

Emulación del Crecimiento de Hongos Comestibles y Medicinales utilizando un Algoritmo Evolutivo con un Operador Genético de tipo Cilíndrico

Alejandro Peña P. ^{*} Jesús Antonio Hernández R. [†]

Resumen

En este artículo se describe y analiza un modelo computacional para la emulación del crecimiento del hongo *Pleurotus ostreatus* en una de sus primeras etapas de crecimiento. Este modelo consta de dos etapas: una primera donde se fusionan conceptos de geometría vectorial, métodos numéricos y computación evolutiva para la obtención de una superficie que describa el crecimiento bajo unas condiciones dadas de pH , T , t y Hr ; y una segunda etapa en donde se hace la exploración de dicha superficie mediante un despliegue uniforme de la misma. Para esta etapa se utiliza un algoritmo evolutivo que posee un operador de mutación de exploración de la superficie que involucra conceptos de Coordenadas Cilíndricas para obtener las mejores combinaciones de valores para un crecimiento óptimo del hongo.

Palabras claves: *NURBS (Non Uniform Rational Basis Splines), Coordenadas Cilíndricas, leurotus ostreatus, Superficies de Respuesta, Algoritmos Evolutivos (AE), Estrategias de Evolución (EE).*

Abstract

In this article a computational model for the interpolation and exploration of Complex Response Surfaces is described and analyzed. This computational model consists of two stages: an initial stage in which a group of points is interpolated by means of the coalition of a series of characteristic concepts of vector geometry, the numeric methods and the evolutionary computation to construct the response surface; and a second stage where a series of good trajectories by means of the exploration of this surface are determined. In this stage, an evolutionary algorithm processing a mutation operator that incorporates the fundamental concepts of the cylindrical coordinates is used to indicate a trajectory through the best combinations among the variables of the particular process this surface represents.

Keywords: *NURBS (Non Uniform Rational Basis Splines), Cylindrical Coordinates, Pleurotus ostreatus, Response Surfaces, Evolutionary Algorithms, Evolution Strategies.*

^{*} Universidad de San Buenaventura, Cra. 56C N°51 40, juan.pena@usbmed.edu.co

[†] Universidad Nacional de Colombia, Carrera 80 #65 - 223, jahernan@unalmed.edu.co

[‡] Se concede autorización para copiar gratis parte o todo el material publicado en la Revista Colombiana de Computación siempre y cuando las copias no sean usadas para fines comerciales, y que se especifique que la copia se realiza con el consentimiento de la Revista Colombiana de Computación.

1. Introducción

La emulación del crecimiento de hongos comestibles y medicinales utilizando herramientas computacionales ha sido muy poco desarrollada, debido básicamente a que muchas de las herramientas basadas en la inteligencia computacional fueron concebidas para problemas técnicos muy precisos y bien definidos, dejando de lado problemas con información incompleta o imprecisa, como se presenta en fenómenos de crecimiento de algunas plantas, hortalizas y más específicamente en el caso del crecimiento de hongos.

El estudio del crecimiento de hongos de manera tradicional se ha hecho utilizando técnicas formales de diseño de experimentos, las cuales han tenido como meta principal la identificación del crecimiento del hongo a través de modelos lineales que en muchos casos arrojan niveles muy bajos de confiabilidad debido al ruido y a la complejidad observada en los datos obtenidos [2].

Para eliminar varios de los problemas encontrados con los enfoques tradicionales de diseño de experimentos se desarrolló un nuevo método que aquí se presenta para identificar las superficies de respuesta del crecimiento del hongo, método que utiliza conceptos de la inteligencia computacional asociados a métodos numéricos de interpolación y despliegue uniforme de superficies, con conceptos geométricos como las superficies planares y las coordenadas cilíndricas.

Dentro de este contexto, este nuevo enfoque busca comprender el comportamiento del crecimiento del hongo *Pleurotus ostreatus* bajo diferentes valores de acidez (pH) y tiempo (t). Para lograr que el modelo computacional tenga validez, este crecimiento se hizo inicialmente bajo condiciones controladas de Humedad Relativa del sustrato (Hr), mientras que para la Temperatura (T) se utilizó la del medio ambiente.

Las investigaciones realizadas en el campo de la computación evolutiva para solucionar experiencias biológicas han sido pocas, y más en particular en el área de la microbiología industrial, a pesar de que este tipo de computación fue concebida a partir de los métodos exitosos que tiene la naturaleza para la supervivencia de los individuos en un determinado ambiente. En acercamientos con métodos tradicionales se destaca Rowan [14], quien propuso un modelo de crecimiento basado en Dinámica de Sistemas para un hongo sometido a diferentes tipos de contaminantes. Más adelante, Molina [8] propone un modelo de crecimiento para el hongo *Aspergillus parasiticus*, el cual utiliza para su desarrollo el concepto de superficies de respuesta teniendo en cuenta para el crecimiento la cantidad de ácido propionico presente en el sustrato en el cual el hongo es inoculado. Lamour [6], presenta un modelo de simulación del crecimiento de un hongo a partir de una ecuación cúbica que permite establecer relaciones de crecimiento del micelio bajo diferentes cantidades de carbón y nitrógeno presentes en el sustrato de inoculación. En ese mismo año Laercio presentó un modelo matemático que permitía estimar el crecimiento del hongo bajo diferentes dosis de fungicida aplicados a un sustrato [5]. En la literatura disponible son pocos los trabajos que relacionan la computación evolutiva con el crecimiento de hongos. Las primeras investigaciones que vinculan técnicas de inteligencia computacional con el crecimiento de hongos datan del año 1995, cuando Sodell [15], propuso un modelo que permitía simular el crecimiento del micelio en hongos utilizando gramáticas de Lindenmayer. La creación de verdaderos puentes entre la evolución, la computación evolutiva y la microbiología se ha dado de diferentes maneras, tal ha sido el caso del Laboratorio de Investigaciones Navales de la ciudad de Washington, en donde se han hecho desarrollos importantes en el estudio de la evolución de un virus mediante la visualización de la estructura de su genotipo y de las estrategias para su recombinación [1]. Un acercamiento diferente se ha dado en el Reino Unido, en donde se han realizado investigaciones sobre el estudio de los sistemas complejos y su relación entre la computación evolutiva, los lenguajes de programación y la evolución biológica [7].

Igualmente, en el campo de la interpolación de superficies, también son pocos los trabajos conocidos realizados con métodos evolutivos. Para nuestro conocimiento el único desarrollo es el

de Weinert y Mehnen [16] que presentaron un modelo de optimización para la interpolación de superficies, fusionando las superficies NURBS y las estrategias de evolución.

En el nuevo modelo que aquí se presenta, se hace una construcción evolutiva de una superficie a partir de datos obtenidos en diseños de experimentos hechos en laboratorio, para el crecimiento de hongos. La superficie encontrada representa el crecimiento de los hongos estudiados bajo diferentes condiciones ambientales y de sustrato y se consigue optimizando con un Algoritmo Evolutivo el método de NURBS. Sobre dicha superficie se pueden encontrar trayectorias de combinaciones de los parámetros de control que conlleven a un máximo crecimiento del hongo. La navegación sobre esta superficie fue desarrollada a partir de otro algoritmo evolutivo que utiliza operadores cilíndricos.

Para la comprensión de este modelo se describen en la primera parte del artículo algunos conceptos sobre interpolación de superficies y su aplicación industrial. En la segunda parte se hace un recuento de la fusión de la interpolación de superficies con los algoritmos evolutivos y la dependencia de la función de aptitud de una función lagrangiana, que ayuda a moldear las funciones racionales que ayudan a la obtención de las superficies de respuesta. En la tercera parte se hace una descripción del despliegue uniforme de superficies y su exploración mediante la utilización de un algoritmo cilíndrico evolutivo que determina la emulación del crecimiento del hongo, para finalmente presentar una serie de resultados que validan el modelo computacional propuesto anteriormente.

2. Interpolación de Curvas y Superficies con NURBS (Forma Tradicional)

Se presenta a continuación un resumen de la interpolación de curvas y superficies. Una descripción más detallada de este tipo de interpolación se encuentra en [9], [3].

2.1 Superficies y Curvas NURBS (Non Uniform Rational Basis Splines)

Una curva NURBS está definida como en la ecuación (1):

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^m w_i P_i N_{i,p}(u)}{\sum_{i=0}^m w_i N_{i,p}(u)} \quad (1)$$

donde $\{w_i\}$ se denominan pesos, $\{P_i\}$ son los puntos de control de la interpolación, mientras que $\{N_{i,p}(u)\}$ son las funciones básicas B-Splines normalizadas de grado p. Los pesos w_i determinan la influencia del i-th vector de control P, sobre la curva. Las i-th funciones básicas $N_{i,p}(u)$ son definidas sobre un vector de nudos $U = \{u_0, u_1, \dots, u_{m+p+1}\}$ y son recursivamente definidas de según las ecuaciones (2) y (3):

$$N_{i,p}(u) = \frac{u-u_i}{u_{i+p}-u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1}-u}{u_{i+p+1}-u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u) \quad (2)$$

Donde:

$$N_{i,o}(u) = \begin{cases} 1 & \text{if } u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases} \quad (3)$$

El vector de nudos, es un conjunto de números que indica el comienzo y el final de las funciones racionales, en muchos casos las funciones racionales pueden ser de tipo uniforme, por lo que los vectores de nudos pueden catalogarse como periódicos, mientras que si el conjunto de puntos a interpolar no están igualmente espaciados, el vector de nudos se considera no periódico. Para un caso general este vector es no periódico y tiene la forma de la ecuación (4):

$$U = \{\alpha, \dots, \alpha, u_{p+1}, \dots, u_m, \beta, \dots, \beta\} \quad (4)$$

en donde α y β aparecen $(p+1)$ al comienzo como al final. Este arreglo especial garantiza que la función comience y finalice en el primer y último punto de control respectivamente. Para este caso particular los parámetros se definirán en el rango $u \in [0,1]$ y los pesos son los ideales cuando se acercan a la unidad.

Una superficie NURBS esta definida como el tensor producto, en la ecuación (5), así:

$$S(u,v) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n w_{i,j} P_{i,j} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v)}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n w_{i,j} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v)} \quad (5)$$

donde $\{w_{i,j}\}$ son los pesos, $\{P_{i,j}\}$ son los puntos de control o los puntos a interpolar y $\{N_{i,p}(u)\}$, $\{N_{j,q}(v)\}$ son las funciones básicas B-Splines normalizadas definidas sobre los vectores de nudos no periódicos $U = \{0,0,\dots,0,u_{p+1},\dots,u_m,1,1,\dots,1\}$, $V = \{0,0,\dots,0,v_{q+1},\dots,v_n,1,1,\dots,1\}$ respectivamente. Aquí p y q son los grados de las funciones racionales de interpolación en las direcciones u y v .

2.2 Interpolación de Curvas y Superficies con NURBS

Para determinar una curva de interpolación NURBS $\{Q_k\}$ para $(m+1)$ puntos dados, estos sufijos tienen $(m+1)$ condiciones independientes. Asignando un valor \bar{u}_k para cada uno de los puntos a interpolar, y seleccionamos dos vectores nudos como son U y W . Agrupando el problema de interpolación como:

$$Q_k = C \begin{pmatrix} \bar{u}_k \end{pmatrix} = \sum_{i=0}^m P_i R_{i,p}(\bar{u}_k) \quad \text{para } k=0,\dots,m \quad (6)$$

O en forma de matriz:

$$\begin{bmatrix} R_{0,p}(\bar{u}_0) & \dots & R_{m,p}(\bar{u}_0) \\ R_{0,p}(\bar{u}_1) & \dots & R_{m,p}(\bar{u}_1) \\ \dots & \dots & \dots \\ R_{0,p}(\bar{u}_m) & \dots & R_{m,p}(\bar{u}_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ \vdots \\ P_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_0 \\ Q_1 \\ \vdots \\ Q_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

donde las funciones racionales $\{R_{i,p}(u)\}$ están definidas por la ecuación (8).

$$R_{i,p}(u) = \frac{w_i N_{i,p}(u)}{\sum_{i=0}^m w_i N_{i,p}(u)} \quad (8)$$

Para el caso de las superficies el vector de nudos para las direcciones u y v estarán determinados por un arreglo $(m+1) \times (n+1)$ de puntos $\{Q_{k,l}\}$ a interpolar con $k = 0, \dots, m$ y $l = 0, \dots, n$. La interpolación de una superficie a partir de un arreglo de puntos dados se puede representar mediante la ecuación (9).

$$\begin{aligned} Q_{k,l} &= \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n P_{i,j} R_{i,p}(\bar{u}_k) R_{j,q}(\bar{v}_l) = \sum_{j=0}^n \left[\sum_{i=0}^m P_{i,j} R_{i,p}(\bar{u}_k) \right] R_{j,q}(\bar{v}_l) \\ &= \sum_{j=0}^n C_j(\bar{u}_k) R_{j,q}(\bar{v}_l) \end{aligned} \quad (9)$$

3. Método de Interpolación Evolutivo

Los métodos convencionales de parametrización en muchos casos son inadecuados para generar superficies NURBS libres, que sigan un comportamiento del casco convexo que forman los puntos de interpolación, por esto una nueva aproximación para la interpolación es establecida como: Los valores de los parámetros para cada punto de interpolación es tomado como el valor máximo de cada función racional generada aleatoriamente [10].

El razonamiento para esta parametrización es explicada heurísticamente como sigue: Si se agrupa la evaluación de los parámetros frente a las funciones racionales, se obtiene una matriz con elementos dominantes en la diagonal principal. Por esto, al tomar los parámetros del vector de nudos como el punto donde se encuentra el máximo de estas funciones racionales se obtiene la matriz inversa de R con elementos dominantes en la diagonal principal, lo que asegura, que no se obtengan curvaturas erradas generando la mejor curva de interpolación [10].

3.1 Generación de las Funciones Racionales

Uno de las partes más importantes de la ecuación 9 es la conformación de las funciones racionales $R(u)$, conformación que está ligada directamente al individuo a evolucionar dentro del algoritmo evolutivo de interpolación.

La función racional base esta conformada por 7 puntos, donde cada punto está conformado por dos coordenadas (u_i, y_i) , ver Figura 1, donde los valores de u_i están dados por las fórmulas tradicionales de partición de los ejes, mientras que los valores de y_i están ubicados dentro del individuo evolutivo. Para el caso particular anterior de 7 puntos el individuo estará conformado como se muestra en la Figura 2 [10].

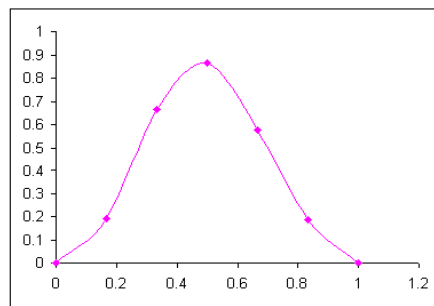


Figura 1. Conformación de las Funciones Racionales Base R(u)

y_0	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Figura 2. Estructura del Individuo para la conformación de las funciones racionales R(u)

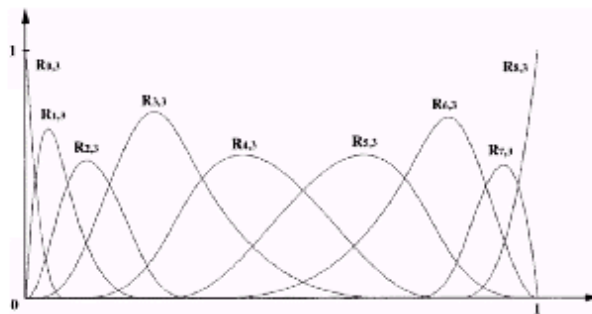


Figura 3. Funciones Racionales de Orden 3 para la interpolación de nueve puntos de control¹

¹ Tomado de Jung, H.B., Kim K. A New Parameterization Method for NURBS Surface Interpolation, Advanced Manufacturing Technology, Springer Verlag, London, 2001.

La línea que une los puntos que conforman las funciones racionales estará dada por un polinomio de orden n (Para la función racional de la Figura 1, $n = 7$). Para el caso de polinomios de unión de menor grado se pueden establecer funciones polinómicas por tramos. Es de anotar que los nudos estarán ubicados en lo extremos de la función racional, mientras que el punto a interpolar se encontrará exactamente encima del punto central, los demás puntos son resultado de una partición uniforme de las funciones racionales derivadas de la conformación de las funciones racionales. Para un conjunto de nueve puntos a interpolar las funciones racionales pueden tomar la forma de la figura 3.

El número de puntos totales para la conformación de las funciones racionales de la totalidad de los n puntos de interpolación, esta dado por la ecuación (10):

$$(n + 1) * 7 - 12 \quad (10)$$

3.2 Algoritmo Evolutivo de Interpolación

Para comenzar con la interpolación de superficie, es necesario tener en cuenta los siguientes puntos [4], [5]:

1. Generar una partición adecuada para el vector de nudos que determinan el comienzo y final de cada una de las funciones racionales.
2. Generar una población inicial de individuos en donde cada uno de los genes representará cada uno de los puntos que conforman las funciones racionales mencionadas en el apartado 3.1 [2].

Con la definición de la población inicial aplicamos lo operadores evolutivos como son:

1. El *Operador de Selección de Ruleta* escoge para la siguiente generación el mejor individuo de la población.
2. El *Operador de Recombinación*, en donde el mejor individuo participa en todos los cruzamientos.
3. El *Operador de Mutación* utiliza una estrategia de evolución en donde un gen se escoge de manera aleatoria. A cada gen seleccionado para la mutación se le suma y se le resta un número aleatorio mientras que la función de aptitud de cada uno de los individuos mejore.

3.3 Función de Aptitud del Algoritmo de Interpolación

Para la evaluación de los individuos se sigue el siguiente procedimiento [11], [12]:

1. Para cada individuo construir sus funciones racionales y determinar la ecuación de cada una de ellas para obtener la Matriz R .
2. Hallamos la distancia euclidiana entre los puntos dato y los puntos generados por la matriz R de interpolación (el vector de nudo y sus particiones secundarias serán estáticas durante el proceso de evolución). De acuerdo con lo anterior la función de aptitud para este caso estará dado por la ecuación (11).

$$D = \sqrt{\sum_{j=0}^m (P_j - Q_j)^2} \quad (11)$$

Donde:

D : Indica la distancia euclidiana entre los datos punto y los puntos generados por la matriz R . Para evitar obtener funciones de interpolación erradas o desbordamiento de las funciones racionales entre punto y punto, es necesario incluir dentro de la función de aptitud una parte que limite el crecimiento de las funciones racionales. Este limitador está dado así:

1. Se evalúan las particiones principales y secundarias propuestas para la construcción de las funciones racionales frente a las matrices de interpolación.
2. Se selecciona una serie de funciones de Lagrange que interpolen los puntos principales de las superficies por el sentido de cada una de las variables.
3. Se evalúan los puntos secundarios frente al polinomio de interpolación de Lagrange y se calcula la diferencia entre los valores dados por las matrices de interpolación y los valores dados por la evaluación frente al polinomio de Lagrange obteniéndose el valor L .

De esta manera la función de aptitud para cada uno de los individuos de la población, estará dado por la ecuación 12 [13]:

$$FA : \frac{1}{\alpha D + \beta L} \quad (12)$$

Donde:

FA : Valor de Función de Aptitud.

L : Error de Lagrange.

α, β : Factores de Ponderación (valores que permiten que los valores L, D tengan el mismo orden de magnitud).

El valor para el cálculo del error de Lagrange esta dado por:

$$L_i(x) = \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j} \quad (13)$$

x_0, x_1, x_2 : Corresponden a los valores parámetros sobre los cuales se encuentran los puntos que conforman la malla a interpolar.

x : Corresponde a un valor libre igualmente espaciado dentro de los puntos considerados anteriormente.

n : Número de particiones propuestas.

4. Emulación Evolutiva para el Crecimiento

Para la emulación del crecimiento del hongo utilizando un algoritmo evolutivo se utilizan los mismos conceptos que definieron los parámetros para los operadores del algoritmo evolutivo de interpolación, como son: la ruleta y el operador de recombinación.

Debido a la concepción del operador de selección y cruzamiento dentro del algoritmo se logra la identificación y cruce de información entre individuos de la población, mientras que la exploración de la superficie la realiza el operador de mutación mediante la utilización de un concepto geométrico como las coordenadas cilíndricas [13].

Para lograr la emulación evolutiva del crecimiento del hongo es necesario generar una serie de puntos dentro de la superficie de respuesta que determine a través de los días un comportamiento siempre creciente del hongo. Para esta primera etapa de generar un crecimiento de tipo no evolutivo, no se tomó en cuenta ningún criterio para la ganancia en el crecimiento del hongo, ni los valores permitidos para la modificación de los valores de las variables independientes, lo que hizo que en muchos casos el crecimiento del hongo no se asemejará al crecimiento real exhibido por el hongo [13].

A partir del proceso no evolutivo, se identificó un crecimiento sub-óptimo para el hongo y a partir de aquí se tomó el valor de los días (t) y el valor de pH (acidez del sustrato) para cada día, de acuerdo con esto el algoritmo evolutivo propuesto para la emulación fijó la tira de valores que contenía los valores de los días y fue modificando los valores de la otra variable (en esta caso pH) de modo que existiese entre día y día un crecimiento acotado y una variación moderada de los parámetros independientes [13].

4.1 Operador de Mutación Cilíndrico Evolutivo

El operador de mutación es el encargado de identificar las zonas de la superficie de crecimiento donde el hongo tiene un crecimiento gradual y siempre creciente, con la menor variación de pH. Para este caso se generó una serie de posiciones a mutar dentro de la totalidad de genes de los individuos a evolucionar y se utilizó el concepto de coordenadas cilíndricas para identificar las mejores vecindades para el gen seleccionado para la mutación, estas mejores vecindades están determinadas por un crecimiento mayor al crecimiento considerado para el punto a mutar [13], [11].

Según esta estrategia de mutación se seleccionará el gen anterior al gen seleccionado para la mutación, gen que llamaremos en este caso punto central y que estará representado por las coordenadas:

X_c : Día central para la mutación. Y_c : pH central para la mutación.

Con estas coordenadas se calcula un crecimiento, llamado F_c . Las posiciones que fueron seleccionadas para la mutación están denotadas así:

X_a : Día a cambiar durante la mutación. Y_a : pH a cambiar durante la mutación.

Para estas coordenadas también se calcula el valor de crecimiento particular denotado como F .

Para la mutación se tomará el punto central y se tendrá en cuenta un sector de arco de aproximadamente 90° con una variación de 15° alrededor del punto central como se muestra en las siguientes fórmulas.

$$\varphi = 0.2617993 * i, \quad x_2 = x_c + r * \cos(\varphi), \quad y_2 = y_c + r * \sin(\varphi) \quad (14)$$

Donde:

x_2 : Representa el nuevo punto para las coordenadas días.

y_2 : Representa el nuevo punto para las coordenadas pH.

φ : Angulo de variación o variación permitida para las variables independientes.

$r = \frac{1}{NP}$: Indica el máximo avance en cada uno de los días o radio del sector circular.

NP : Número de particiones de la superficies de respuesta obtenida.

i : Valor aleatorio para la variación de ángulo del sector circular, este valor está acotado en el intervalo [-3,3], donde 0.261793 es aproximadamente 15° en radianes.

Para este punto particular también se evaluará el valor de crecimiento, y se denotará F_2 . De acuerdo con esto si el crecimiento F_2 supera como mínimo el $(1/NP)\% * CF$ el crecimiento del hongo, los valores de las coordenadas X_a , Y_a son modificados en el algoritmo por los valores de X_2, Y_2 respectivamente dentro del algoritmo.

De esta manera y de acuerdo con los valores de aptitud se asegura que el crecimiento del hongo se hará de manera gradual y siempre creciente de acuerdo con el sustrato y las variaciones que pueda sufrir el mismo en sus condiciones de pH [12].

5. Validación de Resultados

El modelo evolutivo desarrollado para la construcción de superficies se aplicó al cultivo del hongo *Pleurotus ostreatus* y se verificaron sus resultados con los obtenidos en el laboratorio. Dado que no se conocen trabajos de emulación del crecimiento de este hongo comestible y medicinal, el modelo evolutivo propuesto fue confrontado con el modelo propuesto en [8], el cual evalúa los efectos combinados de la temperatura y el contenido de ácido propiónico en el sustrato del crecimiento del hongo *Aspergillus parasiticus*. Para el modelo propuesto en [8] se tomó como metodología la construcción de superficies de respuesta por técnicas tradicionales de diseño de experimentos, superficies que permiten establecer de alguna manera el control del crecimiento del hongo. La siembra, al igual que en el modelo propuesto, se hizo utilizando concentraciones variables del ácido, medido en partes por millón para obtener diferentes valores de acidez en el sustrato. En el modelo que aquí se propone, considera 9 puntos de control en el tiempo, lo que no difiere con el modelo propuesto en [12] para 9 días de observación, con la ventaja que se puede disponer de diferentes horizontes en el tiempo de experimentación.

Si observamos la Figura 4, se puede ver la simulación realizada en [8] para el crecimiento bajo diferentes concentraciones de ácido, así como el control para el crecimiento resultante en el nuevo modelo propuesto.

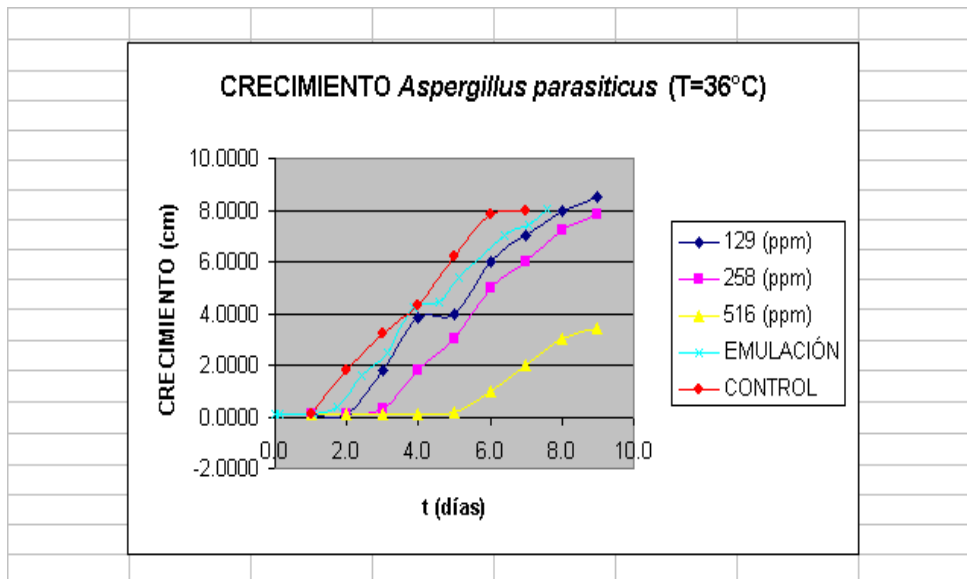


Figura 4. Crecimiento Aspergillus parasiticus para una Temperatura de 36°C

En la Figura 4 la segunda curva de arriba hacia abajo es la curva obtenida por el modelo evolutivo de emulación, lo que indica un crecimiento bastante cercano frente a los resultados obtenidos en laboratorio en comparación con los logrados en [8].

Este mayor crecimiento se dio en el modelo [8] básicamente por la posibilidad de variar los parámetros de crecimiento del experimento, mientras que en el modelo evolutivo propuesto se emula el crecimiento del hongo conservando las condiciones de experimentación. Adicionalmente, por la navegación sobre la superficie de respuesta, con el modelo evolutivo propuesto se logran identificar zonas de la superficie de respuesta donde se encuentran los puntos máximos de crecimiento del hongo a través de los días. Esta información permite determinar crecimientos óptimos con menores variaciones de los valores de acidez del sustrato, con base en una exploración evolutiva de la superficie a partir de las relaciones lineales identificadas entre las variables involucradas en el modelo, y particularmente en las superficies de respuesta obtenidas.

Para la aplicación del modelo en el crecimiento del hongo comestible y medicinal *Pleurotus ostreatus*, es necesario pasar por el análisis de dos etapas fundamentales del modelo como son:

1. Interpolación Evolutiva de la Superficie.
2. Emulación Evolutiva para el Crecimiento del Hongo.

Para la interpolación evolutiva de superficie se tomó el crecimiento más exitoso logrado en sustrato PDA (Papa, Destroza y Agar). La Figura 5 muestra la línea azul que pertenece a un borde de la superficie de datos punto, mientras que la línea roja indica la línea de interpolación para los mismos datos [11].

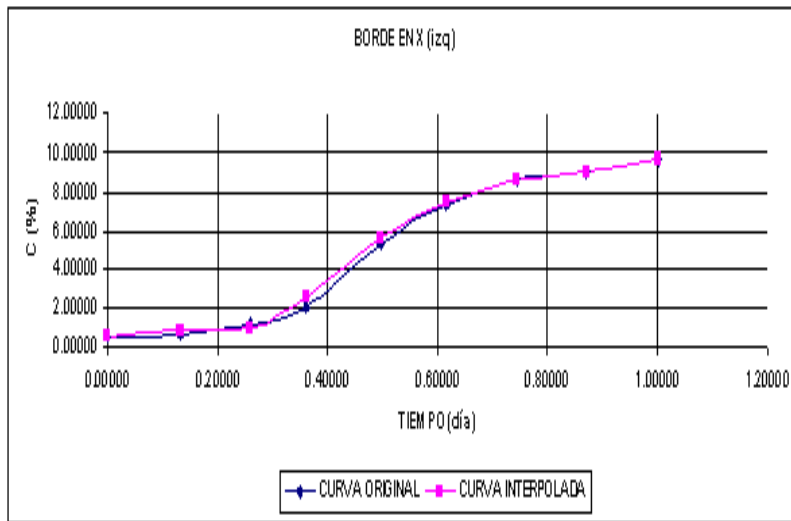


Figura 5. Línea que indica el criterio de terminación para la Interpolación Evolutiva

Para determinar la magnitud de la interpolación es necesario mostrar una vista superior de la superficie para observar los contornos de los crecimientos que indican la forma en la cual se hizo la interpolación.

Los resultados numéricos obtenidos para este sustrato en particular fueron los siguientes:

1. Número de Iteraciones: 150.
2. Aptitud del Individuo: 51.23.
3. Desfase de la Malla Interpolada: 1.95 cm. (81 puntos).
4. Porcentaje de Confiabilidad: 99.76%.

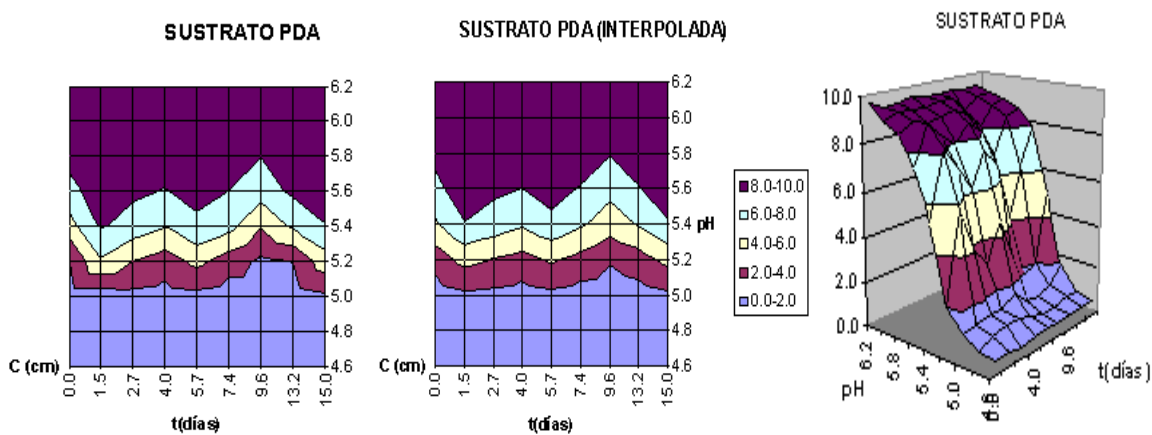


Figura 6. Vista Superior de la Superficie de Datos Punto, y la Superficie Interpolada

Para lograr una emulación que refleje de manera real el crecimiento del hongo, la superficie de respuesta tuvo que ser triangulada de manera uniforme, de modo que la confiabilidad lineal de la superficie triangulada con respecto a la superficie analítica de respuesta fue [12]:

1. Para 81 puntos: 87.84%
2. Para 324 puntos: 82.16%
3. Para 6556: 96.61%.

La validación del modelo de emulación evolutiva se logró identificando los valores de pH comunes a cada uno de los crecimientos encontrados por el método evolutivo y luego realizando nuevamente una experimentación en el laboratorio sobre estos valores de pH que arrojaron un crecimiento exitoso. Para el análisis de los datos se contabilizó un desfase para cada sustrato en cada uno de los días del crecimiento del hongo, para luego calcular un desfase promedio y un valor de varianza punto a punto para toda la etapa del crecimiento del hongo considerada en este modelo [12].

Tabla 1 Comparación Crecimiento Evolutivo vs. Crecimiento de Validación, Sustrato PDA

PDA						
Día	pH	C (cm)(EE)	C (cm)(V)	DIF.	MEDIA	VARIANZA
0.00	4.93	0.54	0.65	0.12	0.09960853	0.34845489
0.65	5.71	0.65	0.73	0.08		
1.72	5.50	0.71	0.74	0.03	DESFASE TOTAL	
2.79	5.70	0.94	0.82	-0.11	3.54	
3.95	5.34	1.24	1.17	-0.07		
5.58	5.81	2.90	2.84	-0.06	% DESFASE	
6.84	5.16	5.72	5.17	-0.55	0.99608528	
7.91	5.87	6.53	6.36	-0.17		
9.86	5.12	6.92	8.66	1.74		
11.84	4.90	6.77	7.12	0.35		
13.21	5.30	9.43	9.18	-0.26		

Para este tipo de sustrato el crecimiento presenta un desfase total de 3.54 cm en todos los puntos considerados para el crecimiento del hongo. La media del desfase con respecto a un diámetro total de 10 cm fue de 0.099cm, 10 cm fue la medida patrón para el crecimiento del hongo. La desviación estándar de los datos se ubicó alrededor de 0.34845 cm, con respecto a la media.

6. Conclusiones

La interpolación evolutiva de un conjunto de datos punto obtenidos en el laboratorio para el crecimiento del hongo tipo *Pleurotus ostreatus* utilizando NURBS Evolutivos, presentó una muy buena aproximación punto a punto. Aunque esta aproximación presentó algunos problemas de desbordamiento de los datos, esta situación se debió principalmente al crecimiento desmedido de algunas funciones racionales entre cada uno de los datos punto [10], [12]. La construcción de la superficie comenzaba a desestabilizarse en la generación 150, por lo que fue necesario vincular a la función de aptitud un Interpolador de Lagrange con resultados satisfactorios.

La emulación del crecimiento del hongo utilizando un método no evolutivo presentó demasiadas deficiencias en cuanto a la representación real del crecimiento, debido a que muchos

de los valores emulados no tenían una continuidad relativa entre los valores de los parámetros independientes (t, pH) [12]. La construcción evolutiva de la superficie facilitó el agrupamiento de puntos intermedios entre los puntos resultantes de la interpolación, enmarcados por la emulación del crecimiento del hongo.

La navegación sobre la superficie de respuesta utilizando un algoritmo evolutivo con operadores cilíndricos, presentó valores de crecimiento moderados con respecto al cambio moderado en los valores que tomaron los parámetros independientes, lo que hizo que la ganancia para el crecimiento real del hongo fuera mucho más gradual [13] y manejable desde el punto de vista de la replicación en el laboratorio.

El trabajo futuro se encamina hacia la optimización de los parámetros de control del modelo propuesto, como la prueba de otros métodos de selección, criterios de terminación, relajación de la función de aptitud, entre otras.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Profesor Luis Fernando Cardona Urrea, vinculado al Laboratorio de Microbiología Industrial de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, por su valiosa colaboración en el trabajo de campo.

Referencias

- [1] Annie. S W. “An Evolutionary Computation Model for Studying Viral Evolution”. Naval Research Laboratory, GECCO Memory, Orlando, Florida, Pag 24, 1.999.
- [2] Correa, A. “Diseño y Análisis de Experimentos para el Crecimiento del Hongo *Pleurotus ostreatus*”. Universidad Nacional de Colombia, Curso de Diseño de Experimentos, Medellín, 2.001.
- [3] Hoscheck J., Lasser D. “Fundamentals of Computer Aided Geometric Design”. A. K. Peters, 1.993.
- [4] Jung H.B., Kim K. “A new Parameterization for NURBS Surface Interpolation”. Int Journal on Adv. Manufacturing . Technol, 16:784-790, 2.000.
- [5] Laercio, L. Ghint R. “A Mathematical Model for Fungal Population Growth and The Fungicide Resistance Problem”. UNICAMP, Department of Applied Mathematics, Brazil, 2.002.
- [6] Lamour, A. et al. “Growth of sil-borne fungi in response to carbon and nitrogen – a modelling approach”. Department of Phytopathology, Wageningen Agricultural University, 2.002.
- [7] Marrow, P. “Evolvability: Evolution, Computation, Biology”. Naval Research Laboratory, GECCO Memory, Orlando, Florida, Pag 24, 1.999.
- [8] Molina, M. Giannuzzi, L. “Combined effect of temperature and propionic acid concentration on the growth of *Aspergillus parasiticus*”. Cátedra de Tecnología y Química Legal, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de la Plata. La Plata, Argentina, 1.999.

- [9] Piegl L., Tiller W. "The NURBS Book". Springer Verlag, Berlin, 1995.
- [10] Peña P. A., Hernández J. A. "Construcción y Exploración de Paisajes Artificiales con Geometría Vectorial Evolutiva". CIIC 2.001, Universidad Nacional de Colombia. Agosto, 2.001. 150 págs.
- [11] Peña, P. A., Hernández J.A. "Interpolación Evolutiva de Superficies de Respuesta". EITI 2.001. Universidad Nacional de Colombia. Septiembre 2.001.
- [12] Peña P. A. "Emulación del Crecimiento de Pleorotus ostreatus con Computación Evolutiva". Tesis de Maestría (M.Sc.), Universidad Nacional de Colombia. 2.002. 150 págs.
- [13] Peña P. A., Hernández J. A. "Emulación del Crecimiento de Hongos Comestibles y Medicinales utilizando Algoritmos Evolutivos con Operadores Evolutivos de Tipo Cilíndrico". Universidad Nacional de Colombia. 2.002. 120 págs.
- [14] Rowan, Neil. Et al. "Prediction of Toxigenic Fungal Growth in Buildings by Using a Novel Modelling System". Departament of Bioscience and Biotechnology and Department of Mechanical Engineering. University of Strathclyde Glasgow, Scotland., 1.999.
- [15] Soddell, F. et al. "Using Lindenmayer systems to investigate how filamentous fungi may produce round colonies". La Trobe university, Bendigo, Australia. The Journal of Visualizarion and Computer Animation, vol.6, 91-107, 1.995.
- [16] Weinert, K. Meneen , J. "Discrete NURBS Surface Approximation using an Evolutionary Strategy". Department of Machining Technology, University of Dortmund, Germany, 2000.