario de humedades hubiera proporcionado datos más precisos. Los datos posteriores al 21 de abril de 1992 ($t = 796$) no se han considerado pues fue el momento en que se produjo una entrada de agua de la parcela contigua.

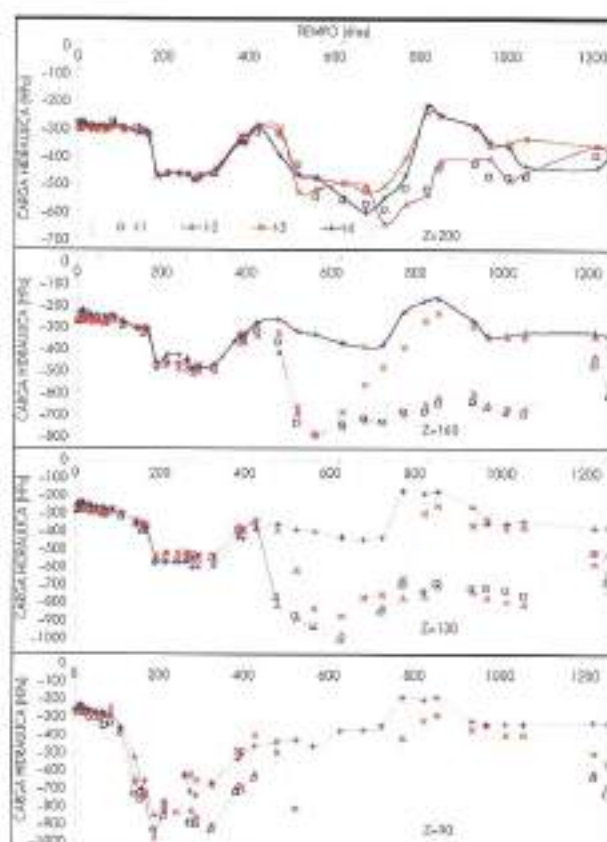


FIGURA 4. Variación de la carga hidráulica con el tiempo a 90-130-160-200 cm de profundidad.

Para analizar mejor la respuesta a la pérdida de humedad hemos incorporado dos parámetros nuevos: la **intensidad** de la pérdida de humedad, definida como la pendiente media de la curva de descenso y que representa el % de humedad que pierde cada día, y la **pérdida relativa** de humedad, medida como la variación de humedad perdida durante todo el periodo y referida a la humedad inicial. Para un periodo dado de descenso de humedad la pérdida relativa (PR) viene dada por

$$PR = (\theta_i - \theta_f) / \theta_i$$

θ_i y θ_f son las humedades en el máximo y mínimo respectivamente.

De la Figura 6 puede obtenerse que los tubos 1, 2 y 3 pierden agua en la primera bajada con una intensidad del 0.2%/día, mientras que la pérdida relativa de humedad es 0.6 para el tubo 3 y del 0.8 para los tubos 1-2. Comprobamos mediante estos parámetros que el tubo 3, junto al borde de la zona impermeable, pierde agua con la misma intensidad que el 1 y 2, pero desfasado en el tiempo, por lo que finalmente su pérdida relativa es menor.

Las variaciones de humedad a 30 cm para todos los tubos son análogas a las encontradas para 10 cm, aunque desplazadas en el tiempo (la pérdida de humedad es más lenta cuanto más profunda es la capa y su humectación requiere que previamente se saturen las capas superiores).

Así se comprueba que el tubo 3 alcanza, a 30 cm, el primer máximo de humedad un mes más tarde que a 10 cm, el primer mínimo coincide y no hay un segundo máximo. Para

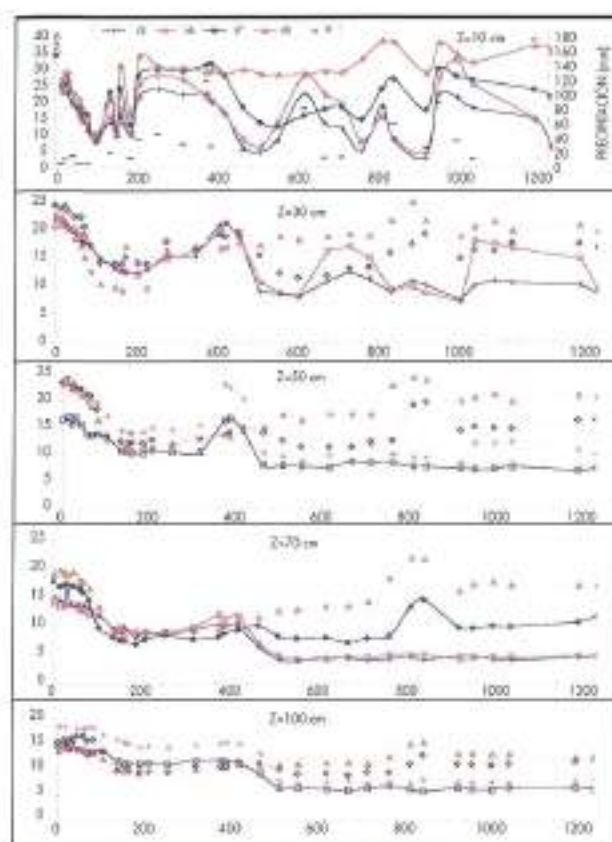


FIGURA 5. Variación de la humedad con el tiempo a 10-30-50-70-100 cm de profundidad.

los tubos 1 y 2, los retrasos con respecto a 10 cm son 68 días para el primer máximo, 42 para el primer mínimo, 50 para el segundo máximo y los segundos mínimos coinciden en las mismas fechas.

Si comparamos los desfases entre la evolución de humedad en los tubos 1, 2 y el 3 para la profundidad de 30 cm se comprueba que es de 31 días para el primer máximo y no se observan diferencias en el resto. Al aumentar la profundidad, el movimiento del agua por capilaridad es más lento, y las evoluciones de humedad entre la superficie impermeabilizada y en condiciones naturales se desfasan menos.

La intensidad de la pérdida de humedad para los tubos 1-2 (0.21 - 0.18 %/día) y del tubo 3 (0.09) así como las pérdidas relativas, 0.62 para los tubos 1-2 y 0.39 para el 3, vuelven a señalar diferencias importantes en el comportamiento del suelo bajo capa impermeable respecto a las condiciones naturales.

Cuando se analizan las fluctuaciones de humedad a 50 cm de profundidad se comprueba que son análogas a las correspondientes a 30 cm con oscilaciones más suaves. Así para el tubo 3 la diferencia entre 30 y 50 cm es que el mínimo de humedad se mantiene durante más tiempo y comienza a crecer 50 días más tarde.

Sin embargo en la evolución de la humedad de los tubos 1-2 empiezan a aparecer algunas diferencias. Para profundidades inferiores a 50 cm las curvas son paralelas alcanzándose los máximos y mínimos en las mismas fechas para ambos tubos. Para 50 cm esto no ocurre más que en el primer máximo. El primer mínimo y el segundo máximo se retrasan

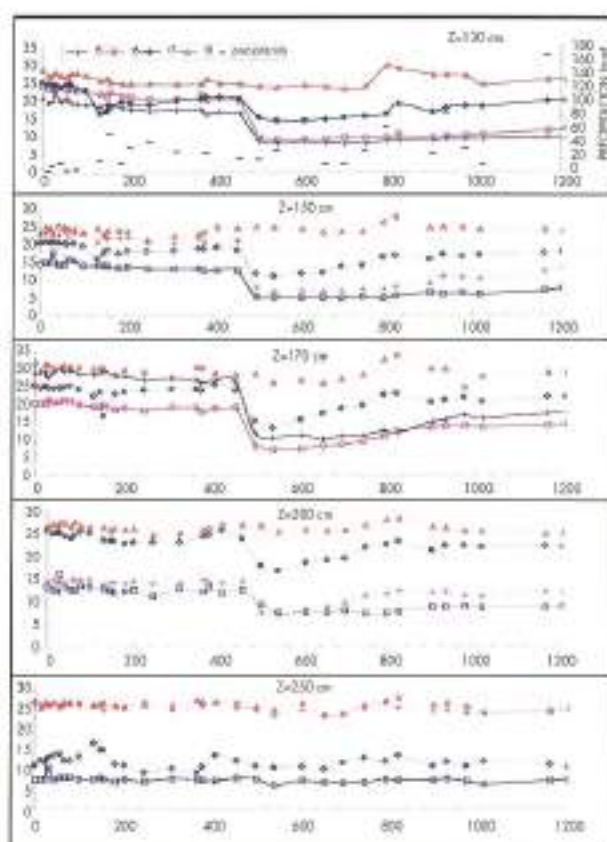


FIGURA 6. Variación de la humedad con el tiempo a 130-150-170-200-250 cm de profundidad.

casi 2 meses en el tubo 2 respecto al 1; además el crecimiento de humedad en el segundo máximo es del orden del 4% para el tubo 2 y solo del 1% para el tubo 1. Estos datos demuestran por sí solos la existencia de un flujo lateral de agua desde la superficie impermeabilizada que afecta solo a la humedad del tubo 2.

Los desfases en el primer máximo se mantienen en 30 días entre los tubos 1-2 y el 3. El primer mínimo se puede considerar que lo alcanzan a la vez pero se mantiene en el tubo 3, 114 días más con respecto al tubo 1 y 50 días más respecto al tubo 2.

Otro aspecto a destacar es que cuando se produce la entrada de agua de riego, el 9 de junio del 92, las humedades de los tubos 1-2 a 50 cm descienden, es decir que no llega agua en esa fecha a esta profundidad. Esto es debido a que las capas superficiales de estos tubos están más secas, y más alejadas de la zona de entrada de agua.

También se desprende de esta gráfica que la humedad de los tubos 1-2 en la fecha siguiente a la entrada de agua se mantiene en vez de continuar descendiendo, lo que demuestra la existencia de un flujo lateral de agua.

La intensidad de pérdida de humedad es de nuevo más baja en el tubo 3 (0.03%/día) que en los tubos 1 (0.13%/día) y 2 (0.2%/día). La pérdida relativa de humedad es también más baja en el tubo 3 (0.21) que en el tubo 1 (0.5) y 2 (0.57).

Para 70 cm de profundidad la humedad del tubo 4 sigue siendo creciente, la del tubo 3 presenta un máximo el 9 de julio ($t = 455$), desplazado 47 días respecto al de 50 cm, mientras que el mínimo es en las mismas fechas.

Para los tubos 1-2, el primer máximo y mínimo se alcanzan en el mismo periodo que para 50 cm; después del mínimo, la humedad ya no crece, se estabiliza, y tampoco se observan diferencias entre el tubo 1 y 2 ni antes de producirse la entrada de agua de riego ni después.

La intensidad de pérdida de agua es del orden de 0.1%/día para los tubos 1 y 2 y del 0.05%/día para el tubo 3. En la pérdida relativa de humedad, las diferencias son más importantes, 0.6 para los tubos 1-2 y 0.2 para el tubo 3.

Las variaciones de humedad a 100 cm de profundidad son similares a las correspondientes a 70 cm. El primer máximo de los tubos 1 y 2 es muy poco marcado ya que las lluvias durante el periodo, invierno del 91, no han sido suficientes para recargar la reserva de agua de las capas superiores. Se mantiene el desfase de fechas entre los tubos 1-2 y 3 para el primer máximo de humedad en 30 días y no se observan diferencias entre la evolución de la humedad de los tubos 1 y 2.

Para profundidades superiores a 100 cm las variaciones de humedad son análogas en todos los tubos con descensos de humedad hasta la fecha de entrada de agua, observable para estas profundidades únicamente en los tubos 3-4.

A partir de 170 cm de profundidad las humedades permanecen prácticamente constantes a lo largo de toda la experiencia.

Las variaciones de la carga hidráulica y de la humedad para los tubos de la otra repetición siguen pautas semejantes a las ya descritos:

1º desfases de tiempo en profundidad para un mismo tubo.

2º desfases de tiempo entre los tubos a un lado y otro del límite de la zona impermeabilizada, máximos en la capa superficial y nulos a partir de los 100 cm.

Intensidad y pérdida relativa de humedad

Las Figuras 7 a 10 representan los datos de intensidad y pérdida relativa de humedad para las dos repeticiones y profundidades hasta 200 cm. Los datos correspondientes a los tubos 4 y 8, situados en el centro de la superficie impermeabilizada, no aparecen en estas gráficas ya que como se ha visto anteriormente la humedad tiene una evolución con el tiempo diferente al resto de los tubos.

En la figura 7 puede observarse que la intensidad de pérdida de humedad es máxima para los 10-20 cm y decrece con la profundidad hasta los 100-120 cm. A partir de esta cota la intensidad vuelve a crecer. Esto es debido, a que la humedad a estas profundidades, no varía en el primer ciclo seco, pero sí en el segundo, por lo que las condiciones de humedad elevada y gradiente hidráulico alto producen un movimiento de agua en el suelo más intenso. La intensidad de pérdida de humedad en los tubos 1 y 2 es más alta que la del tubo 3. Las diferencias más importantes se encuentran en la capa de suelo comprendida entre los 20-50 cm en la que la acción de la capa impermeable reduce considerablemente la intensidad de pérdida. Para profundidades mayores las diferen-

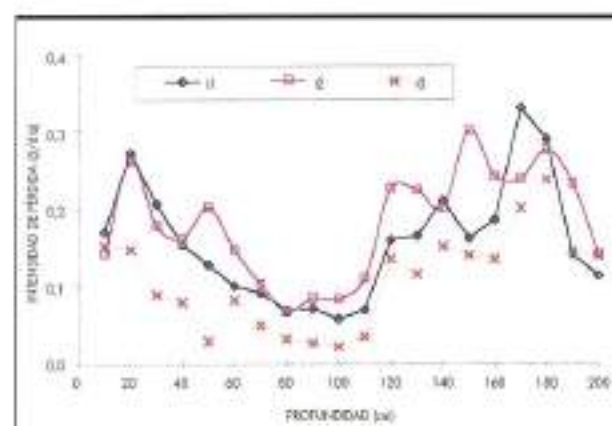


FIGURA 7. Intensidad de pérdida de humedad (tubos 1 a 3).

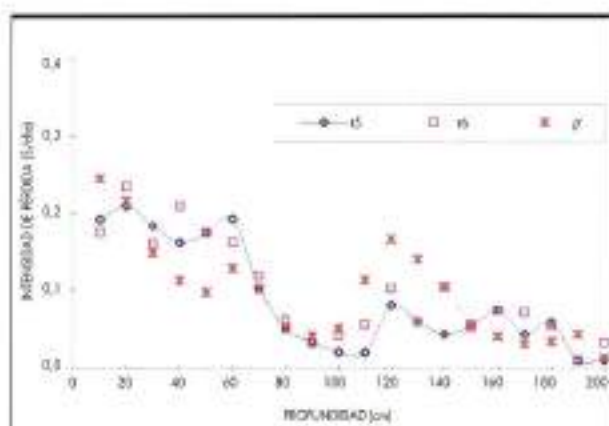


FIGURA 9. Intensidad de pérdida de humedad (tubos 5 a 7).

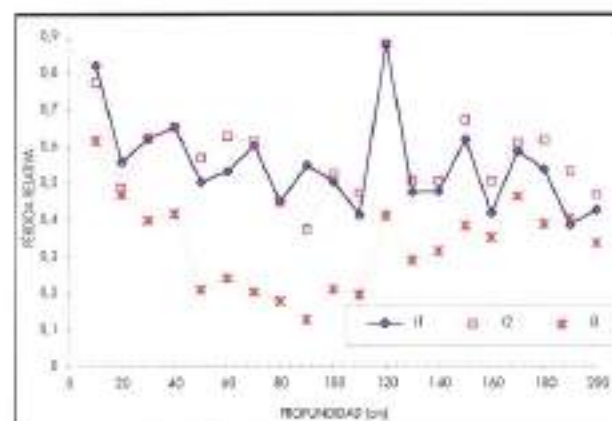


FIGURA 8. Pérdida relativa de humedad (tubos 1 a 3).

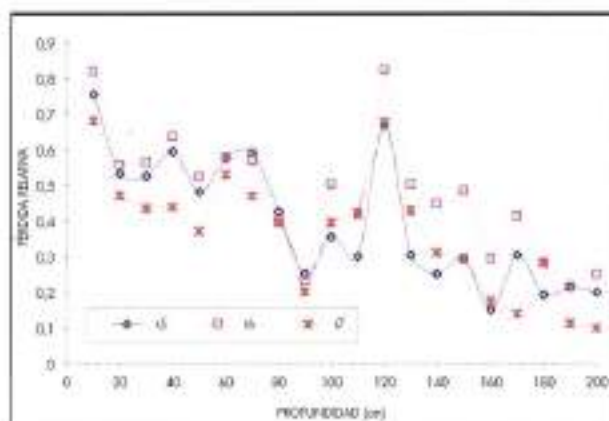


FIGURA 10. Pérdida relativa de humedad (tubos 5 a 7).

cias son mínimas ya que los flujos de agua en profundidad son mayores que en superficie, porque el suelo está más seco, lo que permite una mejor redistribución del agua.

Si consideramos las pérdidas relativas de humedad (Fig. 8) se puede observar que para los tubos 1 y 2 permanece entre 0.4-0.6 para todas las profundidades a excepción de 10 y 120 cm. En el primer caso, al ser la más próxima a la superficie es la que mayores oscilaciones debe soportar y en el segundo, a esa profundidad existe una capa de arena caracterizada por sus buenas condiciones de conductividad y baja retención a succiones altas. Para el tubo 3 la pérdida relativa de humedad decrece hasta los 100-110 cm, crece en la capa de arena y se estabiliza posteriormente, permaneciendo inferior a los tubos 1 y 2 hasta los 180 cm. Estos resultados ponen de manifiesto que la capa impermeable reduce la pérdida de humedad considerablemente desde los 20 primeros centímetros de suelo hasta los 180 cm.

En la Fig. 9 puede verse que el descenso de la intensidad de pérdida de humedad en la otra repetición (tubos 5-8) llega así mismo hasta los 100-110 cm y que la capa de arena se encuentra a 120 cm. Las diferencias entre la zona situada al borde de la capa impermeable (tubo 7) y las que se encuentran en condiciones naturales son menores y solamente perceptibles hasta los 60 cm.

En la Fig. 10 se dan los resultados de la pérdida relativa de humedad para esta repetición. Salvo el pico que se observa en la capa de arena la tendencia general es ahora decreciente con la profundidad y solo hay diferencia entre el tubo 7 y el 5-6 entre 20-80 cm de profundidad.

Estos resultados ponen de manifiesto que las condiciones de humedad de un punto situado en una superficie impermeable y a 0.5 m del borde está influenciado por los flujos de agua que se producen en la superficie del suelo bajo condiciones naturales. Las fluctuaciones de humedad con el tiempo son paralelas, si bien en el punto bajo superficie impermeable pueden desfasarse con respecto a las condiciones naturales. Los procesos de desecación y rehumectación son más intensos en la zona no impermeabilizada que a 0.5 m del borde y bajo capa impermeable.

Estos resultados no son uniformes con la profundidad. Los desfases son mayores si la profundidad es mínima, pero las diferencias de intensidad y pérdida de humedad son menores. Cuando la profundidad crece, los desfases disminuyen y aumentan las diferencias en intensidad y pérdida relativa de humedad, hasta que se alcanza una determinada cota, a partir de la cual ya no hay desfases ni diferencias en la intensidad y pérdida relativa de humedad.

Este comportamiento, a primera vista extraño, concuerda sin embargo con el mecanismo por el que se rige el movimiento de agua en el suelo. Para capas más superficiales el agua de la zona impermeabilizada solo puede desplazarse lateralmente hacia el borde no impermeabilizado. Esta capa es la que más rápidamente pierde el agua, por lo que la velocidad de desplazamiento se vuelve muy lenta y se producen los desfases máximos. No obstante la proximidad a la superficie (menor recorrido que debe efectuar el agua) da como resultado final que la intensidad y pérdida relativa de humedad sean más altas.

Para profundidades mayores, el flujo de agua en la zona impermeabilizada además de lateral, es vertical, pues las capas de arriba se desecan. Este doble flujo es más intenso. Por otra parte los desfases de tiempo entre el momento en que se produce la desecación o rehumectación de la zona impermeabilizada se solapan con los que se producen en profundidad en la zona no impermeabilizada y tienden a desaparecer.

Las diferencias que se encuentran entre las dos repeticiones (de intensidad y pérdida relativa de humedad con la profundidad) deben estar ligadas a las características hidrodinámicas de cada una de las dos zonas.

Así Kengni et al (1994) y Kengni (1988) para unos suelos de similares características texturales al de nuestro ensayo, y para dos puntos próximos (separados 30 m), utilizando una fórmula obtenida a partir de la dada por Brutsaert (1968), obtienen las siguientes relaciones entre la conductividad hidráulica y la humedad:

$$K = 633,83 \cdot \theta^{7.0}$$

$$K = 3345,1 \cdot \theta^{6.354}$$

estando K en mm/h y θ en m^3/m^3 .

De estas relaciones se deduce que cuando la humedad pasa del 0.2 al 0.1 la conductividad se mueve de $8 \cdot 10^{-2}$ a $0.63 \cdot 10^{-4}$ mm/h si utilizamos la primera de las relaciones y de $12 \cdot 10^{-2}$ a $14 \cdot 10^{-4}$ mm/h si utilizamos la segunda.

El hecho de haber tenido una climatología con lluvias escasas durante los dos años siguientes a tapar los tubos nos ha impedido analizar con más detalle los desfases de los ciclos ya que solo ha habido desecación y no rehumectación de las capas profundas (más de 100 cm).

Flujo del agua bajo superficie impermeabilizada y a 2.5 m del borde

Para el tubo situado en el centro de la zona impermeabilizada y a 2.5 m del borde, las fluctuaciones de humedad con el tiempo aparecen independientes de las de los restantes tubos si bien se observan gradientes hidráulicos laterales. Para analizar mejor el comportamiento de la humedad en esta posición en las Figuras 11 y 12 se dan las variaciones de humedad y carga con la profundidad de uno de los puntos (el tubo 8).

El 29.10.90, inmediatamente después de tapado, el plano de flujo nulo se sitúa hacia los 40 cm. El 13.12.90, mes y medio después, se observa que ha habido un paso de agua de las capas más superficiales hacia abajo, y la capa de flujo nulo se desplaza ligeramente en profundidad hasta los 50 cm. Este proceso de redistribución del agua, se mantiene a lo largo del tiempo tal y como se aprecia en la figura 11 en la que el plano del flujo nulo va desplazándose en profundidad a medida que el agua va pasando de unas capas a otras. En la gráfica 12 vemos cómo se produce ese flujo de agua. Hay variaciones apreciables de humedad en los primeros 50-60 cm, mientras que para profundidades mayores prácticamente no se notan. Tenemos un movimiento de agua característico de un flujo descendente en superficie y ascendente en profundidad sin que se observen movimientos laterales.

Estos resultados confirman que para la distancia de 2.5 m de separación del borde de la capa impermeable, las fluctuaciones de humedad que se producen fuera no afectan a la del punto.

No obstante los gradientes laterales de carga hidráulica observados en las Fig. 3 y 4 se deben traducir en movimiento de agua hacia el exterior, que no se nota por la diferencia de conductividades vertical y horizontal. Mientras verticalmente el contenido de humedad es relativamente alto, horizontalmente y a medida que nos acercamos al borde, la humedad es baja, por lo que el flujo vertical será mucho más intenso que el horizontal. Si añadimos que el espacio a recorrer por el agua es mayor horizontal que verticalmente se llega a la conclusión de que el movimiento horizontal del agua es despreciable, es ese punto, frente al vertical como se ha visto experimentalmente.

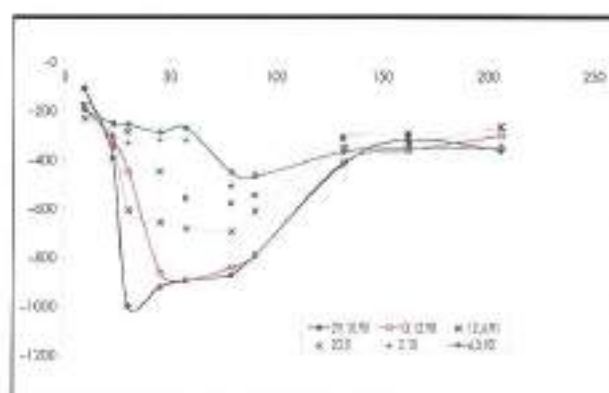


FIGURA 11. Variación de la carga hidráulica con la profundidad en el centro de la zona impermeabilizada (tubo 8).

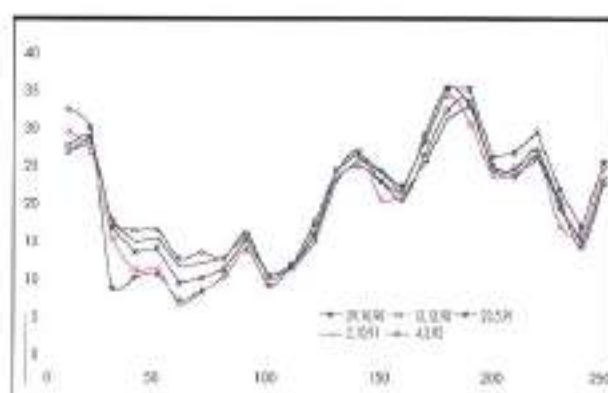


FIGURA 12. Variación de la humedad con la profundidad en el centro de la zona impermeabilizada (tubo 8).

CONCLUSIONES

Cuando en un suelo se dispone de una zona impermeabilizada que impide la evaporación e infiltración directa del agua, la humedad bajo esa superficie puede o no estar influenciada por la del terreno que la rodea según la distancia al borde de impermeabilización.

Si la distancia es igual o superior a 2,5 m los cambios de humedad en el perfil obedecen exclusivamente a los flujos verticales que se establezcan sin que se vean afectados por los que ocurran en el exterior. En el caso que se ha expuesto el movimiento de agua era descendente hasta los 40 cm y ascendente para cotas mayores y en este esquema permanece, variando únicamente el plano de flujo nulo.

Para distancias de 0,5 m la evolución de la humedad bajo la capa impermeable es paralela a la que se produce en los bordes pero desfasada en el tiempo según la profundidad. Hay un máximo retardo en las capas más superficiales (entre 64-93 días a 10 cm de profundidad) y es nulo para profundidades superiores a 100 cm.

A medida que aumenta la profundidad las posibilidades de circulación del agua desde la zona impermeabilizada a la permeable son mayores ya que no solo es el agua lateral la que se desplaza de una zona a otra, sino también el agua que se desplaza verticalmente. Para el caso extremo de los primeros centímetros de la capa impermeable, solo puede haber desplazamiento lateral.

Como los procesos son muy lentos, el retraso en transmitir en profundidad se solapa con el en lateral, tendiendo a igualarse.

Si las capas más profundas son las que menos desfases tienen, son también las que en menor medida pierden agua. Mientras las primeras capas pueden llegar a perder hasta un 60% de su humedad, en profundidad puede ser solo del 20%.

Se observa en las dos repeticiones una gran variabilidad espacial de la conductividad hidráulica.

BIBLIOGRAFÍA

- ALONSO, E. E. and LLORET, A. 1983. Evolution in time of the reliability of slopes in partially saturated soils. 4 Int. Conf. on Applications of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering. Firenze Italia. Pitagora Editrice.
- BELLANGUER, J., 1987. Déflexion des chaussées et bilan hydrique. Bull. de Liaison L. P. C. 149; 45-50.

GERAMINEGAD, M. and SAXENA, S. K., 1986. A coupled thermoelastic model for saturated-unsaturated porous media. *Geotechnique* 36 (4): 539-550.

GIRALDEZ, J. V. and SPOSITO, G., 1985. Infiltration in swelling soils. *Water Resour. Res.* 22 (1), 33-44.

JIMENEZ SALAS, J. A., 1985. Métodos deterministas versus métodos probabilistas en geotecnia. En *Geostatística aplicada a la mecánica del suelo*. Ed. CEDEX.

KENGNI, L., 1993. Mesure in-situ des pertes d'eau et azote sous culture de maïs irriguée. Application à la Plaine de la Bièvre (Isère). Tesis. Univ. J. Fourier. Grenoble I. Francia.

KENGNI, L.; VACHAUD, G.; THONY, J. L.; LATY, R.; GARINO, B.; CASABIANCA, H.; JAME, P. AND VISCOGLIOSI, R., 1994. Field measurements of water and nitrogen losses under irrigated maize. *J. of Hydrol.* 162: 23-46.

LLORET, A. and ALONSO, E. E., 1980. Consolidation of unsaturated soils including swelling and collapse behaviour. *Geotechnique* 30 (4), 449-477.

PARLANGE, J. Y.; LISLE, I. G.; BRADDOCK, R. D. and SMITH, R. E., 1982. The three-parameter infiltration equation. *Soil Sci.* 133 (6): 337-341.

POLLOK, D. W., 1986. Simulation of fluid flow and energy transport processes associated with high-level radioactive waste disposal in unsaturated alluvium. *Water Resour. Res.* 22 (5): 765-775.

RICHARDS, J., 1967. Moisture flow and equilibria in unsaturated soils for shallow foundation. 4-34. En *Permeability and Capillarity of Soils*. STP417. American Society For Testing and materials. Philadelphia, USA.

RATIRAJAH, 1972. 3ª Conferencia Internacional sobre proyectos estructurales de pavimentos asfálticos. Londres 1972.

ROMÁN, R., 1971. Ensayos de CBR. III Reunión de Suelos. Madrid.

ROMÁN, R. y GÓMEZ, A., 1993. Variabilidad de parámetros geotécnicos en suelos casi-homogéneos. Evaluación del tamaño óptimo de muestra y selección de la misma. *Ing. Civil* 91; 113-123.

ROMÁN, R.; CABALLERO, R.; BUSTOS, A.; DÍEZ, J. A.; CARTAGENA M. C.; AND VALLEJO, A., 1996. Water and solute movement under conventional corn in central Spain. 1 Water losses. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 1530-1536.

ROMÁN, R., 1996. Desarrollo experimental para el estudio del movimiento de agua in situ. *Ing. Civil* (en revisión).

SÁNCHEZ LÓPEZ, B., 1988. Efectos del agua sobre los pavimentos de carreteras. *Rev. O.P. Set* 88: 833-856.

VAMOS A TODA MÁQUINA.



FICOP

FERIA DE
MAQUINARIA PARA
CONSTRUCCION,
OBRAS PUBLICAS,
MINERIA Y
MANUTENCION

NUEVAS FECHAS: 17/21 NOVIEMBRE, 1998

MADRID, capital ferial, se mueve a toda máquina. Alrededor de **FICOP**. Para que usted también lo haga. Porque allí encontrará los equipos y las instalaciones más avanzadas, eficaces, rentables y seguras.

El mercado se mueve rápido. Hay una nueva concepción de las obras públicas y la construcción, que le exigen las soluciones técnicas más innovadoras. La mejor competitividad en los costes. La excelencia en la calidad. Y el acortamiento en los plazos. Todo esto lo encontrará en **FICOP'98**. Para moverse con éxito en el mundo de la construcción.



ASOCIACIÓN NACIONAL
DE FABRICANTES DE
BIENES DE EQUIPO

IBERIA
Transportista Oficial



FIMA
Feria de
Madrid

HAY CARRETERAS DONDE NI SIQUIERA MODIFAL PODRIA EVITAR EL AQUA-PLANNING.



PERO HAY OTRAS MUCHAS DONDE SI PODRIA. DONDE REDUCIRIA EL NIVEL DE RUIDOS (HASTA 3 DECIBELIOS). DONDE DISMINUIRIA LA FORMACION DE RODERAS Y FISURAS, Y RETRASARIA EL ENVEJECIMIENTO DEL FIRME AUN EN LAS CONDICIONES CLIMATOLOGICAS MAS EXTREMAS. REPSOL PRESENTA MODIFAL, EL PRIMER BETUN MODIFICADO EN EL QUE LA DISPERSION DE LOS POLIMEROS EN EL SENO DE LOS BETUNES ES PERFECTA Y HOMOGENEA. ESTA HOMOGENEIDAD ES LA QUE PERMITE A MODIFAL CONSERVAR INTACTAS SUS PROPIEDADES AUN EN PERIODOS PROLONGADOS DE ALMACENAMIENTO. ALGUNAS VECES HAY QUE CAMBIAR ALGO PARA QUE TODO SIGA IGUAL. NOSOTROS HEMOS MODIFICADO NUESTROS BETUNES PARA SEGUIR SIENDO LIDERES EN ASFALTOS.



REPSOL PRODUCTOS ASFALTICOS, S. A.