

# Medida de las resistencias y las conductancias de la transpiración

**Autor:** Alvarez Martinez, Oscar (Licenciado en Biología, Cap d'Estudis Ins Sant Pere i Sant Pau (Tarragona)).

**Público:** Docentes y alumnos de Biología, Biotecnología y Bioquímica. **Materia:** Fisiología Vegetal. **Idioma:** Español.

**Título:** Medida de las resistencias y las conductancias de la transpiración.

## Resumen

En el siguiente trabajo se muestra la relación entre las velocidades de transpiración en las plantas y las resistencias, debido al estudio de tres tipos de resistencias (del aire exterior, de la cutícula y del estoma) y las conductancias en la planta *Hedera helix*. El estudio de estos tres tipos de resistencias son importantes para determinar la mayor o menor pérdida de vapor de agua por la planta debido a la transpiración, aunque también se indica que los valores obtenidos en este experimento pueden variar según diversos factores como la temperatura, la humedad, la especie biológica de estudio, etc.

**Palabras clave:** Recta de regresión, ajuste lineal, método de pesada, transpiración, resistencias, cutícula, estoma, método de serie de tiempo, ley de difusión de Fick, el método de HR y conductancias.

**Title:** Measurement of resistance and perspiration conductances.

## Abstract

In this paper the relationship between transpiration rates in plants and resistance due to study three types of resistance (outdoor air, cuticle and stoma) and conductances in *Hedera helix* plant is shown. The study of these three types of resistance are important in determining the degree of loss of water vapor by the plant due to perspiration, but also indicates the values obtained in this experiment can vary depending on several factors such as temperature, humidity, study the biological species, etc.

**Keywords:** Regression, linear fit, weighing method, perspiration, resistors, cuticle, stoma, time series method, Fick law of diffusion, the method of HR and conductances.

Recibido 2016-05-30; Aceptado 2016-06-01; Publicado 2016-06-25; Código PD: 072065

## 1. OBJETIVO

Medir tres tipos de resistencias (aire exterior, próximo a la superficie de la hoja, cutícula y estoma), y las conductancias en la planta *Hedera Helix*.

## 2. INTRODUCCIÓN

Nuestro objetivo es calcular las resistencias y conductividad de una hoja de *Hedera helix*. Realizamos las medidas para una misma especie (*Hedera helix*), y en unas mismas condiciones experimentales (26°C de temperatura y 66% de humedad relativa), ya que los valores de estos parámetros se mantienen prácticamente constantes en el laboratorio durante el experimento.

Las resistencias dependen de la velocidad de transpiración, (se explicará mediante fórmulas en el apartado de resultados). Las resistencias y la conductividad varían según las especies porque diferentes especies en unas mismas condiciones experimentales tienen diferentes velocidades de transpiración debido a que existen diferencias estructurales y anatómicas; por ejemplo: el grosor de la capa de cutícula puede variar según las especies, y sabemos que cuando este grosor es mayor, menor es la velocidad de transpiración, por tener mayor impedimento (resistencia) el agua en transferirse a la atmósfera; pueden existir diferencias en el grosor o en la cantidad de parénquima lagunar, en estructura de estomas...

También sabemos que existen diferentes tipos de metabolismo por adaptación a diferentes condiciones climáticas; por ejemplo el metabolismo CAM de las "crasuláceas": las plantas abren los estomas cuando a disminuido la temperatura, generalmente cuando es de noche es cuando realizan el intercambio gaseoso introduciendo CO<sub>2</sub> y eliminando a la atmósfera O<sub>2</sub> y vapor de agua, de modo que en estas condiciones disminuyen la pérdida de agua en forma de vapor ya que la temperatura es menor. Por lo tanto entendemos que hay una relación directa entre la temperatura y la

evapotranspiración, es decir que generalmente a mayor temperatura se produce una mayor evapotranspiración; digo generalmente porque la transpiración también dependerá de las condiciones de la planta en ese momento, porque por ejemplo si la planta está en estrés hídrico, poca transpiración se producirá ya que la mayoría de estomas estarán cerrados.

La concentración de vapor de agua en la atmósfera depende de la temperatura en la que realizamos el experimento y de la humedad relativa, a mayor temperatura hay mayor concentración de vapor de agua ya que el aumento de temperatura produce una mayor evaporación; cuando la humedad relativa es muy grande, la concentración de vapor de agua en la atmósfera también tiene un valor alto. Esta concentración de vapor de agua en la atmósfera será utilizada para calcular el incremento de concentración de vapor de agua entre el interior de la hoja y el exterior (la atmósfera), cálculo esencial para saber el valor de la resistencia que explicaré en el apartado de resultados. Al mantenernos durante toda la duración del experimento con una temperatura y humedad relativa constante, la concentración de vapor de agua en la atmósfera mantiene un valor fijo. Lo que varía son las velocidades de transpiración, y por lo tanto existen diferencias entre las resistencias.

Si tuviéramos un ligero flujo de aire que estuviera incidiendo sobre la hoja tendríamos valores de velocidad de transpiración más altos que si no estuviera el factor viento, ésta sería una condición experimental más que se podría tener en cuenta. Por lo tanto la resistencia del aire externo depende de las situaciones ambientales, pero nosotros no introducimos variación en las condiciones experimentales, como dije anteriormente.

### 2.1. Resumen de lo realizado

Cortamos, por el peciolo, una hoja de hiedra de tamaño mediano, sin que la planta estuviera en estrés hídrico, sin patógenos aparentes, ni malformaciones externas, y previamente iluminada con luz de un flexo durante un periodo de tiempo relativamente corto.

Realizamos las medidas de pérdida de peso en la hoja, debido a la evapotranspiración, cada periodo de tiempo determinado. Realizamos dos series de tiempo en esta misma hoja; la primera serie a intervalos de tiempo más cortos que en la segunda debido a que en esta primera serie, los estomas permanecen abiertos y por lo tanto la pérdida de peso es mayor que en la segunda. Realizamos otra serie de tiempo, pero esta vez con papel de filtro totalmente empapado de agua, ya que conocemos que las hojas están saturadas de vapor de agua en su interior y queremos representar los datos obtenidos como si la pérdida de peso fuera de la propia hoja de hiedra. También la superficie debe de ser lo más parecida a la de la hoja estudiada ya que los datos obtenidos serán utilizados para el cálculo de una de las resistencias que tiene la hoja.

El cálculo de pérdida de peso debido a evapotranspiración o evaporación de las tres series de tiempo se realizará a una temperatura y una humedad relativa constante y dada. Calculamos la recta de regresión mediante el ajuste lineal. Utilizando la pendiente de cada recta en concreto (realizamos tres) y la superficie de la hoja calculada mediante el método de pesada, calculamos la velocidad de transpiración de cada serie de tiempo. Teniendo las velocidades de transpiración calcularemos las resistencias: de la capa inmóvil del aire exterior, de la cutícula y del estoma, utilizando el incremento de concentración de vapor de agua entre el interior de la hoja y el exterior (la atmósfera). Para el cálculo de estas resistencias hay que tener en cuenta un modelo clave que son las relaciones entre ellas en cuanto a disposición según las leyes físicas: las resistencias de la cutícula y estomas son en paralelo según su comportamiento, y éstas dos respecto a la del aire externo son en serie.

Una vez obtengamos las resistencias, calculamos las conductancias, siendo ésta la inversa de la resistencia.

### 3. MATERIAL

- Especie vegetal empleada: *Hedera helix*. Cogemos una hoja mediana o más bien grande para una mejor obtención de resultados y por lo tanto mayor facilidad para llegar a coherentes conclusiones. La planta está crecida en tierra convencional en una maceta y con cuidados mínimos en el laboratorio, como puede ser simplemente vigilar el riego, pudiendo soportar muchas condiciones desfavorables.
- Papel de filtro (tamaño DIN A4).
- Tijeras.
- Balanza de precisión.

- Calculadora científica.
- Termómetro e higrómetro.
- Papel y lápiz

#### 4. MÉTODOS UTILIZADOS

Para calcular la superficie de la hoja utilizamos el método de pesada: recortamos un cuadrado de papel de filtro de área conocida, lo pesamos, y así podremos saber que superficie tiene nuestra hoja porque sabemos el peso de ésta pesándola, y mediante una regla de tres calcularemos la superficie.

Para calcular la recta de regresión utilizaremos la calculadora ya que si lo hacemos “a mano” introducimos mucho error porque la realización de la recta es muy arbitraria y se ajustaría poco a la realidad.

Para calcular la velocidad de transpiración nos basamos en la ley de difusión de Fick:  $T = \Delta c (g/m^3)/R (seg \cdot m^{-1})$ , o lo que es lo mismo:  $T = \text{pendiente} (g \cdot \text{seg}^{-1})/\text{superficie}(m^2)$ ; la pendiente nos la da la recta de regresión, es la “b”; y la superficie nos la calculamos por el método de pesada. Es fundamental utilizar el método de serie de tiempo para medir la transpiración.

Para medir la diferencia de concentración de vapor de agua utilizaremos el método de HR (concentración relativa).

Realizaremos una tabla de datos con valores normalizados para comparar más fácilmente los valores de las resistencias y llegar a conclusiones. Consiste en dar el valor uno al más pequeño y se dividen los otros dos valores de resistencia por este valor más pequeño.

#### 5. RESULTADOS

1) Mediante el método de pesada calculamos la superficie que tiene nuestra hoja de hiedra:

⇒ Cuadrado de papel de filtro:

- ◆ Longitud de un lado = 5'8cm.
- ◆ Área del cuadrado =  $(5'8\text{cm})^2 = 33'64\text{cm}^2 = 33'64 \cdot 10^{-4} \text{m}^2$ .
- ◆ Peso del cuadrado = 0'1918g.

⇒ Peso de la hoja de papel (forma como la hiedra) = 0'2124g.

$$\frac{0'1918g}{33'64\text{cm}^2} \equiv \frac{0'2124g}{x}; x = 37'25\text{cm}^2$$

2) Cálculo de la diferencia de concentración de vapor de agua:

$$\Delta c = C_s - hr \cdot C_s = (1 - hr) \cdot C_s$$

$C_s$  = concentración de agua a saturación.

$hr \cdot C_s$  = concentración de agua en la atmósfera.

Con humedad relativa (HR) de 66%, medido por el higrómetro, y 24'38g de vapor de agua/ $m^2$ , debido a que tenemos una temperatura de 26°C y la concentración de vapor de agua a saturación depende de la temperatura, entonces teniendo esto en cuenta miramos en unas tablas de valores fijos y determinados y obtenemos este valor de vapor de agua.

Concentración de vapor de agua a saturación  $\equiv C_s = 24'39\text{g}/\text{m}^3$ .

HR (en tanto por uno) = 0'66.

$$\Delta c = (1-0'66) * 24'38\text{g}/\text{m}^3 = 8'29\text{g}/\text{m}^3.$$

3) La velocidad de transpiración  $\equiv T$ , se calcula de la siguiente forma:

$$T = g/(\text{s} * \text{m}^2) \equiv \text{pendiente } (g * \text{s}^{-1}) / \text{superficie} (\text{m}^2).$$

La pendiente la calculamos anteriormente en la recta de regresión y la superficie también está calculada mediante el método de pesada.

4) Series de tiempo:

→Primera serie de tiempo: Medición de la pérdida de peso en la hoja, debido a transpiración, por unidad de tiempo. Éstas medidas corresponden a la pérdida de peso en la hoja recién cortada.

| Tiempo (seg) | Peso (g) |
|--------------|----------|
| 0            | 0'4814   |
| 15           | 0'4812   |
| 30           | 0'4807   |
| 45           | 0'4806   |
| 60           | 0'4804   |
| 75           | 0'4803   |
| 90           | 0'4799   |
| 105          | 0'4798   |
| 120          | 0'4796   |
| 135          | 0'4795   |
| 150          | 0'4793   |
| 165          | 0'4791   |

► Obtención de la recta de regresión

$$y = 0'4812 \text{ gramos} - 1'35 * 10^{-5} \text{ gramos/segundos.}$$

Coefficiente de correlación  $\equiv r = 0'99$ ; es decir, la proporción de la varianza de los datos que están en el modelo  $\equiv r^2 = 0'98$ . Al ser un valor alto se acepta la recta y por lo tanto los datos obtenidos en esta serie de tiempo.

Pendiente de la serie  $= 1'35 * 10^{-5}$  gramos/segundos.

$T_1 \equiv$  velocidad de transpiración de la serie 1:

$$T_1 = \frac{1'35 * 10^{-5} \text{ g / seg}}{33'64 * 10^{-4} \text{ m}^2}$$

→Segunda serie de tiempo: Medición de la pérdida de peso en la hoja, por unidad de tiempo, cuando los estomas (la mayoría de ellos) están cerrados, es decir al transcurrir 30 minutos. Éstas medidas corresponden a la pérdida de peso en la misma hoja de la serie anterior.

| Tiempo (seg) | Peso (g) |
|--------------|----------|
| 0            | 0´4713   |
| 45           | 0´4713   |
| 90           | 0´4709   |
| —            | —        |
| —            | —        |
| 225          | 0´4709   |
| 270          | 0´4709   |
| 315          | 0´4709   |
| 360          | 0´4707   |
| 405          | 0´4706   |
| 450          | 0´4705   |
| 495          | 0´4704   |

◆ Los guiones que aparecen en la tabla son debido a que hubo algún tipo de interferencia porque aumentó el peso, por lo tanto se eliminan y no se utilizan para el cálculo de la recta de regresión.

► Obtención de la recta de regresión

$y = 0´4712 \text{ gramos} - 1´6 * 10^{-6} \text{ gramos/segundos}$ .

Coefficiente de correlación  $\equiv r = 0´94$ ; es decir, la proporción de la varianza de los datos que están en el modelo  $\equiv r^2 = 0´88$ . Aunque la proporción no es excesivamente grande se pueden aceptar los datos y la recta de regresión obtenida.

Pendiente de la serie  $2 = 1´6 * 10^{-6} \text{ gramos/segundos}$ .

$T_2 \equiv$  velocidad de transpiración de la serie 2:

$$T_2 = \frac{16 * 10^{-6} \text{ g / seg}}{3364 * 10^{-4} \text{ m}^2}$$

→Tercera serie de tiempo: Medición de la pérdida de peso en la hoja de papel de filtro, debido a evaporación, por unidad de tiempo.

| Tiempo (seg) | Peso (g) |
|--------------|----------|
| 0            | 0'7475   |
| 5            | 0'7466   |
| 10           | 0'7463   |
| 15           | 0'7459   |
| 20           | 0'7454   |
| 25           | 0'7451   |
| 30           | 0'7446   |
| 35           | 0'7444   |
| 40           | 0'7439   |
| 45           | 0'7435   |
| 50           | 0'7432   |
| 55           | 0'7426   |

► Obtención de la recta de regresión

$y = 0'75 \text{ gramos} - 8'9 * 10^{-5} \text{ gramos/segundos}$ .

Coefficiente de correlación  $\equiv r = 0'99$ ; es decir, la proporción de la varianza de los datos que están en el modelo  $\equiv r^2 = 0'98$ . De modo que se acepta la recta y por lo tanto los datos obtenidos en esta serie de tiempo.

Pendiente de la serie3=

$8'9 * 10^{-5} \text{ gramos/segundos}$ .

$T_3 \equiv$  velocidad de transpiración de la serie3:

$$T_3 = \frac{89 * 10^{-5} \text{ g / seg}}{3364 * 10^{-4} \text{ m}^2}$$

5) Cálculos de las resistencias que afectan en la transpiración:

$R_{\text{aire inmóvil}} = (C_{\text{agua a saturación}} - C_{\text{agua en la atmósfera}}) / T_{\text{papel de filtro}}$

$R_{\text{aire inmóvil}} = \Delta c / T_3$

$\Rightarrow R_{\text{aire inmóvil}} = 313'34 \text{ segundos*metros}^{-1}$

$\Rightarrow \text{Conductancia}_{\text{aire}} = 32'01 * 10^{-4} \text{ m/s}$

$$R_{\text{aire(inmóvil)}} = \left[ \frac{(829 \text{ g / m}^3)}{(89 * 10^{-5} \text{ g / s}) \frac{1}{3364 * 10^{-4} \text{ m}^2}} \right] = 31334 \text{ s / m}$$

☞ Cuando los estomas están cerrados:

$$R_{\text{total}} = R_{\text{cuticular}} + R_{\text{aire}}$$

$$R_{\text{cuticular}} = R_{\text{total}} - R_{\text{aire}}$$

$$R_{\text{cuticular}} = \left[ \frac{(8'29 \text{ g} / \text{m}^3)}{(1'6 * 10^{-6} \text{ g} / \text{s}) \frac{1}{33'64 * 10^{-4} \text{ m}^2}} \right] - R_{\text{aire}} =$$

$$17429'73 \text{ s} * \text{m}^{-1} - 313,34 \text{ seg} * \text{m}^{-1} = 17116,39 \text{ s} / \text{m}$$

$$\Rightarrow R_{\text{cuticular}} = 17116'39 \text{ segundos} * \text{metros}^{-1}$$

$$\Rightarrow \text{Conductancia}_{\text{cuticular}} = 0'58 * 10^{-4} \text{ m/s}$$

☞ Cuando acabamos de cortar la hoja, es decir, cuando los estomas todavía no están cerrados:

$$R_{\text{estomaycutícula}} = \left[ \frac{(8'29 \text{ g} / \text{m}^3)}{(1'35 * 10^{-5} \text{ g} / \text{s}) \frac{1}{33'64 * 10^{-4} \text{ m}^2}} \right] - R_{\text{aire}} =$$

$$2065'75 \text{ s} * \text{m}^{-1} - 313,34 \text{ s} * \text{m}^{-1} = 1752'41 \text{ s} / \text{m}$$

$$R_{\text{total}} = R_{\text{aire}} + R_{\text{estoma y cutícula}}$$

$$R_{\text{estoma y cutícula}} = R_{\text{total}} - R_{\text{aire}}$$

$$R_{\text{estoma y cutícula}} = (\Delta c / T_1) - R_{\text{aire}}$$

$$\frac{1}{R_{\text{estoma}}} = \frac{1}{R_{\text{estomaycutícula}}} - \frac{1}{R_{\text{cutícula}}} \quad \frac{1}{R_{\text{estoma}}} = \frac{1}{1752'41 \text{ s} / \text{m}} - \frac{1}{17116'39 \text{ s} / \text{m}}$$

$$R_{\text{estoma}} = \frac{1}{512'22 * 10^{-6}}$$

$$\Rightarrow R_{\text{estoma}} = 1952'3 \text{ segundos} * \text{metros}^{-1}$$

$$\Rightarrow \text{Conductancia}_{\text{estoma}} = 5'12 * 10^{-4} \text{ m/s}$$

6) Tabla de valores normalizados de resistencias:

|         | R <sub>estoma</sub> (s/m) | R <sub>aire</sub> (s/m) | R <sub>cuticular</sub> (s/m) |
|---------|---------------------------|-------------------------|------------------------------|
| Grupo 1 | 6'23                      | 1                       | 54'62                        |
| Grupo 2 | 42'75                     | 1                       | 49'35                        |
| Grupo 3 | 17'49                     | 1                       | 42'55                        |

6.1) Tabla de las conductancias del grupo 1

| Conductancia <sub>aire</sub> (m/s) | Conductancia <sub>estoma</sub> (m/s) | Conductancia <sub>cuticular</sub> (m/s) |
|------------------------------------|--------------------------------------|---|
| 32'01*10 <sup>-4</sup>             | 5'12*10 <sup>-4</sup>                | 0'58*10 <sup>-4</sup>                   |

## 6. CONCLUSIONES

Comparando las resistencias entre sí, se puede observar que la resistencia del aire externo (inmóvil) tiene el valor más pequeño. Por contraposición se ve que la resistencia de la cutícula es la que tiene el valor más alto de las tres, valor casi nueve veces mayor que la resistencia del estoma, ya que si normalizamos estos dos valores se obtiene un valor de 8'76s/m de diferencia. A la misma conclusión se puede llegar comparando las conductancias, siendo ésta la inversa de la resistencia, como dije anteriormente; así que la mayor conductancia, es decir, la que opone menor resistencia a la transpiración es la del aire externo, mientras que la menor conductancia (la que opone mayor resistencia a la transpiración) es la de la cutícula; todo esto para nuestras condiciones determinadas.

Si nos fijamos en los valores obtenidos en los otros dos grupos (2 y 3) también llegamos a la misma conclusión: que la resistencia del aire es la menor, mientras que la resistencia de la cutícula es la mayor; y cuyos valores no son muy distintos de los de mi grupo. Sin embargo, al comparar las distintas resistencias del estoma en los tres grupos, se concluye que el tipo de resistencia del estoma es variable, dependiendo del grado de apertura de éstos. Por lo tanto la planta controla la transpiración mediante la mayor o menor apertura de este. En el caso del grupo 1, el estoma estaba prácticamente abierto por el valor que obtengo de resistencia.

Estos tres tipos de resistencias son importantes para determinar la mayor o menor pérdida de vapor de agua por la planta debido a la transpiración. La resistencia del estoma puede variar según las condiciones en las que se encuentra la planta y según el tipo de especie, al igual que la resistencia de la cutícula también puede variar según el tipo de especie.

## 7. VALORACIÓN: CONCEPTOS APRENDIDOS Y SUGERENCIAS

- La importancia de las series de tiempo para estudiar los procesos fisiológicos.
  - Cálculo de resistencias y la importancia que éstas tienen por su influencia en la pérdida de vapor de agua por la planta.
  - La relación entre conductividad y resistencia.
  - La importancia de la resistencia de la cutícula, cuyo valor es mayor que el de la resistencia del estoma, para evitar pérdidas de agua.
  - La resistencia del aire externo (próximo a la superficie de la hoja) suele ser menor.
  - La resistencia del estoma varía según el grado de apertura de éste.
- Elegir una hoja grande para observar mejor la variación de peso.
- Disponer de más material y de mejores condiciones (limpieza, comodidad, actualización...) para llevar a cabo las prácticas en el menor tiempo posible obteniendo unos resultados coherentes y lógicos.



- Enseñar al alumno a aprender conceptos de la práctica, más bien que a la realización de ésta sin saber para qué se hacen las cosas.
- Proponer la realización de algún protocolo en las diferentes disciplinas para facilitar la obtención de conclusiones y comprensión de las mismas.



### Bibliografía

- AZCÓN-BIETO J., TALÓN M., (2008). *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. Interamericana McGraw-Hill.
- BARRAGAN FERNÁNDEZ, J. RECASENS GUINJUÁN, I. (1983). "Ecuaciones que rigen el movimiento del agua a través de las plantas". *Quaderns d'enginyeria* 4. Lleida. 53-67.
- BUCHANAN, GRUISEN, JONES (2000). *Biochemistry & Molecular Biology of Plants*. American Society of Plant Biologists
- GIL MARTINEZ F., (1995). *Elementos de Fisiología Vegetal*. Mundi-Prensa.
- SALISBURY F.B., ROSS C.W., (1994). *Fisiología Vegetal*. Grupo Ed. Iberoamericana.
- SOLÁVORA, J., POSPÍSILOVÁ J., (1986). "Acclimation of primary bean leaves to different irradiances." *Epidermal conductances and their sensitivity to water stress*. *Photosynthetica*, 20 (1): 35-42.
- TAIZ L. y ZEIGER E., (2006). *Plant Physiology, 4<sup>th</sup> edition*. Sinauer Associates, Inc., Publishers.