

CAPITULO II

SUSTRATOS INERTES. CARACTERIZACIÓN FÍSICA. OXIGENACIÓN DE LOS SUSTRATOS

Santiago Bonachela Castaño, Rodrigo A. Acuña López y Juan J. Magán Cañadas

1. INTRODUCCIÓN

Los sustratos están siendo usados de forma creciente como medio de cultivo en los sistemas de cultivo más intensivos de muchas zonas del mundo, sobre todo en cultivos en invernadero bajo condiciones de producción cercanas al óptimo. Ello es debido, entre otras razones, a que los sustratos mejoran la absorción de agua y nutrientes, y la disponibilidad de oxígeno por el sistema radicular (Raviv y col., 2002). En los invernaderos del litoral de Almería, el uso generalizado de los sustratos como medio de cultivo comenzó a principios de los años 90, y en el año 2000 se estimó una superficie de 4.878 ha, lo que suponía un 19,8% de la superficie cultivada en invernadero (Pérez-Parra y col., 2002). La última encuesta, realizada en la campaña 2005/06 (Céspedes, comunicación personal, 2008), revela que la superficie de cultivos hortícolas en sustrato se ha mantenido prácticamente estable (20,4% de la superficie cultivada en invernadero), siendo la perlita (55% del total) y la lana de roca (38%) los sustratos mayoritariamente usados por los agricultores.

En los sustratos de lana de roca y perlita, considerados prácticamente inertes en cuanto a sus características químicas, el conocimiento de las propiedades físicas es básico para poder mejorar el manejo del suministro de agua y nutrientes a los cultivos, optimizando sus condiciones de crecimiento y minimizando los problemas de contaminación. Elevada disponibilidad de agua, adecuado suministro de aire, baja densidad aparente y alta estabilidad estructural son, normalmente, las principales características físicas requeridas a un buen sustrato.

2. CARACTERIZACIÓN FÍSICA

La caracterización física de los sustratos requiere, esencialmente, el estudio de la distribución de tamaños de sus partículas (granulometría), del espacio poroso y propiedades afines (densidades), y de las propiedades hidrofísicas (retención de agua, conductividad hidráulica, etc.). El tamaño, la forma y la distribución de tamaños de las partículas de cualquier medio de cultivo determinan el tamaño y la distribución de los poros inter-particulares. El espacio poroso (tamaño y distribución del diámetro de los poros) y las características superficiales de las partículas (rugosidad, afinidad o repulsión al agua) determinan la capacidad de retención de agua y su movimiento a través del sustrato.

Hay una amplia información técnica y científica sobre los principales parámetros usados para caracterizar físicamente un sustrato (de Boot y Verdonck, 1972; Raviv y col., 2002): Densidad aparente (DA) y densidad real (DR); porosidad total (PT); capacidad de aireación o porosidad llena de aire (CA); agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR) y agua difícilmente disponible (ADD); conductividad hidráulica del agua (K); etc. La densidad aparente de un sustrato se define como la materia seca por unidad de volumen (g cm^{-3}). La porosidad total (%) es la fracción volumétrica de sustrato ocupada por el aire y la solución acuosa, y está relacionada con la forma, tamaño y distribución de las partículas del sustrato, mientras la porosidad efectiva (%) es la fracción volumétrica ocupada por agua en un sustrato completamente saturado. La diferencia entre la porosidad total y la efectiva es el volumen de poros cerrados intra-particulares, no accesibles al agua. La capacidad de aireación o porosidad llena de aire (%) es la fracción volumétrica de sustrato llena de aire después de dejarlo drenar libremente. Como este valor varía mucho con la altura y forma del contenedor, se ha acordado determinarlo como la fracción volumétrica ocupada por aire cuando el sustrato está sometido a una presión de succión de agua de 1 kPa. El agua fácilmente disponible (%) es la diferencia en contenido volumétrico de agua del sustrato cuando está sometido a una succión de 1 y 5 kPa, respectivamente. La conductividad hidráulica (cm por unidad de tiempo) es una medida de la capacidad del sustrato de transportar agua y su determinación es relevante debido a que el transporte de agua a las raíces a través de los poros del sustrato depende en gran medida de este parámetro.

3. REUTILIZACIÓN DE SUSTRATOS

En el litoral mediterráneo español la reutilización de sustratos es una práctica común basada, sobre todo, en el conocimiento práctico de agricultores y técnicos de la zona, con el objetivo final de reducir los costes de producción. En un trabajo experimental realizado durante las campañas agrícolas 2003/04 y 2004/05 (Acuña, 2007) se caracterizó la evolución con el tiempo de uso de los principales parámetros físicos de los dos sustratos utilizados mayoritariamente en los invernaderos del litoral de Almería (Cuadro 1): Tablas de lana de roca tipo Med Horizontal Grodan y sacos de perlita tipo B12, Marjal. Las medidas se realizaron en tablas de lana de roca nuevas o de primer uso (0) y en tablas que habían sido reutilizadas durante 1 año (1), 2 años (2) y 3 años (3). En perlita, las medidas se realizaron en sacos nuevos de primer uso (0) y en sacos que habían sido reutilizados durante 1 año (1), 4 años (4) y 5 años (5). En los sacos de perlita reutilizados, al final de cada ciclo de cultivo, el agricultor extraía la planta vieja con la perlita situada alrededor de sus raíces (un cilindro de unos 10 cm de diámetro) y reponía el hueco con perlita nueva.

A pesar de que hubo cambios en algunos parámetros físicos relevantes de la lana de roca (Cuadro 1), sus principales características físicas se mantuvieron a lo largo de su vida útil (3 años) dentro del rango de valores considerados normales en la literatura (Raviv y col., 2002): Alta capacidad de retención de agua a bajas tensiones de agua (< 3 kPa), drástica reducción de la disponibilidad de agua a tensiones mayores y alta capacidad de aireación (entorno o por encima del 30%). Por lo que parece que el tiempo de uso no limitó el comportamiento físico de las tablas de lana en cultivos hortícolas en invernadero, por lo menos, bajo las condiciones de estudio de Acuña (2007). Lo que si se observó fue una reducción con tiempo de uso (medidas realizadas hasta los dos años) de la conductividad hidráulica saturada, reducción que puede explicar la mayor variabilidad de la humedad volumétrica medida dentro de las tablas de lana de roca reutilizadas, con respecto a las tablas nuevas (datos nos mostrados). También se observó que las tablas de lana de roca se deformaron claramente al final del tercer año de uso (Figura 1) y perdieron estabilidad estructural.

Con respecto a las características granulométricas de la perlita (datos no mostrados), los sacos nuevos o de primer uso presentaron valores parecidos a los de las perlitas denominadas tipo B12 (partículas con diámetros de 0 a 5 mm, Orozco, 1995), mientras que las perlitas reutilizadas presentaron características más parecidas a las de tipo A13 (\varnothing : 3-5 mm). Este cambio se debió a una reducción de la proporción de partículas más pequeñas durante el primer año de uso de la perlita nueva, atribuible, con gran probabilidad, al lavado, vía riego y drenaje, del polvo o partículas más pequeñas del saco. El resto de las características físicas de la perlita, incluidas las de retención de agua y de aireación, cambiaron poco con el tiempo de uso (Cuadro 1). Como resumen, las propiedades físicas de la perlita no mostraron grandes cambios con el tiempo de uso, presentando valores medios a lo largo de su vida útil (5 años) dentro del rango de valores normales citados en la literatura (Orozco, 1995).

4. OXIGENACIÓN DE SUSTRATOS

Las raíces de las plantas necesitan respirar para obtener energía para sus actividades metabólicas. La respiración de las raíces, en condiciones aerobias, requiere un suministro continuo de oxígeno, que la mayoría de las plantas obtienen, en condiciones normales, directamente de su entorno o rizosfera. El oxígeno atmosférico, en forma de gas, se mueve a través de los poros del medio de cultivo hasta la raíz. La velocidad a la que se mueve a través del sustrato por unidad de tiempo y sección se denomina tasa de difusión de oxígeno (ODR). Por diferencias de presión, el oxígeno gaseoso se difunde, sobre todo, a través de los poros llenos de aire (su difusión a través de los poros llenos de agua es mucho más lenta) hasta los poros cercanos a las raíces. Luego se disuelve en la película de agua que rodea cada raíz y por difusión se introduce en la misma.

En cultivos en sustratos, la ODR suele estar relacionada con la capacidad de aireación (CA) de los mismos y, en general, considerando la información experimental disponible, los sustratos con valores de CA mayores del 30% no deberían tener, teóricamente, valores de ODR limitantes. Los sustratos inertes mayoritariamente usados en la horticultura protegida del litoral de Almería, normalmente, cumplen esta característica (Cuadro 1). En la práctica, sin embargo,

la oxigenación de los sustratos es compleja ya que hay otros factores que pueden afectar tanto a la demanda como al suministro de oxígeno, y provocar condiciones de deficiencia de oxígeno o hipoxia. La mayoría de los cultivos hortícolas cultivados en sustrato y en invernadero suelen tener altas tasas de crecimiento asociadas a altas tasas de respiración y de demanda de agua. Esta situación requiere un abundante suministro de agua, lo que puede reducir la ODR, sobre todo, en los cultivos que forman una densa capa de raíces en el fondo del contenedor del sustrato, donde suele ocurrir condiciones cercanas a saturación. Las altas temperaturas que normalmente ocurren en los invernaderos pueden incrementar la tasa de respiración de las raíces y disminuir el contenido de oxígeno disuelto en la solución del sustrato. El intercambio gaseoso dentro del sustrato puede verse también reducido por el contenedor (normalmente, sacos de plástico) que rodea al sustrato. Además, los microorganismos aeróbicos compiten con las raíces por el oxígeno, especialmente cuando el sustrato contiene materia orgánica, lo que debe ser considerado en sustratos inertes reutilizados y en aguas de riego depuradas tratadas. Las raíces, al ocupar el espacio poroso, pueden también modificar las características físicas de los sustratos, aumentando la capacidad de almacenamiento de agua y disminuyendo la porosidad llena de aire. Por todo ello, es necesario conocer las condiciones de aireación de las raíces en los cultivos en invernadero en sustratos, sobre todo, en áreas con altas temperaturas ambientales como el litoral mediterráneo.

En la última década se han introducido en los invernaderos del litoral de Almería diferentes sistemas comerciales para enriquecer de oxígeno el medio de cultivo radicular. El sistema de enriquecimiento más común, en la actualidad, es la inyección de productos químicos con peróxido de hidrógeno que disueltos en la solución nutritiva liberan oxígeno. Estos productos se usan fundamentalmente por su función desinfectante de la solución del suelo o del sustrato, pero también tienen una función de oxigenación del medio. La oxifertirrigación es otro sistema, de menor implantación en los invernaderos comerciales de Almería, que consiste en aportar soluciones nutritivas sobresaturadas de oxígeno mediante la inyección y posterior difusión de oxígeno puro a alta presión en las tuberías de distribución de la solución nutritiva (Marfà y col., 2005). En diferentes trabajos experimentales,

realizados durante las campañas agrícolas 2003/04 y 2004/05, se midieron las condiciones de oxigenación de la solución del sustrato a lo largo de cinco ciclos de cultivo: 2 ciclos de pimiento y 2 de melón en sustratos de lana de roca y perlita (Acuña, 2007), y 1 ciclo de tomate en tablas de lana de roca (Quesada, 2008). En todos ellos se comparó un cultivo regado con una solución nutritiva enriquecida de oxígeno frente a un cultivo testigo regado con una solución nutritiva normal. En general, en la mayoría de los ciclos evaluados el contenido de oxígeno disuelto (OD) en la solución del sustrato estuvo por encima de 3 mg L^{-1} , valor por debajo del cual pueden darse, teóricamente, condiciones limitantes de oxígeno (Marfà y Guri, 1999). Como ejemplo, la figura 2 muestra la dinámica estacional del OD en la solución nutritiva aportada y en la solución del sustrato en un cultivo de tomate de otoño-primavera crecido en tablas de lana de roca y regado con solución nutritiva enriquecida de oxígeno, vía oxifertirrigación (Marfà y col., 2005), *versus* un cultivo testigo o control (Quesada, 2008). En ambos tratamientos se regó mayoritariamente con agua depurada tratada de la comunidad de regantes de Cuatro Vegas. Como se observa (Fig. 2), los valores medios de OD en la solución nutritiva aportada fueron claramente superiores durante prácticamente todo el ciclo de tomate en el cultivo con oxifertirrigación respecto al cultivo testigo. En cambio, los medios de OD en la solución sustrato fueron similares en los dos tratamientos de oxigenación (Fig. 2) y estuvieron, en general, por encima de los valores teóricamente limitantes. Solo hubo periodos cortos al final del ciclo, cuando coincidieron altas temperaturas ambientales con un cultivo totalmente desarrollado, con valores en torno o por debajo de 3 mg L^{-1} , sobre todo en el cultivo testigo. En este periodo si pudieron producirse episodios cortos de hipoxia, aunque si los hubo, no afectaron a los parámetros de productividad y calidad del tomate (Quesada, 2008).

Como resumen del estudio de oxigenación de la solución del sustrato, en los cultivos de pimiento y tomate no ocurrieron, en general, condiciones de hipoxia, mientras que en los dos cultivos de melón evaluados si pudieron ocurrir dichas condiciones, sobre todo durante la segunda mitad del ciclo de cultivo, cuando coincidieron altas temperaturas ambientales con un cultivo que había desarrollado la mayoría de su sistema radicular y de su cubierta vegetal. En estos periodos

concretos, enriquecer de oxígeno la solución nutritiva aportada, mediante el manejo de las balsas de riego (Bonachela y col., 2007) o mediante aportes artificiales de oxígeno (Acuña, 2007), puede mejorar las condiciones de crecimiento de los cultivos y, por ende, su productividad.

5. BIBLIOGRAFÍA

Acuña R, 2007. Oxigenación en cultivos hortícolas en sustratos de lana de roca y perlita en el litoral de Almería. Técnicas de mejora y efectos de los sustratos. Tesis doctoral. Universidad de Almería.

Bonachela S, Acuña R. y Casas J.J., 2007. Environmental factors and management practices controlling oxygen dynamics in agricultural irrigation ponds in a semiarid Mediterranean region: Implications for pond agricultural functions. *Water Research* 41: 1225-1234.

De Boodt M. y Verdonck O. 1972. The physical properties of the substrates in horticulture. *Acta Horticulturae* 26: 37-44.

Marfà O.; Cáceres R. y Guri, S. 2005. Oxyfertirrigation: A new technique for soilless culture under mediterranean conditions. *Acta Horticulturae* 697: 65-72.

Marfà, O. y Guri, S. 1999. Física de sustratos y oxigenación del sistema radicular. En: *Cultivos sin suelo II. Curso superior de especialización*. Ed. Junta de Andalucía, FIAPA y Caja Rural de Almería. Almería, España. 93-106.

Orozco R. 1995. Propiedades físicas e hidrológicas de las perlitas utilizadas para cultivos sin suelo. Su implicación con las relaciones sustrato-agua-planta y con el riego de los cultivos hortícolas. Universitat de Lleida.

Pérez J.; López J.C. y Fernández M.D., 2002. La agricultura del sureste: Situación actual y tendencias de las estructuras de producción en la horticultura almeriense. En: *La agricultura mediterránea en el siglo XXI*. Ed. I.E.S. CAJAMAR. Almería, España. 1-22.

Quesada J., 2008. Respuesta de un cultivo de tomate en sustrato de lana de roca a la oxigenación de la solución nutritiva. Proyecto Fin de Carrera. Universidad de Almería.

Raviv M.; Wallach R.; Silber A. y Bar-Tal A., 2002. Substrates and their analysis. En: *Hydroponics productions of vegetables and ornamentals*. Ed. D. Saavas y H. Passam. Embryo Pub. Athens, Greece. 25-102.

Cuadros y figuras

Cuadro 1. Evolución con el tiempo de uso de las principales propiedades físicas de las tablas de lana de roca y los sacos de perlita: Densidad aparente (DA), densidad real (DR), porosidad total (PT), capacidad de aireación (CA), agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR) y agua difícilmente disponible (ADD).

Tiempo de uso	DA g cm ⁻³	DR g cm ⁻³	PT %	CA %	AFD %	AR %	ADD %
Lana de roca							
0	0,07	2,56	97	38	59	1	0
1	0,08	2,57	97	50	43	1	2
2	0,06	2,47	98	47	47	2	2
3	0,11	2,44	96	30	60	2	7
Perlita							
0	0,14	2,65	95	45	11	9	30
1	0,12	2,65	96	47	10	7	32
4	0,12	2,59	96	45	10	6	35
5	0,12	2,65	96	55	8	7	26



Figura 1. Compactación de un sustrato de lana de roca reutilizado durante tres campañas agrícolas consecutivas.

A)

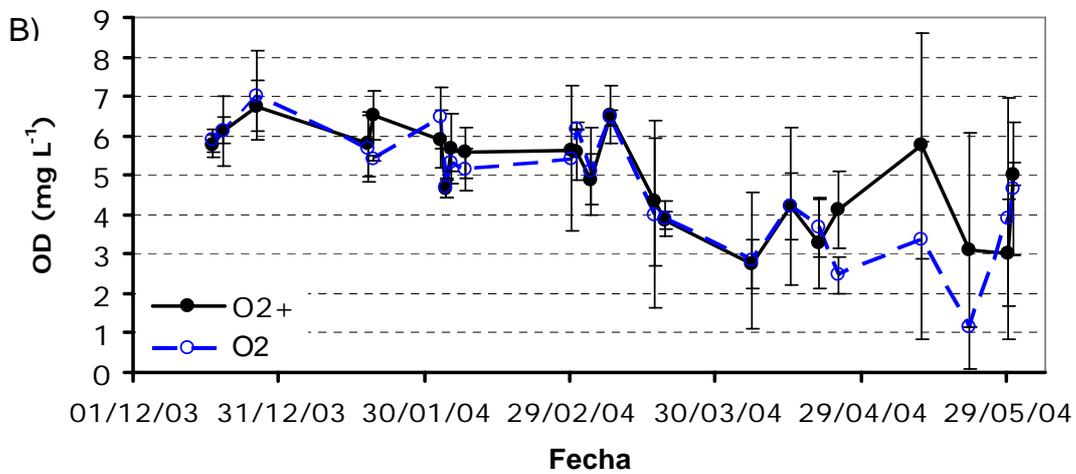
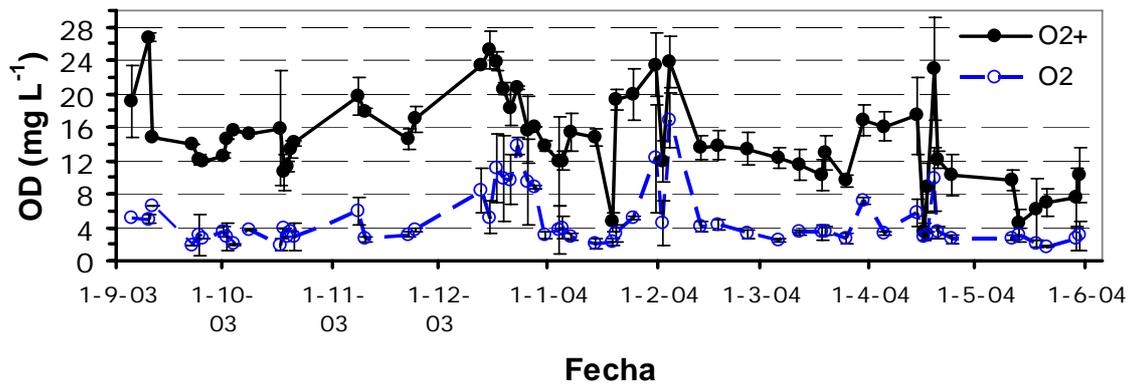


Figura 2. Contenido de oxígeno disuelto (OD) en la solución nutritiva aportada (A) y en la solución de sustrato (B) en un cultivo de tomate de otoño-primavera crecido en tablas de lana de roca y regado con agua depurada tratada. Cultivo regado con una solución nutritiva enriquecida de oxígeno (O2+) *versus* un cultivo regado con una solución nutritiva normal (O2). Almería.



Figura 3. Batería de muestras de lana de roca para la determinación de curvas de retención de agua.