

# Medidor Digital de Volumen de Gases para Biorreactores

## *Gas Volumen Digital Meter for Bioreactors*

### Investigación

Félix Fernando de-Hoyos-Vazquez<sup>1</sup>, María del Carmen Carreño-de-León<sup>1</sup>, María del Consuelo Hernández-Berriel<sup>1</sup>, Arturo Colin-Cruz<sup>2</sup>, Edgar Serrano-Núñez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico de Toluca, Av. Tecnológico s/n. Colonia Agrícola Bellavista, Metepec, Edo. De México, México C.P. 52149, Tel. (52) (722) 2 08 72 00,

<sup>2</sup> Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Química, Unidad Colón, Paseo Colón esq. Paseo Tollocán Residencial Colón y Col. Ciprés, 50120 Toluca de Lerdo, Estado de México, México. (52)(722) 217 3890  
felixdehoyos@hotmail.com

### Resumen

Los reactores biológicos o biorreactores, sin duda son uno de los equipos fundamentales de la microbiología industrial, ya que son los recipientes donde se realizan los cultivos de los microorganismos. Durante el crecimiento de los microorganismos, se generan gases como resultado de la degradación de materia orgánica. La medición del volumen de dichos gases es de gran importancia para controlar y/o monitorear los procesos de biodegradación. Para dar más certidumbre a las mediciones, se desarrolló un medidor utilizando un sistema de desplazamiento de líquido (sin goteo) con la integración de sensores de presión de gas, temperatura y nivel de líquido por ultrasonido; la adquisición y procesamiento de datos se realiza mediante un sistema embebido Arduino UNO. El objetivo principal es la medición del volumen con mayor precisión y exactitud que los métodos tradicionales. Los resultados de la experimentación fueron satisfactorios con una confiabilidad del 96% en comparación con los métodos tradicionales donde la confiabilidad es del 50% al 85%.

**Palabras clave:** Actividad metanogénica, degradación, desplazamiento por líquido, desplazamiento por goteo.

### Abstract

The volume measurement of gases is very important for biological reactors, for determine affectation degrees, greenhouse inventories, production or reduction of methanogenic activity, among many other applications. To give more certainty to measurements that are currently applied, a meter was developed using a liquid displacement system (no drip) plus the integration of gas pressure and temperature sensors, data processing with the Arduino UNO embedded system. The principal objective is the volume measurement with more precision and accuracy

than the traditional methods. The experimentation results were satisfactory with a reliability of 96% in comparison with experimentation and traditional methods where the reliability is from 50% to 85%.

**Keywords:** Methanogenic activity, degradation, displacement by liquid, displacement by dropping.

### Introducción

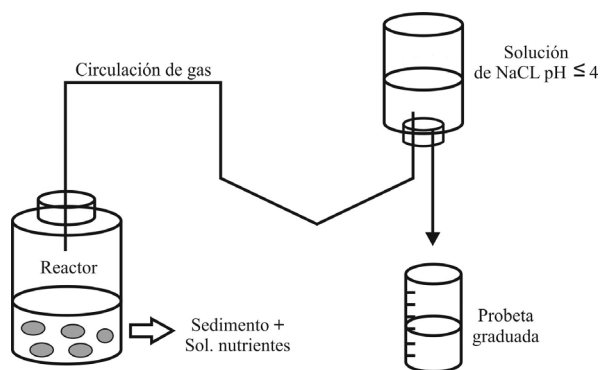
Uno de los factores más importantes para trabajar con reactores biológicos, es la medición del volumen de gases generados por la degradación de la materia orgánica, y se pueden realizar varios estudios como: inventarios de gases de efecto invernadero, estudios de Actividad Metanogénica Específica (AME), estudios de impacto ambiental, generación de metano en el proceso de tratamiento de aguas residuales urbanas, entre otros [1], [2], [3],[4], [5].

Las metodologías utilizadas actualmente tienen sus ventajas y desventajas, por ejemplo, la medición de volumen por desplazamiento de líquido por goteo es muy sensible a las vibraciones y provoca incertidumbre en los resultados; en las metodologías que no son por goteo se requiere más presión que la generada en el reactor para desplazar el líquido, dando lecturas de volumen erróneas [6].

Para mejorar la confiabilidad de las mediciones de volumen, se desarrolló un medidor utilizando un sistema de desplazamiento de líquido (sin goteo) más la integración de válvulas antirretorno y de retorno, sensores de presión de gas, temperatura y nivel de líquido por ultrasonido. El procesamiento de datos seleccionado (para calcular el volumen de gas) es el sistema embebido Arduino UNO [7].

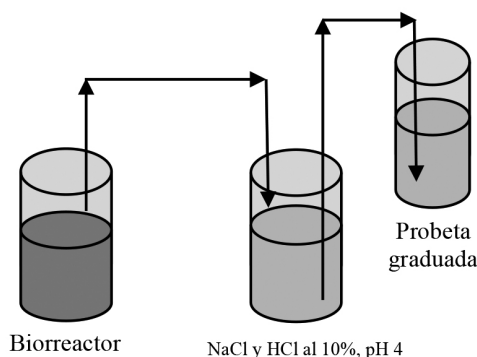
### Fundamentos teóricos

Actualmente el método volumétrico se basa en el desplazamiento de líquido, para lo cual se utilizan recipientes de 0.5 litros o mayores y un sistema de desplazamiento de líquido (Figura 1). El gas producido se burbujea en una solución alcalina (generalmente de NaOH o KOH) con pH mayor que 12, en la cual el CO<sub>2</sub> es adsorbido y el volumen de gas metano desplazará un volumen igual de la solución alcalina. El volumen de líquido desplazado fuera de la botella de solución será equivalente al volumen de biogás generado por el sistema. En el caso que se requiera medir las concentraciones de CO<sub>2</sub> se debe utilizar una solución saturada de NaCl y ajustar el pH a 4 con una solución de HCl al 10% para evitar que el CO<sub>2</sub> se disuelva en el agua [1] y [2].



**Figura 1.** Medición de volumen de gas por desplazamiento y goteo

La desventaja de la medición por desplazamiento y goteo es el ruido por vibración y cambios de temperatura ambientales. Para evitar estos inconvenientes hay otro método más estable, como el mostrado en la Figura 2, pero tiene deficiencias por efectos de la gravedad, ya sea que el líquido sea retornado al recipiente del líquido de desplazamiento o a la probeta de medición, provocando errores en las mediciones [6].



**Figura 2.** Sistema de desplazamiento convencional

Para la medición del volumen del líquido desplazado en la probeta (Figura 3), se calcula el volumen del aire del recipiente (cilíndrico), para restárselo al volumen total del mismo, obteniendo el volumen del líquido. Se utiliza ultrasonido para medir el nivel, por medio de la fórmula de la velocidad del sonido y el tiempo del rebote, como se muestra en la ecuación 1 [8].

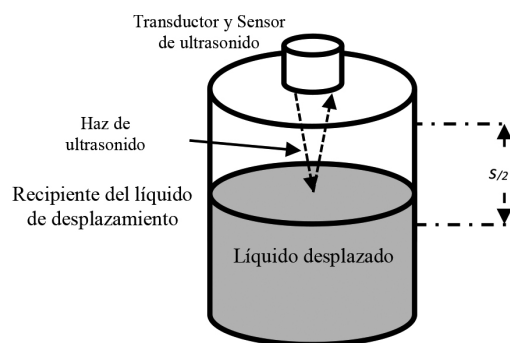
$$v = \frac{s}{t} \rightarrow s = v * t \quad (1)$$

Donde:

$v$  = velocidad del sonido (343 m/s)

$s$  = distancia (m)

$t$  = tiempo (s)



**Figura 3** Principio de medición de distancia con ultrasonido

Con la distancia  $s_{real}$  y con el área del recipiente se calcula el volumen del aire que hay entre el sensor y la superficie del líquido utilizando la ecuación 2 [8].

$$volumen_{aire} = área_{recipiente} * \frac{s}{2} \quad (2)$$

El cálculo del volumen dentro del recipiente es mediante la Ley general de los gases [9], considerando la presión, temperatura y volumen inicial, se calcula el volumen final mediante la ecuación 3 y 4 y si hay desplazamiento de líquido se tiene que reemplazar  $V_1$  por  $V_{1+}$  [9] y [10]:

$$V_2 = V_1 * \left( \frac{P_{atm+1}}{P_{1+1}} * \frac{T_2}{T_1} \right) \quad (3)$$

Donde:

$V_2$  = Volumen final de mezclas de gases en el recipiente (mL)

$V_1$  = Volumen inicial de mezclas de gases en el recipiente (mL)

$P_{atm}$  = Presión atmosférica inicial (atm)

$P_f$  = Presión final en el sistema (atm)

$T_2$  = Temperatura final en Kelvin

$T_1$  = Temperatura final en Kelvin

$$V_{1+} = V_1 + V_{desplazado} \quad (4)$$

Donde:

$V_{1+}$  = Volumen inicial más el volumen desplazado (mL)

$V_1$  = Volumen inicial de mezclas de gases en el recipiente (mL)

$V_{desplazado}$  = Volumen desplazado (mL)

### Materiales y métodos

Los materiales utilizados para el desarrollo del medidor son los siguientes:

Bolsa captadora de gas (Bolsa Kendal), filtro de humedad de 400 nm, recipiente de desplazamiento de 1000 mL con 750 mL de agua desionizada con NaCl a pH 4, válvula antirretorno, válvula de retorno, recipiente graduado de 1000 mL, sensor de presión, sensor de temperatura, sensor de nivel por ultrasonido, sistema embebido Arduino UNO, pantalla de LCD de 4x4 y mangueras de interconexión de 1/8".

El método usado se modificó del convencional (Figura 4), la entrada de gases (a) se puede conectar directamente a un reactor biológico o por medio de bolsas Kendal, antes de la medición, se debe iniciar el proceso para determinar el volumen, presión y temperatura iniciales (g). De la mezcla de gases, es retenida la humedad por medio del filtro de 200  $\mu$ m (b), los gases se van acumulando en el recipiente captador (c), va aumentando la presión y hasta desplazar el líquido al recipiente graduado de medición de volumen (e), pasando por la válvula antirretorno (d) para evitar que el líquido regrese por efecto de la gravedad. El volumen desplazado se puede introducir al procesador mediante el cálculo con medidor de nivel ultrasónico (f) o manualmente, leído del recipiente graduado(e), por medio del puerto serial y la consola del Arduino. En todo momento es calculado el volumen conforme se va introduciendo por medio de los cálculos del programa de Arduino y mostrados en la pantalla LCD (h), basándose en las ecuaciones 1, 2, 3, 4 y 5.

En el modo de operación con el reactor biológico directo, el cálculo debe ser directo y utilizando el medidor de nivel ultrasónico y el proceso puede durar de 3 a 4 semanas según el proceso de degradación de la materia orgánica del reactor.

En el modo de operación con bolsas Kendal, los reactores son conectados a las bolsas, que se van llenando de mezclas de gases durante semanas, dependiendo de la degradación de materia orgánica y de los experimentos en sí, para hacer la medición. Una vez que se requiera medir el volumen, hay que presionar la bolsa en la entrada del sistema (a) hasta quedar vacía.

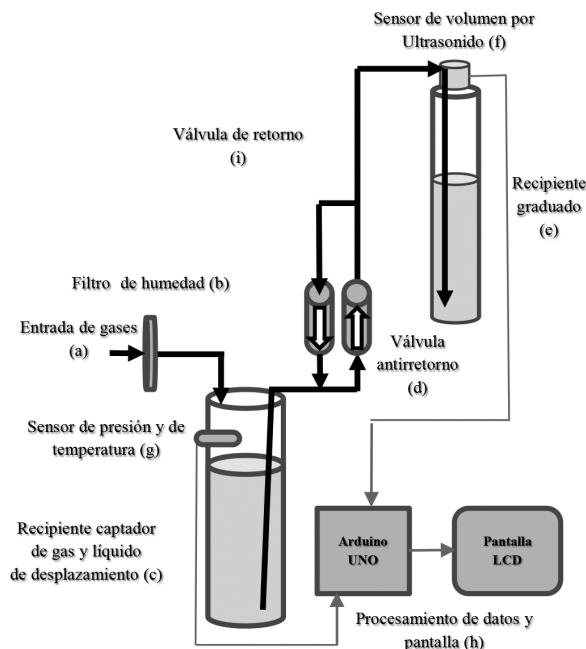


Figura 4. Medidor de volumen de gases modificado.

El algoritmo de programación (ver Figura 5) calcula el volumen acumulado en la cámara de gas del reactor y este volumen como las presiones inicial y final y las temperaturas inicial y final son mostradas en tiempo real en la pantalla LCD; los volúmenes de recipientes se introducen por medio del puerto serial, en caso de cambiar los recipientes captadores y de desplazamiento por otras capacidades.

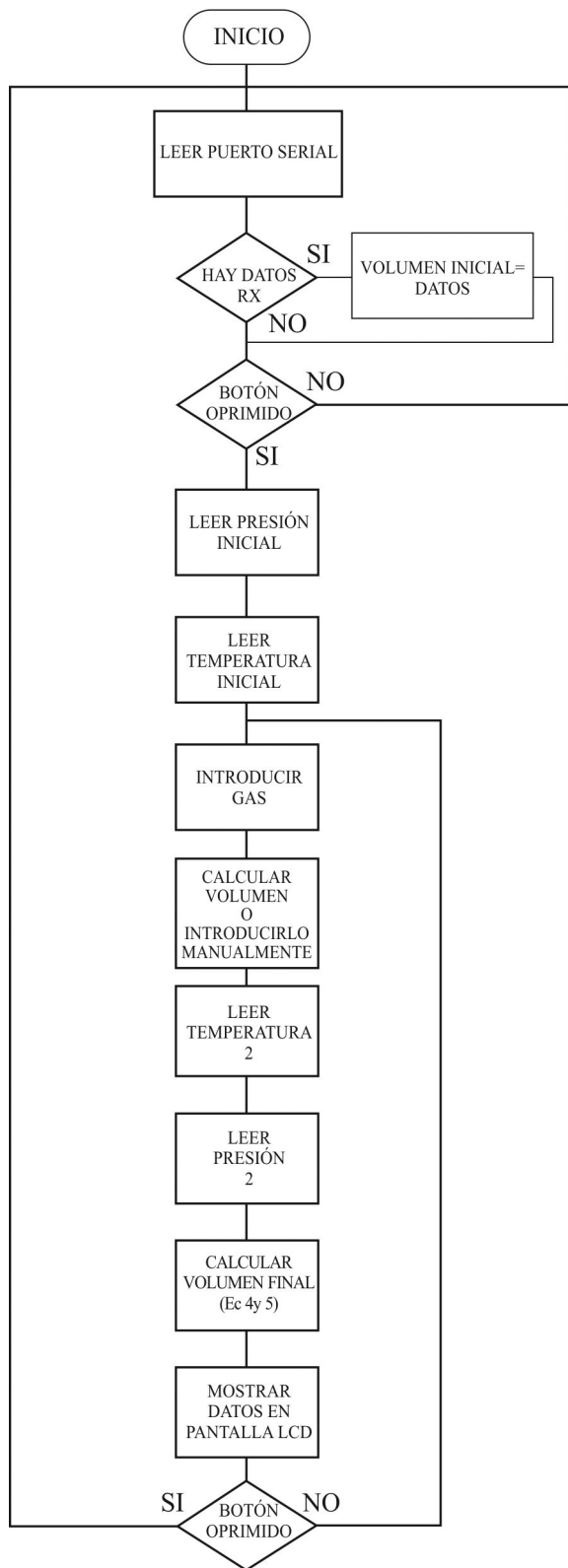


Figura 5. Algoritmo de programación del sistema embebido Arduino UNO

### Resultados y discusión

Se montó el sistema de medición de volumen de gas con los siguientes componentes:

- a) Entrada de gases, b) filtro de humedad, c) recipiente captador de gas, d) válvula antirretorno, e) recipiente graduado, f) sensor ultrasónico, g) sensor de temperatura presión, h) módulo Arduino UNO, i) pantalla LCD y j) válvula o llave de retorno (Ver Figura 6):

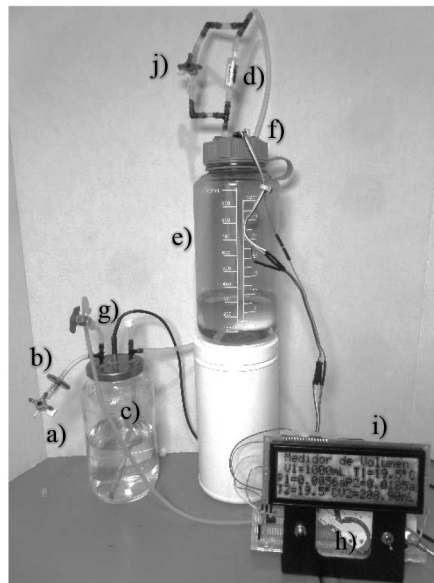


Figura 6. Montaje del medidor volumen de gases

En la Figura 7 se muestra a detalle el circuito electrónico.

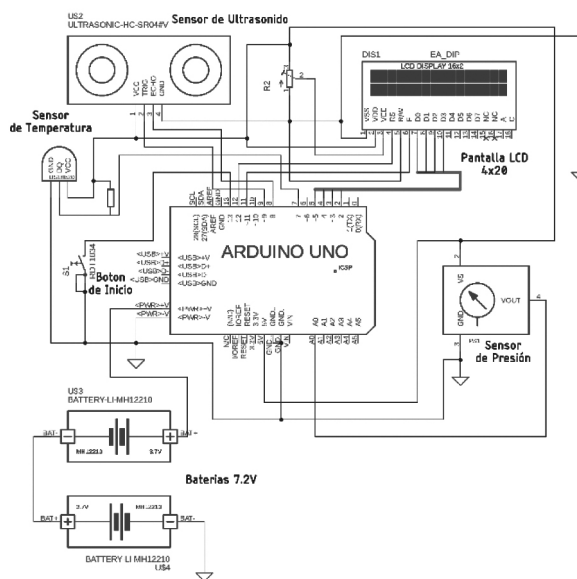


Figura 7. Diagrama esquemático

Se realizaron dos experimentos, con el medidor de volumen ultrasónico y sin él, con diez repeticiones cada uno. Con los resultados se justifica el uso de la medición de volumen automática, comparando los errores de ambos experimentos.

*Experimento 1*

Se utilizó un recipiente de 1000 mL, con 750 mL de agua desionizada con NaCl a pH 4, como líquido de desplazamiento y 250 mL de aire seco en la cámara de gases, como solvente.

Se inyectó al sistema con 300 mL de aire seco por medio de una bolsa Kendal, se midió el volumen desplazado visualmente por medio de la graduación de la probeta, los valores se introdujeron al sistema embebido Arduino UNO por medio del monitor serie incluido en el software de programación. Los resultados obtenidos en cada repetición del experimento y desplegados cada uno en la pantalla LCD se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Experimentos sin medidor de volumen ultrasónico.

No. de muestra	Entrada de gas (aire seco) en mL	Volumen en recipiente captador (mL)	Vol. desplazado (mL)	Vol. total (mL)	Error (%)
1	300	18.2	281.5	299.7	-0.10
2	300	18.1	281.2	299.3	-0.23
3	300	18.2	281.5	299.7	-0.10
4	300	18.2	281.5	299.7	-0.10
5	300	18.1	281.2	299.3	-0.23
6	300	18.2	281.2	299.4	-0.20
7	300	18.2	281.5	299.7	-0.10
8	300	18.3	281.5	299.8	-0.07
9	300	18.2	281.5	299.7	-0.10
10	300	18.2	281.2	299.4	-0.20

El error promedio es de -0.14 % y la desviación estándar de 0.19.

*Experimento 2*

Se utilizó un recipiente de 1000 mL, con 750 mL de agua desionizada con NaCl a pH 4, como líquido de desplazamiento y 500 mL de aire en la cámara de gases; como solvente se inyectaron 300 mL de aire seco al sistema con una bolsa Kendal, la medición del volumen desplazado fue calculada automáticamente con el medidor de volumen ultrasónico; los resultados se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Experimentos sin medidor de volumen ultrasónico.

No. de muestra	Entrada de gas (aire seco) en mL	Volumen en recipiente captador (mL)	Vol. desplazado (mL)	Vol. total (mL)	Error (%)
1	300	18.1	265.3	283.4	-5.53
2	300	18.2	270.7	288.9	-3.70
3	300	18.2	274.6	292.8	-2.40
4	300	18.1	275.4	293.5	-2.17
5	300	18.1	276.5	294.6	-1.80
6	300	18.2	264.8	283.0	-5.67
7	300	18.2	270.5	288.7	-3.77
8	300	18.2	277.2	295.4	-1.53
9	300	18.2	275.3	293.5	-2.17
10	300	18.2	265.8	284.0 0	-5.33

El error promedio es de -3.41 % y la desviación estándar de 4.87.

En la Figura 8 se muestra un ejemplo de la presentación de resultados del programa del cálculo de volumen en la pantalla LCD.



**Figura 8.** Resultados en pantalla LCD

Como se observa en los resultados de ambos experimentos, el primero es más confiable que el segundo, se tiene mejor precisión y exactitud sin el medidor de volumen ultrasónico, pero aun así sus resultados son confiables por tener un error de menos del 4%.

La desviación estándar generada por el medidor de volumen ultrasónico se debe a dos factores importantes, la calidad de los transductores ultrasónicos y los cambios de temperatura que afectan a la velocidad del ultrasonido [4].

Se resume que el sistema con ambos modos de operación con y sin medidor de volumen ultrasónico tiene una confiabilidad en sus resultados de 96% (98.86% - 96.59). Lo que es mejor en comparación de los métodos tradicionales de goteo y desplazamiento

de líquido, con confiabilidad comprobada en experimentación de laboratorio del 50% y 85% respectivamente.

En el medidor de volumen del recipiente captador, aproximadamente 18.3 mL, se demuestra que queda gas presurizado, que se desprecia en los métodos convencionales [1] y [2].

### Conclusiones

Con el medidor de volumen de gases es posible adquirir mediciones más precisas y exactas en experimentos con reactores biológicos, en comparación con las metodologías actualmente usadas, ya sea solo por goteo o desplazamiento de líquido, mismas que generan mucha incertidumbre debido a que son completamente manuales y son susceptibles a ruido externo, tanto en variaciones de presión, temperatura y vibración.

La confiabilidad del primer experimento 98.4% y del segundo 96.59%. Indica una mejora sustancial a la metodología utilizada actualmente, dando mayor confiabilidad a los resultados y al uso mismos de ellos en trabajos de investigación.

### Referencias

- [1] Torres, P. y Pérez, A. (2010). Actividad Metanogénica Específica: Una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 9, 5-14.
- [2] Vaquerano-Pineda, N; Salazar-Rojas, T; Porrás-Acosta, M. (2016). Medición automática del metano en biogás, por columnas de desplazamiento. *Tecnología en Marcha. Encuentro de Investigación y Extensión 2016*. Pág. 86-96.

- [3] Chen X., Zheng, P., Qaisar, M. and Tang M. (2012). Dynamic behavior and concentration distribution of granular sludge in a super-high-rate spiral anaerobic bioreactor. *Bioresource Technology*, vol. 111, pp. 134–140.
- [4] Chen, X., Zheng, P., Guo, Q., Mahmood, Y., Tang, C. and Ding S. (2010). Flow patterns of super-high-rate anaerobic bioreactor. *Bioresource Technology*, vol. 101, no. 20, pp. 7731–7735.
- [5] Abdelgair, A., Chen X. Liu, J. Xie X., Zhang, J., Zhang, K., Wang, H. and Liu, N. (2014). Characteristics, Process Parameters, and Inner Components of Anaerobic Bioreactors. *BioMed Research International*. Vol. 2014, Article ID 841573, 10 pages.
- [6] Parajuli, P. (2011). *Biogas measurement techniques and the associated errors*. University of Jyväskylä, Finland.
- [7] Payero, J., Nafchi, A., Davis, R. and Khlilian, A. (2017) An Arduino-Based Wireless Sensor Network for Soil Moisture Monitoring Using Decagon EC-5 Sensors. *Open Journal of Soil Science*, 7, 288-300.
- [8] Tippens, P. (2011). *Física, Conceptos y Aplicaciones*, 7ma Edición, McGraw-Hill Interamericana Editores
- [9] Chang, R. (1999). *Química*. Distrito Federal, México: McGraw-Hill
- [10] Brown, L., Lemay, E., Bursten, B., Murphy, C., Woodward, P. (2014). *Química, La Ciencia Central*. Ciudad de México, México: Pearson Educación.

**Recibido:** 11 de octubre de 2018

**Aceptado:** 7 de enero de 2019