

Estimación coeficientes de difusión en zanahorias cocidas a distintas concentraciones de arsénico

Oscar D. Galvez^a, Mariela B. Maldonado^{b,c}, María C. Vargas^c,
Graciela Affranchino^c, Juan I. González Pacheco^{b,c}.

(a) Departamento Materias Básicas, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, Rodríguez 273 (M5502AJE), Ciudad Mendoza, Argentina.

(b) CONICET, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina.

(c) Departamento de Ingeniería Química, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, Rodríguez 273 (M5502AJE), Ciudad Mendoza, Argentina.

Resumen: El presente trabajo parte de una investigación de fenómeno de transporte, y el objetivo fue cuantificar el fenómeno de difusión de arsénico en zanahoria en el rango de concentraciones de arsénico entre 5 y 15 mgL⁻¹ mediante un modelo de placa delgada. Las zanahorias fueron cocinadas en una solución de arsénico a distintas concentraciones a la temperatura de 99°C. Los datos evaluados mostraron consistencia con el aumento de la concentración de arsénico. Los coeficientes efectivos de difusión calculados a las concentraciones de 5, 10 y 15 mgL⁻¹ fueron de 8,43E-08 m²s⁻¹, 8,47E-08 m²s⁻¹ y 8,92E-08 m²s⁻¹, para la pulpa (D_L) y de 12,37E-11 m²s⁻¹, 12,46E-11 m²s⁻¹, y 14,33E-11 m²s⁻¹ para la epidermis (D_E) respectivamente. En ensayo a 5 mgL⁻¹ As la difusión de arsénico fue menor que a las concentraciones de 10 y 15 mgL⁻¹ As, donde la velocidad de avance de las moléculas de arsénico disminuyó con el descenso de concentración en la solución de cocción. La energía de activación de la difusión fue de 199,66 KJ mol⁻¹. Se observaron comportamientos similares en distintas posiciones radiales de la zanahoria donde el contenido de arsénico descendió desde la periferia hacia el centro; esto fue consistente con los estudios del fenómeno de difusión con otros solutos en alimentos. Los bajos valores del

coeficiente de difusión de la epidermis (D_E), en el orden de $10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, indicaron que esa superficie externa generó una resistencia a la transferencia de soluto desde la solución hacia las partes internas de la zanahoria.

Palabras claves: Zanahoria, modelación matemática, fenómeno de transporte, coeficiente de difusión, arsénico.

Introducción:

El HACRE, Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico es una enfermedad producida por la ingesta de arsénico a través del agua de bebida durante un período de tiempo. La Organización Mundial de la Salud (OMS) redujo el valor de referencia del arsénico en agua potable de 50 a $10 \mu\text{gL}^{-1}$ (OMS, 2008). A nivel mundial, varios países como Bangladesh, Chile, China, Hungría, India, México, Rumanía, Taiwán, Vietnam y sur-oeste de EE.UU., reportaron cantidades de arsénico superiores a $50 \mu\text{gL}^{-1}$ en acuíferos (Smedley et al., 2002). En Argentina, alrededor de dos y medio de millones de habitantes están en riesgo de padecer enfermedades relacionadas al arsénico en agua. Mendoza se encuentra entre las provincias más afectadas, (Swiecky et al., 2006). En Argentina, el cultivo anual de zanahorias oscila entre 7.000 y 9.800 hectáreas, las provincias con mayor producción de ese cultivo son: Mendoza, Buenos Aires, Santiago del Estero, Santa Fe, Córdoba y San Juan (Alessandro et al., 2011). Por otro lado, el transporte de agua en alimentos es de gran importancia, como también los cambios microbiológicos y físico-químicos. El transporte de agua desde y hacia los alimentos es esencial para la calidad y conservación de los alimentos. La difusión molecular es el fenómeno de transporte aceptado. (Cussler, 2009; Saravacos et al., 2001; Tijssens et al., 2001). La modelación matemática sirve para explicar el comportamiento y características de un sistema difusional; además puede predecir la situación real de un proceso (Khandaker et al., 2009; Meghwal et al., 2016; Ozilgen, 2011). Se supone que la difusión molecular es la que controla el transporte de agua en los sólidos, donde la fuerza impulsora es un gradiente de concentración (dC/dz) o el gradiente de contenido de humedad equivalente (dX/dz). En realidad la difusión de solutos en una matriz alimentaria es multidimensional, pero en análisis y cálculos simplificados, se considera la difusión unidimensional y se aplica la ecuación de difusión de la segunda ley de Fick (Crank, 1975; Cussler, 2009; Saravacos et al., 2001). En particular, la difusividad de arsénico, en zanahoria no se ha encontrado cuantificada. En cambio, se ha estimado a partir de las difusividades de otros no electrolitos

utilizando varias fórmulas empíricas que relacionan la difusividad con el volumen molar (Della Rocca et al., 2014; Melquíades et al., 2009; Zambrano et al., 2007; Zielinska et al., 2010). El objetivo de esta investigación fue cuantificar el fenómeno de la difusión de arsénico mediante el modelo de placa delgada, como una primera aproximación a fin de conocer los órdenes de magnitud de los coeficientes efectivos de difusión, con la finalidad de caracterizar el proceso.

Materiales y Métodos

Se emplearon zanahorias bienales híbridas obtenidas de un productor de zanahoria de Mendoza, Argentina, del cual se muestreó un lote. Las dimensiones de las zanahorias seleccionadas fueron: longitud $180 \pm 1,63$ mm; peso $152 \pm 3,74$ g; diámetros superior e inferior de $37,4 \pm 0,51$ mm y $26,7 \pm 0,48$ mm respectivamente. La cocción de zanahorias enteras con su epidermis se realizó en un baño termostático a 99°C empleando distintas concentraciones de arsénico. Las soluciones de arsénico usadas en los ensayos se prepararon a partir de solución stock As (III) de 1000 mgL^{-1} , según método normalizado 3114B (APHA, 2005). Se tomaron muestras de zanahoria a diferentes profundidades según Figura 1. A las muestras se les realizó el procedimiento de mineralización por vía húmeda usando ácidos nítrico y sulfúrico concentrados (APHA, 2005; Nielsen, 2010). Las determinaciones de arsénico total se hicieron empleando método normalizado 3114.C (APHA, 2005).

En Tabla 1 se describe los ensayos realizados y sus condiciones.

Tabla 1. Ensayos empleados en modelo placa delgada.

Ensayo	Temp. (C°)	As mgL^{-1}	Intervalo muestreo	Frec. muestreo (minutos)	Tpo. cocción (minutos)	Cantidad muestras
1		5				135
2	99	10	4	7,5	30	135
3		15				135

A las zanahorias se les realizó una secuencia de cortes para obtener las muestras en función de la altura del corte (longitud de la zanahoria) y distancia radial de la muestra. En Figura 1 se muestra la secuencia de cortes para la muestra corte superior. El mismo se practicó para las muestras corte medio e inferior.

Previo a la inmersión de las zanahorias en solución de arsénico se recubrieron los extremos con revestimiento impermeable al agua (pintura asfáltica), para evitar transferencia longitudinal de soluto durante la cocción.

Para el procesamiento de datos se usó el software estadístico GraphPad Prism, versión 8.00.

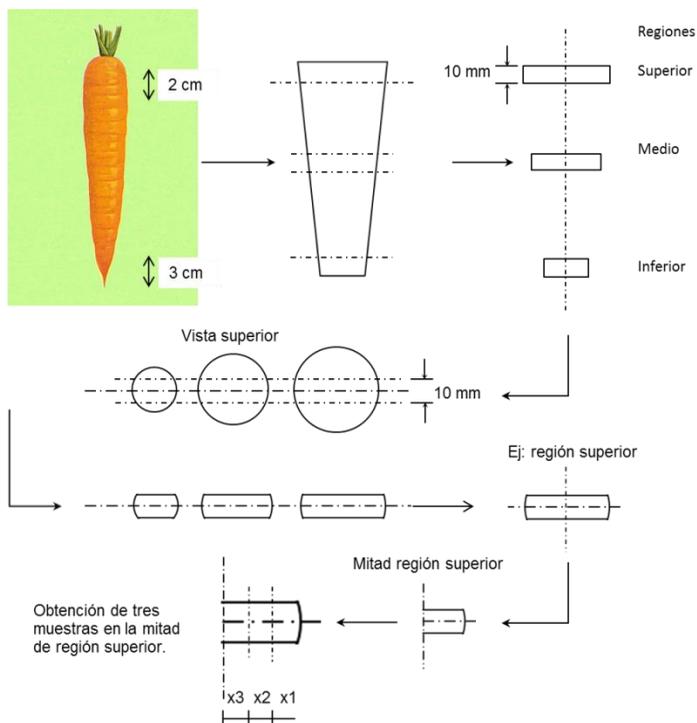


Figura 1. Secuencia de cortes para la obtención de muestras.

La codificación empleada en las leyendas de las Figuras corresponde a una unidad muestral (x1, x2 o x3) proveniente de una región de muestra (superior, medio o inferior) de zanahoria. Por ejemplo: la leyenda "x1" se refiere a la porción de distancia radial próxima a la parte exterior de pulpa de zanahoria, a una región determinada; según se detalla en Figura 1.

Análisis estadístico

Los datos se analizaron mediante comparación de medias (análisis de varianza/ANOVA). Se realizó una prueba de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey para evaluar la prueba ANOVA en el caso de contar con una diferencia significativa entre las medias

Modelación matemática

Teniendo en cuenta la forma geométrica de las muestras obtenidas, luego de la secuencia de cortes, se planteó un modelo de placa delgada con los siguientes supuestos.

1. La difusión molecular es el único mecanismo de transporte dentro del sólido, de manera que se desprecia transporte convectivo ($v_x=v_y=v_z=0$).
2. La difusión se considera sin generación de sustancias por reacción química.
3. La pulpa de la zanahoria se considera homogénea y sus propiedades isotrópicas.
4. La difusión molecular es unidireccional.
5. Debido a la gran agitación del líquido rodeando las superficies (elevado número de Biot), la concentración en la epidermis adquiere instantáneamente la concentración del líquido.

$$C_i(x_i, t) = C_{i(x^{sup})} = C_{soluc} ; t > 0$$

6. Se considera proceso isotérmico.

En Figura 2 se muestra el modelo simplificado de placa delgada para la muestra corte superior.

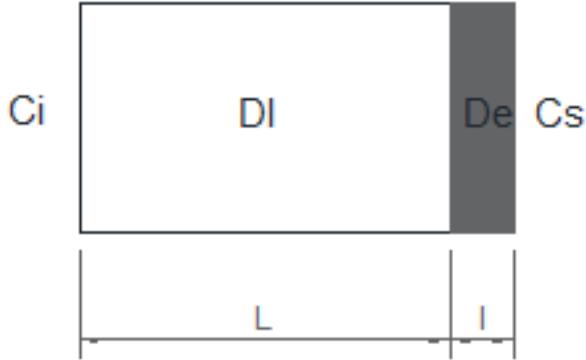


Figura 2. Modelo de placa delgada.

La ecuación adimensionalizada para el proceso de difusión unidimensional con coeficientes constantes de difusión efectivos a través de la pulpa de la zanahoria (D_L) y epidermis (D_E) es la siguiente, sujeta a las siguientes condiciones inicial y de frontera es:

$$\frac{d\tilde{C}}{d\theta} = \frac{d^2\tilde{C}}{d\tilde{X}^2} \quad (1)$$

$$CI: \tilde{C} = 1; 0 \leq \tilde{X} \leq 1; \theta = 0 \quad (2-a)$$

$$CF1: \frac{d\tilde{C}}{d\tilde{X}} = 0; \tilde{X} = 0; \theta > 0 \quad (2-b)$$

$$CF2: \frac{d\tilde{C}}{d\tilde{X}} = -\frac{D_E/l}{D_L/L} \tilde{C}; \tilde{X} = 1; \theta > 0 \quad (2-c)$$

La solución de ecuación (1) para placa delgada sujeta a las condiciones de ecuación (2-a,b,c) es:

$$\tilde{C}(\tilde{X}, \theta) = \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2 \frac{\text{sen}(\lambda_n)}{\lambda_n} \cos(\lambda_n \tilde{X}) \right] \exp(-\lambda^2 \theta) \quad (3)$$

Los autovalores de λ_n se obtuvieron de la siguiente autofunción:

$$\lambda_n \tan(\lambda_n) = \frac{D_E}{D_L} \frac{L}{l} = \text{cte} \quad (4)$$

La concentración volumétrica promedio se obtiene por integración de la ecuación (6), quedando:

$$\tilde{C}_{V_m} = \frac{1}{V} \int_V \tilde{C} dV \quad (5)$$

$$\tilde{C}_{V_m} = \frac{1}{V} \int_V \left\{ \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2 \frac{\text{sen}(\lambda_n)}{\lambda_n} \cos(\lambda_n \tilde{X}) \right] \exp(-\lambda^2 \theta) \right\} dV \quad (5)$$

El coeficiente de difusión de la epidermis se calculó de ecuación 7. El valor del espesor de la epidermis, (l), se obtuvo de Escobar-Avila, 2017.

Resultados y Discusión:

Se consideró el tiempo cero a las zanahorias antes de introducirlas en solución arseniosa a la temperatura de ensayo. Se realizó el blanco del ensayo midiendo la concentración de arsénico en zanahorias sin someterlas a cocción a fin de verificar el contenido inicial del mismo. Los datos experimentales representan el valor promedio de tres repeticiones expresadas en microgramo de arsénico total por gramo de zanahoria ($\mu\text{g As/g-zanahoria}$). A éstos se les descontó el contenido inicial de arsénico.

En Figura 3 se muestran los valores experimentales promedio de arsénico de cuatro intervalos de muestreo, para los cortes superior, medio e inferior para ensayo 1 realizado con una concentración de arsénico de 5 mgL^{-1} .

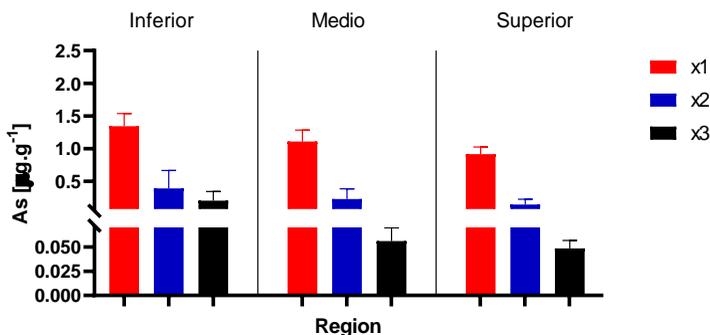


Figura 3. Valores promedio de As ($\mu\text{g g}^{-1}$) para Ensayo 1 con 5 mgL^{-1} de As.

La muestra x1 de la región inferior presentó una concentración de $1,119 \mu\text{g g}^{-1}$ As a los 7,5 minutos, $1,252 \mu\text{g g}^{-1}$ As a los 15 minutos, $1,489 \mu\text{g g}^{-1}$ As a los 22,5 minutos y $1,520 \mu\text{g g}^{-1}$ As a los 30 minutos, resultando en un valor promedio de $1,345 \mu\text{g g}^{-1}$ As. Este valor fue mayor que el dato promedio hallado en la muestra x1 de la región media. En esta última a los 7,5 minutos su valor fue de $0,864 \mu\text{g g}^{-1}$ As, a los 15 minutos el valor hallado fue de $1,120 \mu\text{g g}^{-1}$ As, a los 22,5 minutos mostró un valor de $1,179 \mu\text{g g}^{-1}$ As y luego a los 30 minutos con un valor de $1,275 \mu\text{g g}^{-1}$ As, para finalmente presentar un promedio de $1,110 \mu\text{g g}^{-1}$ As. La muestra x1 de la región superior a los 7,5 minutos registró una concentración de As de $0,758 \mu\text{g g}^{-1}$, a los 15 minutos tuvo $0,943 \mu\text{g g}^{-1}$ As, a los 22,5 minutos fue de $0,973 \mu\text{g g}^{-1}$ As y a los 30 minutos de $0,995 \mu\text{g g}^{-1}$ As, para dar un valor promedio de $0,917 \mu\text{g g}^{-1}$ As.

La muestra x2 de la región inferior a los 7,5 minutos presentó una concentración de $0,126 \mu\text{g g}^{-1}$ As, $0,244 \mu\text{g g}^{-1}$ As a los 15 minutos, $0,443 \mu\text{g g}^{-1}$ As a los 22,5 minutos y $0,752 \mu\text{g g}^{-1}$ As a los 30 minutos, con un valor promedio de $0,391 \mu\text{g g}^{-1}$ As. Siendo este valor mayor que el valor promedio de $0,230 \mu\text{g g}^{-1}$ As hallado en la muestra x2 de la región media, dato promediado de $0,070 \mu\text{g g}^{-1}$ As a los 7,5 minutos, $0,136 \mu\text{g g}^{-1}$ As a los quince minutos, $0,298 \mu\text{g g}^{-1}$ As para los 22,5 minutos y a los 30 minutos de $0,416 \mu\text{g g}^{-1}$ As. En muestra x2 región superior los valores de arsénico para los tiempos de 7,5, 15, 22,5 y 30 minutos fueron $0,061$, $0,102$, $0,184$ y $0,238 \mu\text{g g}^{-1}$ As respectivamente, para un valor promedio de $0,146 \mu\text{g g}^{-1}$ As.

Por último, la muestra x3 de la región superior a los 7,5 minutos la cantidad de As fue de $0,039 \mu\text{g g}^{-1}$ As, $0,047 \mu\text{g g}^{-1}$ As a los quince minutos, $0,048$ y $0,059 \mu\text{g g}^{-1}$ As para 22,5 y 30 minutos respectivos, dando un promedio de $0,049 \mu\text{g g}^{-1}$ As. Este valor fue menor que la muestra x3 región media, donde se obtuvo un valor de $0,043 \mu\text{g g}^{-1}$ As a los 7,5 minutos, $0,049 \mu\text{g g}^{-1}$ As a los 15 minutos, $0,057 \mu\text{g g}^{-1}$ As para 22,5 minutos y $0,075$ a los 30 minutos, con un promedio de $0,056 \mu\text{g g}^{-1}$ As. Finalmente la muestra x3 de la región inferior arrojó una cantidad $0,204 \mu\text{g g}^{-1}$ As, resultado promediado de $0,083$, $0,112$, $0,230$ y $0,391 \mu\text{g g}^{-1}$ As para los cuatro intervalos de tiempo desde el inicio a fin del ensayo 1.

Las concentraciones volumétricas promedio fueron de $0,371 \mu\text{g g}^{-1}$ As para la región superior, $0,465 \mu\text{g g}^{-1}$ As para la región media y de $0,647 \mu\text{g g}^{-1}$ As para región inferior.

En Figura 4 se muestran los datos de arsénico obtenidos para el ensayo 2 con concentración de arsénico de 10mgL^{-1} .

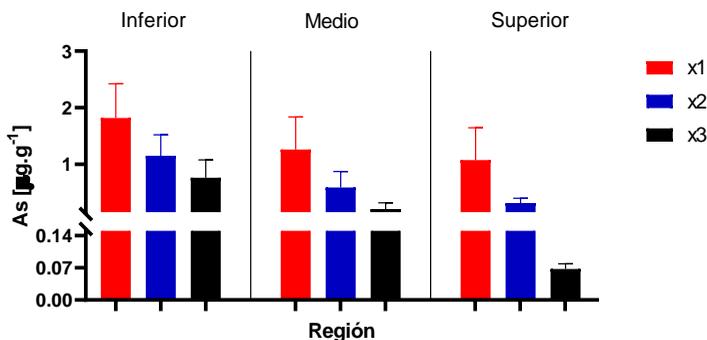


Figura 4. Valores promedio de As ($\mu\text{g g}^{-1}$) para Ensayo 2 con 10mgL^{-1} As.

En la Figura 4 se observó que en la muestra x1 de la región inferior presentó una concentración de $1,011 \mu\text{g g}^{-1}$ As a los 7,5 minutos, $1,857 \mu\text{g g}^{-1}$ As a los 15 minutos, $1,934 \mu\text{g g}^{-1}$ As a los 22,5 minutos y $2,471 \mu\text{g g}^{-1}$ As a los 30 minutos, resultando en un valor promedio de $1,818 \mu\text{g g}^{-1}$ As. Este valor fue mayor que el dato promedio hallado en la muestra x1 de la región media. En esta última a los 7,5 minutos su valor fue de $0,536 \mu\text{g g}^{-1}$ As, a los 15 minutos el valor hallado fue de $1,223 \mu\text{g g}^{-1}$ As, a los 22,5 minutos mostró un valor de $1,346 \mu\text{g g}^{-1}$ As y luego a los 30 minutos con un valor de $1,938 \mu\text{g g}^{-1}$ As, para

presentar un promedio de $1,261 \mu\text{g g}^{-1}$ As. La muestra x1 de la región superior a los 7,5 minutos registró una concentración de As de $0,274 \mu\text{g g}^{-1}$, a los 15 minutos tuvo $1,077 \mu\text{g g}^{-1}$ As, a los 22,5 minutos fue de $1,328 \mu\text{g g}^{-1}$ As y a los 30 minutos de $1,607 \mu\text{g g}^{-1}$ As, para dar un valor promedio de $1,072 \mu\text{g g}^{-1}$ As.

La muestra x2 de la región inferior a los 7,5 minutos presentó una concentración de $0,795 \mu\text{g g}^{-1}$ As, $1,012 \mu\text{g g}^{-1}$ As a los 15 minutos, $1,120 \mu\text{g g}^{-1}$ As a los 22,5 minutos y $1,668 \mu\text{g g}^{-1}$ As a los 30 minutos, con un valor promedio de $1,149 \mu\text{g g}^{-1}$ As. Siendo este valor mayor que el valor promedio de $0,589 \mu\text{g g}^{-1}$ As hallado en la muestra x2 de la región media, dato promediado de $0,213 \mu\text{g g}^{-1}$ As a los 7,5 minutos, $0,541 \mu\text{g g}^{-1}$ As a los quince minutos, $0,786 \mu\text{g g}^{-1}$ As para los 22,5 minutos y a los 30 minutos de $0,818 \mu\text{g g}^{-1}$ As. En muestra x2 región superior los valores de arsénico para los tiempos de 7,5, 15, 22,5 y 30 minutos fueron $0,207$, $0,303$, $0,324$ y $0,413 \mu\text{g g}^{-1}$ As respectivamente, para un valor promedio de $0,312 \mu\text{g g}^{-1}$ As.

Por último, la muestra x3 de la región superior a los 7,5 minutos la cantidad de As fue de $0,056 \mu\text{g g}^{-1}$ As, $0,061 \mu\text{g g}^{-1}$ As a los quince minutos, $0,071$ y $0,081 \mu\text{g g}^{-1}$ As para 22,5 y 30 minutos respectivos, dando un promedio de $0,068 \mu\text{g g}^{-1}$ As. Este valor fue menor que la muestra x3 región media, donde se obtuvo un valor de $0,101 \mu\text{g g}^{-1}$ As a los 7,5 minutos, $0,120 \mu\text{g g}^{-1}$ As a los 15 minutos, $0,300 \mu\text{g g}^{-1}$ As para 22,5 minutos y $0,306$ a los 30 minutos, con un promedio de $0,207 \mu\text{g g}^{-1}$ As. Finalmente la muestra x3 de la región inferior arrojó una cantidad $0,760 \mu\text{g g}^{-1}$ As, resultado promediado de $0,433$, $0,570$, $0,907$ y $1,131 \mu\text{g g}^{-1}$ As para los intervalos de tiempo desde comienzo a fin del ensayo 2.

Las concentraciones volumétricas promedio fueron de $0,484 \mu\text{g g}^{-1}$ As para la región superior, $0,686 \mu\text{g g}^{-1}$ As para la región media y de $1,242 \mu\text{g g}^{-1}$ As para región inferior.

En Tabla 2 se muestran los datos de arsénico obtenidos para el ensayo 3 con una concentración de 15mgL^{-1} .

Tabla 2. Valores promedio de As ($\mu\text{g g}^{-1}$) para Ensayo 3 con 15mgL^{-1} As.

Muestra- Región	Tiempo (minutos)				Conc. As promedio $\mu\text{g g}^{-1}$	Conc. As p/región $\mu\text{g g}^{-1}$
	7,5	15	22,5	30		
x1superior	1,495	2,223	2,973	2,996	2,422	

x2superior	0,095	0,380	0,760	1,151	0,597	
x3superior	0,056	0,061	0,071	0,081	0,068	1,029
x1media	1,982	2,825	3,163	3,333	2,826	
x2media	0,306	0,767	1,106	1,627	0,951	
x3media	0,101	0,120	0,300	0,339	0,215	1,331
x1inferior	3,987	4,416	4,465	4,559	4,357	
x2inferior	0,421	0,898	2,222	3,284	1,706	
x3inferior	0,159	0,519	1,225	1,411	0,828	2,297

En Tabla 2, la muestra x1 de la región inferior presentó un valor promedio de $4,357 \mu\text{g g}^{-1}$ As. Este valor fue mayor que el dato promedio hallado en la muestra x1 de la región media con $2,826 \mu\text{g g}^{-1}$ As. La muestra x1 de la región superior registró una concentración promedio de $2,422 \mu\text{g g}^{-1}$ As. En la región inferior se obtuvieron los mayores valores de arsénico respecto a las otras regiones media y superior. La muestra x2 de la región inferior tuvo un valor promedio de $1,706 \mu\text{g g}^{-1}$ As., dato mayor que los valores promedios de $0,951 \mu\text{g g}^{-1}$ As y $0,597 \mu\text{g g}^{-1}$ As de las muestra x2 de las regiones media y superior respectivamente.

La muestra x3 de la región inferior con un promedio de $0,828 \mu\text{g g}^{-1}$ As., fue mayor a los promedios de arsénico de la región media con $0,215 \mu\text{g g}^{-1}$ As y de $0,828 \mu\text{g g}^{-1}$ As para la región superior. Las concentraciones volumétricas promedio fueron de $1,029 \mu\text{g g}^{-1}$ As para la región superior, $1,331 \mu\text{g g}^{-1}$ As para la región media y de $2,297 \mu\text{g g}^{-1}$ As para región inferior.

Los datos experimentales constataron el comportamiento de las leyes de la difusión en función de la concentración, donde el aumento del gradiente de concentración conlleva una mayor cantidad de soluto difundido en la zanahoria a través de las distancias radiales y regiones, a iguales tiempos de medición (Carslaw et al., 1959; Crank, 1975; Saravacos et al., 2001).

En Tabla 3 se presentan la energía de activación y los valores medios de los coeficientes de difusión efectivos de arsénico piel y pulpa de zanahoria para los tres tratamientos a distintas concentraciones de arsénico.

Tabla 3. Coeficientes efectivos promedio de difusión y Energía de activación en modelo placa delgada.

Conc As (mgL ⁻¹)	D _L .E-08 (m ² s ⁻¹)	SD .E-08 (m ² s ⁻¹)	D _E .E-11 (m ² s ⁻¹)	SD.E-11 (m ² s ⁻¹)	Ea (KJ.mol ⁻¹)	D ₀ .E+21 (m ² s ⁻¹)	r ²
5	8,43 ^a	5,25	12,37 ^a	8,42	199,66	3,86	0,968
10	8,47 ^a	4,45	12,46 ^a	7,55			
15	8,92 ^a	4,99	14,33 ^a	8,94			

Los resultados de D_L y D_E se expresan como medias ± SD (n = 36). Los valores medios con letras iguales en la misma columna no difieren significativamente (p < 0,05).

Del análisis de Tabla 3 se observó que los valores de D_L y D_E aumentaron al incrementar la concentración de arsénico en la solución durante la cocción de las zanahorias.

Con una disminución de 10 mgL⁻¹ As entre los ensayos 3 y 1 y de 5 mgL⁻¹ As respecto a los ensayos 3 y 2, la disminución porcentual de los coeficientes efectivos de pulpa de zanahoria (D_L) fueron de 5,5% y 5,0% respectivamente, a su vez, los coeficientes efectivos de difusión para distintas concentraciones no fueron significativamente diferentes, esto podría indicar que la concentración no afecta directamente a dichos coeficientes.

Los bajos valores del coeficiente de difusión de la epidermis (D_E), indican que esa superficie externa generó una resistencia a la transferencia de soluto desde la solución hacia las partes internas de la zanahoria. Esto es consistente con lo hallado por Maldonado et al. (2003).

Los valores hallados de difusividad de arsénico en zanahoria estuvieron en el orden de 1,37E-08 a 8,44E-08 m²s⁻¹, estos fueron consistente con lo hallado por Melquiades et al. (2009), en procesos de hidratación o rehidratación de zanahorias peladas y cortadas en placas entre 3,46E-10 a 4,59E-10 m²s⁻¹ en el rango de temperaturas entre 40-80°C, (Melquiades et al., 2009).

Por su parte, Zambrano et al. (2007) reportó coeficientes de difusión de agua entre 6,11E-09 a 3,18E-09 m²s⁻¹ a temperaturas entre 50-93°C para zanahorias liofilizadas. Della Rocca et al. (2014) hallaron un valor del coeficiente de difusión efectiva del agua de 1,57E-9 m²s⁻¹ por Osmodehidrocongelación (Della Rocca et al., 2014; Zambrano

et al., 2007). Ambos valores son consistentes con los hallados en este trabajo.

También los coeficientes de difusión reportados en la Tabla 2 son consistentes con Saravacos y Maroulis (2001) quienes hallaron valores típicos de difusividad de humedad de varios productos alimenticios a distintas temperatura, entre ellos para zanahoria: $2,00E-10 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ a 30°C , de $2,20E-12$ a $7,46E-09 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ para 20°C y 100°C .

Por su parte esto valores son menores que los hallados por Matusek et al. (2002) para difusión de azúcares en zanahorias, cuyos valores fueron del orden de $10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ lo cual es consistente dado que la masa molecular de los azúcares es mucho mayor que la del arsénico.

Conclusiones:

Se cuantificó el fenómeno de difusión de arsénico en zanahoria para las concentraciones de arsénico 5, 10 y 15 mgL^{-1} .

Las cantidades volumétricas promedio en las tres regiones fueron de $0,494 \mu\text{g g}^{-1}$ As para el ensayo 1 realizado con 5 mgL^{-1} As, $0,804 \mu\text{g g}^{-1}$ As para el ensayo 2 con 10 mgL^{-1} As y $1,552 \mu\text{g g}^{-1}$ As para el ensayo 3 con 15 mgL^{-1} As.

Se observaron comportamientos similares en las distintas regiones donde el contenido de arsénico descendió desde la periferia hacia el centro de la zanahoria, consistente con otros estudios del fenómeno de difusión con otros solutos en alimentos. También, en la región superior de la zanahoria, la muestra con una mayor distancia radial que las regiones medio e inferior; debido a la forma troncocónica de la misma; se demostró una relación inversa entre el grado de avance del arsénico en la zanahoria y la posición radial de la muestra.

Los coeficientes efectivos de difusión calculados a las concentraciones de arsénico de 5, 10 y 15 mgL^{-1} fueron de $8,43E-08 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, $8,47E-08 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ y $8,92E-08 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, para la pulpa (DL) y de $12,37E-11 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, $12,46E-11 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, y $14,33E-11 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ para la epidermis (DE) respectivamente. Dependiendo esos coeficientes con la temperatura se verificó por medio de la ecuación de Arrhenius una energía de activación necesaria para la difusión de $199,66 \text{ KJ mol}^{-1}$.

Los bajos valores del coeficiente de difusión de la epidermis (DE), indicaron que esa superficie externa generó una resistencia a la transferencia de soluto desde la solución hacia las partes internas de la zanahoria.

Agradecimientos (opcional):

Laboratorio de Análisis de Aguas y Suelos, FRM, UTN Argentina.

Referencias:

- Alessandro, M. S., & Gabriel, E. L. (2011). El panorama varietal del cultivo de zanahoria en Argentina. *Horticultura Argentina*.
- Atsdr, U. (2007). Toxicological profile for arsenic. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Division of Toxicology, Atlanta, GA.
- Bertello, L. (2015). *Oligoelementos en Medicina*: Editorial Dunken.
- Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*: 2d Ed: Clarendon Press.
- Cussler, E. L. (2009). *Diffusion: mass transfer in fluid systems*: Cambridge university press.
- Della Rocca, P., Roche, L., Languasco, J., & Mascheroni, R. J. R. T. y. C. (2014). Modelado de la Cinética de Conservación de Zanahoria (*Daucus Carota*) por Osmodehidrocongelación. (24), 141-159.
- García, S. I. (2011). Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico HACRE: Módulo de Capacitación.
- Guillard, V., Bourlieu, C., & Gontard, N. (2013). *Food structure and moisture transfer: a modeling approach*: Springer Science & Business Media.
- IARC. (2012). A review of human carcinogens. Part C: arsenic, metals, fibres, and dusts. 100 C.
- INC. (2015). Instituto Nacional del Cáncer. Carcinógenos en el medio ambiente y el riesgo de cáncer.
- Khandaker, N., Brady, P., & Krumhansl, J. (2009). Arsenic removal from drinking water: a handbook for communities. Sandia National Laboratories, 0-51.
- Lepori, V., & Edda, C. (2015). Hidroarsenicismo crónico regional endémico en Argentina. *Acta bioquímica clínica latinoamericana*, 49(1), 00-00.
- Meghwal, M., & Goyal, M. R. (2016). *Food engineering: emerging issues, modeling, and applications*: CRC Press.
- Melquíades, Y. I., López, C., & Rosas, M. E. (2009). Estudio de la cinética de rehidratación de zanahoria (*Daucus Carota*) deshidratadas. *Información tecnológica*, 20(3), 65-72.
- OMS. (2008). *Guidelines for Drinking-water Quality*, Vol. 1, Recommendations.
- Ozilgen, M. (2011). *Handbook of food process modeling and statistical quality control*: Crc Press.

- Rao, M. A., Rizvi, S. S., Datta, A. K., & Ahmed, J. (2014). Engineering properties of foods: CRC press.
- Saravacos, G. D., & Maroulis, Z. B. (2001). Transport properties of foods: CRC Press.
- Smedley, P. L., & Kinniburgh, D. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. Applied geochemistry, 17(5), 517-568.
- Swiecky, C., Garcia, S., Villaamil Lepori, E., Paredes, G., Farías, S., Ponce, R., & Moreno, I. J. E. c. m. A. T. A. S. d. A. y. D. S. A. (2006). Epidemiología del hidroarsenicismo crónico regional endémico en la república argentina.
- Tijssens, L., Hertog, M., & Nicolaï, B. M. (2001). Food process modelling (Vol. 59): Woodhead Publishing.
- Zambrano, M. L., Rodríguez, D. B., & Álvarez, A. J. I. t. (2007). Estudio cinético y de superficie de respuesta para la rehidratación de zanahorias (*Daucus carota*) liofilizadas. 18(4), 47-56.
- Zielinska, M., Markowski, M. J. C. E., & Intensification, P. P. (2010). Air drying characteristics and moisture diffusivity of carrots. 49(2), 212-218.

* * *