



Original

Modelo matemático para la propagación de *T. Gondii* en relación con mujeres gestantes en la ciudad de Neiva

Mathematical model for the propagation of *T. Gondii* in relation to pregnant women in the city of Neiva

Jesús David Falla Arango¹; Jesús Mauricio Roa Polania²

1. Bioestadístico, Universidad Surcolombiana, Neiva - Huila.

2. Matemático, Universidad Surcolombiana, Neiva - Huila.

Resumen

El *Toxoplasma gondii* es el causante de la Toxoplasmosis, una de las parasitosis más frecuentes en el mundo. En Colombia la Toxoplasmosis congénita es una infección de muy alta prevalencia, se considera que la mitad de la población colombiana ha tenido contacto con este parásito.²⁵ Igualmente, en la ciudad de Neiva la prevalencia de esta enfermedad es alta (55,4% para IgG y 10,4% para IgM) comparada con otras ciudades de Colombia, pese a esto, no es considerada como un problema de salud pública, de aquí, el porqué de este estudio.

Se revisaron algunos modelos matemáticos existentes sobre Toxoplasmosis y se determinó que el más adecuado para trabajar estuviera relacionado con gatos y transporte por agua, dado que el estudio estadístico que se realizó a la par con el del modelo matemático, arrojó que tener gatos ($p=0,003$, $OR=9,100$) y tomar agua de llave ($p=0,000$; $OR= 4,149$) eran los factores de riesgo con mayor relación a adquirir la enfermedad en la ciudad de Neiva.

El modelo matemático utilizado se presenta mediante un sistema en ecuaciones diferenciales parciales que modela la propagación del parásito a través del agua y de los gatos. Es una adaptación de un modelo epidemiológico clásico tipo SIR al que se le ha agregado dispersión de *T. gondii* y, adicionalmente, un término advectivo que representa el transporte por agua del parásito. Se usó la solución numérica de la ecuación (1) para presentar los respectivos resultados de las simulaciones.

Abstract

Toxoplasma gondii is Toxoplasmosis cause, one of the most frequent parasitosis in the world. In Colombia, congenital Toxoplasmosis is an infection of very high prevalence, it is considered that half of Colombia's population has been exposed to this parasite. Similarly, in the city of Neiva the prevalence of this disease is high (55.4% for IgG and 10.4% for IgM) compared to other cities in Colombia, although this is not considered as a public health problem, hence the reason for this study.

Some existing mathematical models on Toxoplasmosis have been reviewed and it was determined that the most suitable for the treatment related to cats and water transport, given that the statistical study was carried out on a par with the mathematical model, showed the cats that have ($p = 0.003$, $OR = 9,100$) and drinking tap water ($p = 0.000$; $OR = 4,149$) were the risk factors with the greatest relationship with the disease in the city of Neiva.

The mathematical model used had a system in partial differential equations that models the propagation of the parasite through water and cats. It is an adaptation of a classic epidemiological model type SIR to which it can add dispersion of *T. gondii* and, additionally, an advective term that represents the transport by water of the parasite. The numerical solution of equation (1) was used to present the results of the simulations.

Palabras Clave

Toxoplasmosis, Difusión-Advección, Modelo matemático, Simulación, Toxoplasmosis congénita.

Keywords

Toxoplasmosis, Advection-diffusion, Mathematical Modeling, Simulation, Congenital Toxoplasmosis.

Correspondencia: Jesús Mauricio Roa Polania. Dirección: Calle 5 # 27 - 47, Neiva-Huila (Colombia). Tel.: + 57 3102863195. E-mail: mauricio.roa@outlook.com

INTRODUCCIÓN

La toxoplasmosis es una enfermedad propagada en todo el mundo, es considerada una zoonosis, cuyo agente etiológico es el parásito *Toxoplasma gondii*, esta puede ser adquirida de varias maneras, a través del consumo de agua contaminada con ooquistes excretados en las heces del gato (hospedero definitivo del parásito), los cuales pueden durar hasta aproximadamente 18 meses en suelo húmedo aún con posibilidad de infectar o reinfectar a algún otro gato¹, o a través de quistes tisulares en carne mal cocida; aunque también se ha asociado la infección con otros factores, como el contacto con perros, cerdos y el consumo de huevos, leche, y vegetales crudos.^{2,3}

Cuando este parásito es adquirido por primera vez en el embarazo, sobre todo en el primer trimestre, puede llegar a ser devastador para el feto. De los niños que se infectan con *Toxoplasma* durante su vida gestacional, 5 a 15% mueren, 8 a 10% tienen lesiones cerebrales y oculares severas, 10 a 13% presentarán daño visual moderado a severo y 58 a 72% son clínicamente normales al nacimiento, pero una proporción importante de ellos desarrollan posteriormente coriorretinitis o retraso mental.^{4,6}

En Colombia se han realizado varios estudios sobre la prevalencia de la toxoplasmosis adquirida durante el embarazo, según el Instituto Nacional de Salud en 1983 la prevalencia de esta parasitosis fue de 47,1% para la población en general.⁷ De acuerdo con otros estudios llevados a cabo en diferentes lugares del país, cada año aparecen de 2 a 10 por cada 1.000 recién nacidos con toxoplasmosis congénita.^{8,9} La toxoplasmosis congénita no es considerada un problema de salud pública. Al no ser de notificación obligatoria, las secretarías de salud departamentales del Estado en la actualidad no tienen un programa de control de la enfermedad, incidiendo en que esta enfermedad se propague a otras poblaciones vulnerables, como es el caso de aquellos pacientes inmunosuprimidos, en donde la Toxoplasmosis cerebral es la causa más frecuente de lesiones cerebrales focales en los pacientes con infección por VIH.¹⁰

En los últimos años se ha evidenciado que la toxoplasmosis es una enfermedad transmitida por el agua, en Victoria (Canadá) se asoció un aumento repentino de diagnósticos serológicos de la toxoplasmosis en el área metropolitana relacionados con el agua potable municipal,¹¹ de otro lado en Santa Isabel do Ivaí, Brasil, se relacionó un brote de toxoplasmosis, que involucró

155 personas, con un reservorio de agua subterránea no filtrada, implicando que el transporte por agua tiene más importancia de la que se creía.¹² Además, los ooquistes del parásito pueden sobrevivir hasta 54 meses en el agua fría, por lo que beber agua sin filtrar puede conducir a la infección por *T. gondii*.¹³

La creación de modelos matemáticos es una de las técnicas utilizadas hoy en día en medicina, biología, fisiología, bioquímica, epidemiología, entre otras áreas del conocimiento para describir, explicar y predecir fenómenos o enfermedades infecciosas, idear programas efectivos de control e interpretar patrones epidemiológicos,¹⁴ ya que se revelan las relaciones que no son obvias a primera vista, hacen posible extraer propiedades y características de las relaciones entre los elementos que lo conforman. Una gran parte de los problemas de enfermedades infecciosas del mundo real es que no es factible experimentar con la realidad, ya que puede ser muy costoso, peligroso, inmoral o incluso imposible. Por lo tanto, es razonable intentar superar este obstáculo con la construcción de un modelo que explique de manera apropiada las características básicas de la epidemia y así poder pronosticar las consecuencias de introducir cambios específicos. La función principal de un modelo para una enfermedad infecciosa consiste en proveer un medio que posibilita entender la dispersión de una enfermedad infecciosa a través de una población bajo diferentes escenarios.¹⁴

Se estudiaron los modelos matemáticos propuestos hasta la fecha para el comportamiento de la propagación del parásito *T. gondii*.^{1, 15-19} Con base a los resultados de los factores de riesgo con mayor relación a contraer esta enfermedad se decidió trabajar el modelo propuesto por Duarte.¹ Este modelo matemático describe la propagación de *Toxoplasma gondii* a través de felinos, donde se incluye, además del mecanismo de transporte por dispersión a través de presas, el transporte del parásito a través del agua, simulando el hipotético caso de que un felino infectado deposite formas infectantes en el suelo o agua y estas sean transportadas a través del agua, por la lluvia y/o los ríos, de forma independiente con los demás mecanismos de transmisión. Además, se añade una constante de proporcionalidad para observar el comportamiento de las gestantes que pueden adquirir esta enfermedad en función de la variación de los gatos infectados que pueden infectar a estas gestantes. Se usó la solución numérica de la ecuación (1) y se aplicó a este estudio con campos de velocidades reales de algunos ríos de la ciudad de Neiva.

METODOLOGÍA

La metodología que se siguió para el análisis estadístico y matemático es la siguiente:

Análisis Estadístico

Se realizó un estudio retrospectivo de corte transversal para conocer la prevalencia de anticuerpos IgG e IgM en mujeres embarazadas que asistieron al centro de salud Carmen Emilia Ospina de la ciudad de Neiva durante el periodo de enero de 2013 a febrero de 2014. Este ente de salud había realizado a 1152 mujeres la prueba de IgM anti *T. gondii*, de las cuales 1082 estaban embarazadas. De las que estaban embarazadas 835 resultaron negativas para IgM, 134 mujeres salieron dudosas y 113 tenían Toxoplasmosis. Por otro lado, a 913 mujeres se les realizó la prueba de IgG anti *T. gondii*, de las cuales 846 estaban embarazadas. De las que estaban embarazadas 375 resultaron negativas para IgG, 2 mujeres salieron dudosas y 469 tenían Toxoplasmosis. Se calculó una muestra probabilística, aleatoria simple teniendo en cuenta los siguientes aspectos: tamaño de la población 1082 gestantes con prueba de IgM, dado que esta es la que determina si la gestante ha tenido contacto recientemente con el parásito, es decir, que la gestante definitivamente tiene la enfermedad; el error esperado del 5% y nivel de confianza de 95%.

Se aplicó una encuesta telefónica para recoger información acerca de los factores de riesgo que inciden directamente en la aparición de la toxoplasmosis, y para conocer algunas variables sociodemográficas que en un momento dado pueden contribuir indirectamente en la aparición de esta parasitosis. La encuesta registro: datos personales, ocupación, barrio, estrato, pertenencia de mascotas, contacto y convivencia de gatos, convivencia con animales silvestres y roedores, costumbres alimenticias, preparación de alimentos, alimentos fuera de la casa, preparación de bebidas, origen del agua que consumen, y consumo de agua de ríos o quebradas, realización de actividades de jardinería sin protección y tipo de piso de la vivienda, durante el embarazo.

Se analizó la Base de Datos suministrada por la E.S.E. Carmen Emilia Ospina de la ciudad de Neiva. Para este análisis, se utilizaron las variables obtenidas en la encuesta, luego los datos se relacionaron en forma individual y en relación con la infección. Primero se determinaron las frecuencias absolutas y relativas de cada una de las variables y luego se relacionaron con la presencia de infección por medio de pruebas esta-

dísticas: χ^2 y Odds Ratio (O.R.), con I.C. del 95% utilizando el programa SPSS versión 21.

Modelo Matemático

El modelo matemático a utilizar se presenta mediante un sistema en ecuaciones diferenciales parciales que modela la propagación del parásito a través de agua y gatos, es una adaptación de un modelo epidemiológico clásico tipo SIR al que se le ha agregado dispersión de *T. gondii* y, adicionalmente, un término advectivo que representa el transporte por agua del parásito y se presenta a continuación:

Para $S = S(x, y, t)$, $I = I(x, y, t)$, $R = R(x, y, t)$ y $P = P(x, y, t)$, $(x, y) \in \Omega \subset \mathbb{R}^2$, Ω un dominio acotado, $t \in J = (0, T]$,

$$\begin{aligned} \partial S / \partial t &= \gamma(S + I + R) - (\lambda(P) + \mu)S, \\ \partial I / \partial t &= \lambda(P)S - (\mu + \eta)I, \\ \partial R / \partial t &= \eta I - \mu R, \\ \partial P / \partial t &= \beta I - \theta P + D \Delta P - V \cdot \nabla P \end{aligned} \quad (1)$$

con $P(x, y, 0) = P_0$, $S(x, y, 0) = S_0$, $I(x, y, 0) = I_0$, $R(x, y, 0) = R_0$. La frontera es considerada con dos condiciones: Geográficamente, algún obstáculo impide el paso de parásitos en una de las partes, que llamamos Γ_1 ; en la otra parte, que llamamos Γ_2 , el paso de parásitos es linealmente proporcional a la propia población. Así tenemos, respectivamente, condiciones de Von Neumann y Robin homogéneas:

$$\begin{aligned} \partial P / \partial \eta |_{\Gamma_1} &= 0 & -D (\partial P / \partial \eta) |_{\Gamma_2} &= \kappa P |_{\Gamma_1} \\ \Gamma_1 \cup \Gamma_2 &= \partial \Omega & \Gamma_1 \cap \Gamma_2 &= \emptyset \end{aligned}$$

con κ una constante de proporcionalidad, positiva.

El modelo considera los siguientes supuestos:

1. Tasas de natalidad y mortalidad naturales para la población de felinos.
2. No se consideran tasas de migración de felinos.
3. La transmisión es indirecta,²⁰ se da por contacto adquirido (consumo de agua, presas o carnes infectadas) entre la concentración del parásito *T. gondii* y los felinos susceptibles.



4. El modelo describe la posibilidad de que un felino se infecte, como lineal a partir de un umbral mínimo, y constante, igual a 1, cuando la población sobrepasa una cota superior.
5. El tiempo transcurrido entre el consumo del parásito y la expulsión del ooquiste al suelo no se tiene en cuenta.
6. La infección no induce muerte en los hospederos.
7. Las concentraciones del parásito y de la población del hospedero son variables en el espacio y en el tiempo.
8. No se tiene en cuenta la forma infectante del parásito.
9. Los gatos infectados, por medio de sus excrementos, contribuyen a la tasa de incremento del parásito en el medio ambiente.
10. Se considera una tasa de decaimiento natural del patógeno.¹
11. Se tiene en cuenta la inmunidad natural de los gatos, adquirida cuando el gato se infecta.¹

El modelo considera la población de gatos dividida en susceptibles $S = S(x, y, t)$, infectados $I = I(x, y, t)$ y recuperados o inmunes $R = R(x, y, t)$, y la población de parásitos $P = P(x, y, t)$, en el punto (x, y) , con x, y , medidos en kilómetros, y el tiempo t , medido en días.

Los parámetros usados en el modelo son:

γ : Tasa de natalidad de felinos.

μ : Tasa de mortalidad de felinos.

$1/\eta$: Período de infecciosidad.

β : Número de parásitos que excreta un felino infeccioso al medio, por día.

θ : Decaimiento natural del parásito.

D : Coeficiente de dispersión del parásito ($\text{km}^2/\text{día}$).

$\lambda(P)$ es la medida de la transmisión eficiente del parásito al felino susceptible, de modo que es la proporción de felinos susceptibles que se infectan al ingerir parásitos. Como no se tiene en cuenta la forma infectante del parásito (bradizoíto, ooquiste tisular, ooquiste y taquizoíto), se considera una distribución uniforme, es decir, la probabilidad de que un felino se infecte está dada por la función uniforme:

$$\lambda(P) = \begin{cases} 0, & \text{si } P < P_{\min} \\ \frac{(P - P_{\min})}{(P_{\max} - P_{\min})}, & \text{si } P_{\min} \leq P \leq P_{\max} \\ 1, & \text{si } P > P_{\max} \end{cases}$$

Donde P_{\min} es la cantidad de parásitos que debe ingerir un felino susceptible para que haya infección y P_{\max} es tal que, por encima de ésta cantidad, hay infección segura. Esta función es una aproximación de la logística con la ventaja algorítmica de que es lineal o constante (0 ó 1).

Así, $1/\lambda(P)$ es el período promedio del estado susceptible del felino, $1/\mu$ es el promedio de vida de los felinos, $1/\beta$ es el tiempo promedio de excreción de ooquistes de un felino infectado y $1/\theta$ es el período de vida del parásito en el suelo.

Se considera que el tiempo de vida promedio de un felino es de 12 años,²¹ es decir, cada año nace/muere un felino de cada 12, y dado que se toma en el modelo los días como unidad de tiempo, la tasa de natalidad/mortalidad está dada por $\gamma = 1/(12*365) = 0,00022$.²² En poblaciones constantes la tasa de natalidad y mortalidad es la misma,²² como nuestra población no es constante, se pondrá una tasa de natalidad y muerte diferentes.

V denota un campo vectorial de velocidades, que representa el fenómeno del transporte a través del agua, de los parásitos.

RESULTADOS

Los resultados del estudio estadístico y matemático se presentan a continuación.

Estadísticos

Del análisis realizado a las 1082 gestantes que se aplicaron la prueba para determinar anticuerpos IgM en la E.S.E. Carmen Emilia Ospina de Neiva, se encontró que la prevalencia para este anticuerpo específico fue del 10,4%, y para las 846 mujeres embarazadas a quienes se les realizó la prueba de IgG en este mismo centro de salud, arrojó una prevalencia del 55,4%.

Las 126 gestantes encuestadas, tenían edades comprendidas entre los 14 y 43 años con un promedio de 24 años y una DS de 6,7. Se observó un mayor porcentaje de madres entre 20 y 34 años que correspondían al 64,7% de las encuestadas y un porcentaje menor de madres adolescentes y gestantes añosas con 26,7% y 8,6% respectivamente. Gran proporción de las muje-

res procedían de la zona urbana de Neiva (94%), el 47,4% pertenecían al estrato 1 y el 50% al estrato 2. El 53,4% eran amas de casa. Las gestantes entre los 14 y 19 años presentaron una relación de riesgo significativa en contraer la enfermedad ($p=0,006$; $OR=3,3$) y por el contrario las gestantes entre 20 y 29 años presentaron una relación favorable en no contraerla ($p=0,009$; $OR=0,3$).

Los resultados de las pruebas de asociación entre factores de riesgo y variables sociodemográficas con positividad para toxoplasmosis de la población objeto de estudio se encontró que el tener gatos ($p=0,013$; $OR=2,9$), frecuentar zonas rurales ($p=0,001$; $OR=4,4$) y consumir agua de la llave ($p=0,000$; $OR=4,1$). Análogamente, se encontró un factor protector que era tomar agua filtrada ($p=0,001$; $OR=0,4$).

Matemáticos

Los resultados se presentan como simulaciones realizadas con el paquete matemático MATLAB 8.3.

Los valores de los parámetros usados en la simulación de (1) son:

- Tasa de natalidad de felinos $\gamma = 0,00022$
- Tasa de mortalidad de felinos $\mu = 0,0002$
- Tasa de recuperación de felinos infectados $\eta = 0,1$
- Número de parásitos que excreta un felino infeccioso al medio por día $\beta = 10$ (en unidades de millón)
- Decaimiento natural del parásito $\theta = 0,05$
- Coeficiente de dispersión del parásito ($\text{km}^2/\text{día}$) $D = 5 * 10^{-2} * 0,0864$
- Constante de proporcionalidad de gestantes $k = 29/11$

La cantidad de parásitos mínima que debe consumir un gato susceptible para infectarse es de $P_{min} = 10.000$ y por encima de $P_{max} = 1'000.000$ hay infección segura.¹ El estudio estadístico realizado a la par con el estudio matemático mostró que aunque no habían demasiadas gestantes con toxoplasmosis que tuvieran gatos, si hubo una relación significativa en tenerlos y que tuvieran o no la enfermedad ($p = 0.003$, $OR = 9.100$, I.C. 1.998 - 41,445), además se encontró que por cada 29 gestantes infectadas habían 11 gatos con la enfermedad, es decir, la relación gestantes infectadas-gatos

infectados es 29:11, por tanto la variación de gestantes infectadas estar en función de una constante de proporcionalidad $k = 29/11$. Se simuló el comportamiento de los gatos susceptibles, infectados y recuperados en una malla de $n_x = 49$ y $n_y = 23$ (véase la figura 1) al cabo de 100 días, tiempo suficiente para que esta infección tienda a un equilibrio numérico.²²

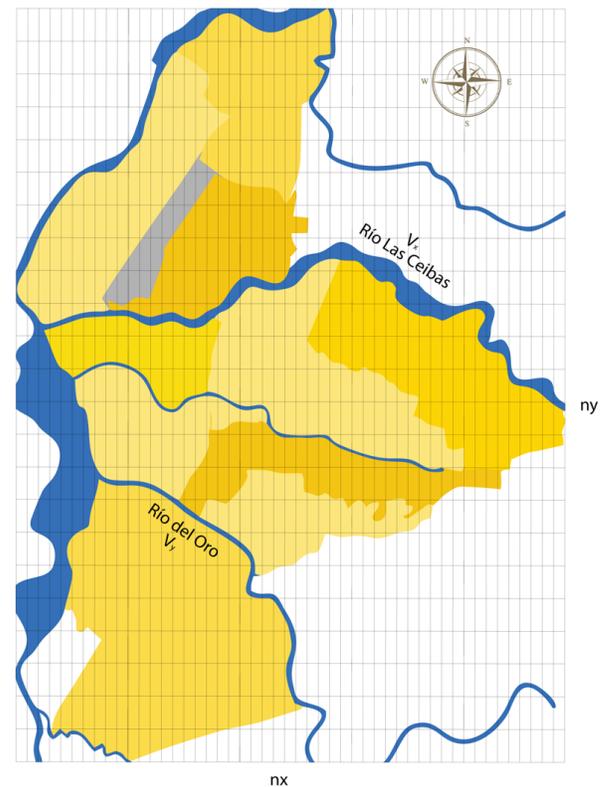


Figura 1. Mapa de Neiva discretizado

Inicialmente, en cada nodo del dominio discretizado (malla), hay 10 gatos susceptibles, cero recuperados y cero parásitos, solo en un nodo de esta va a estar ubicado un gato infectado. De igual manera se simuló el comportamiento para las gestantes susceptibles, infectadas y recuperadas en la misma malla de $n_x = 49$ y $n_y = 23$ al cabo de 100 días. Inicialmente, en cada nodo de la malla, hay cero gestantes infectadas, 20 gestantes susceptibles, cero recuperadas y cero parásitos.

Las figuras 3 a 5 muestran el comportamiento de la población con un campo de velocidades reales, donde una de ellas es determinada por la corriente del río Las Ceibas (Hallada con información de las Empresas Públicas de Neiva), que permite observar la propagación de la enfermedad en dirección de este (Oriente-Occidente).

Dado que el modelo tomado para trabajar es el mencionado por duarte,¹ las indicaciones siguientes de los

resultados de la simulación son las mismas. La figura 3 presenta el campo de velocidades, indicando el lugar donde se coloca el gato infectado inicial (GI) y otro punto de referencia (S), este punto de referencia permite hacer una comparación de la evolución de la infección en puntos “cerca” y “lejos” del inoculo, es escogido de modo que el parásito, por efecto de la difusión y el campo de velocidades del agua, alcance a llegar hasta allí, dentro de las 100 iteraciones. La figura 4 representa el comportamiento de la población después de 100 iteraciones y muestra una escala que va desde el color azul, que no representa ningún riesgo, hasta el rojo, que denota el máximo riesgo (véase la figura 2), correspondiente al campo de la figura 3.

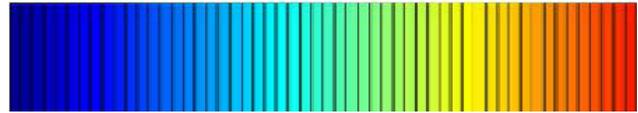


Figura 2. Escala de mapas de riesgo.

La figura 5 representa el comportamiento a través del tiempo, de la población de susceptibles e infectados en los puntos donde está el gato infectado inicial y en el punto de referencia.

El campo de velocidades mostrado en la figura 3 tiene velocidades $V_x = -0,0605$ km/día (Velocidad promedio Río Las Ceibas) y $V_y = 0$ km/día.

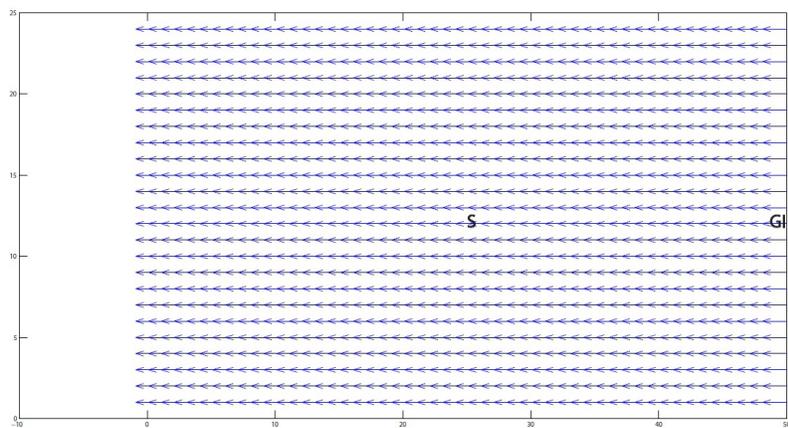


Figura 3. Campo de velocidades con dirección negativa en x y cero en y , GI indica el lugar donde se coloca el único felino infectado inicialmente y S es un punto de referencia.

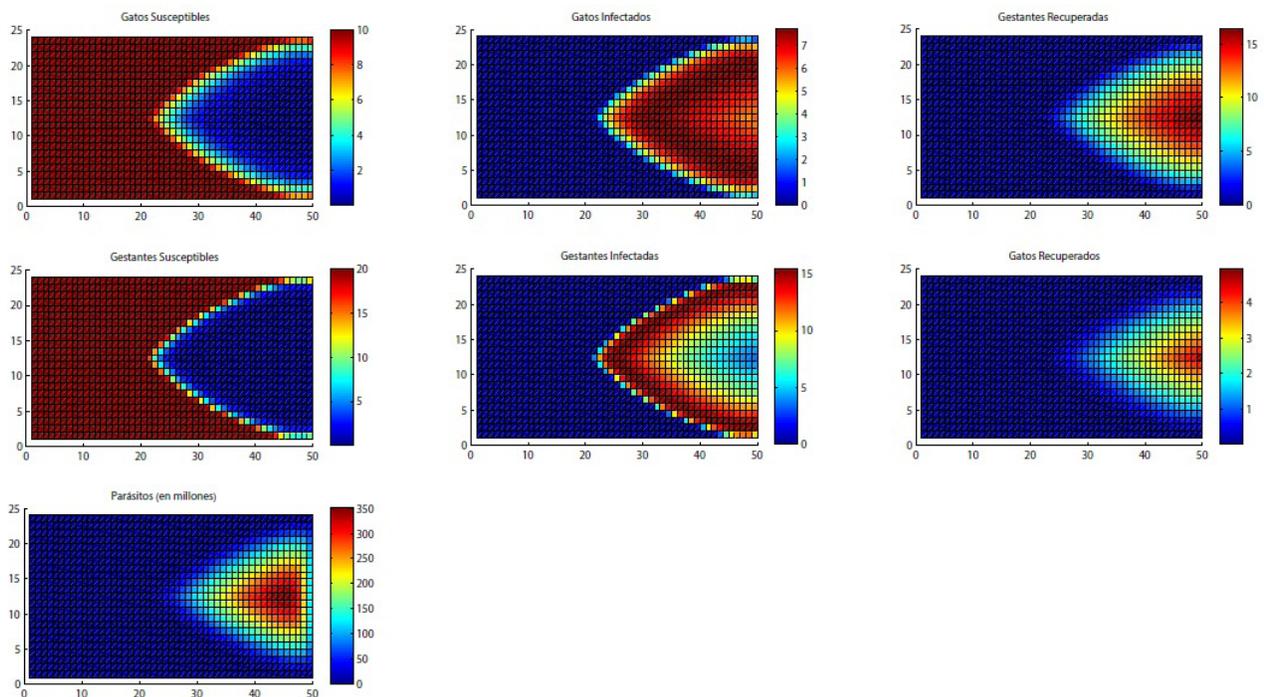


Figura 4. Comportamiento de las poblaciones, correspondiente al campo de velocidades de la figura 3, después de 100 iteraciones.

Correspondientemente, la figura 4 muestra el aumento de las poblaciones del oriente al occidente de la ciudad.

La figura 5 muestra que las dos poblaciones tienden a equilibrarse al cabo de las 100 iteraciones, observándose también el crecimiento de la población de Gatos

infectados y Gestantes infectadas en un poco más de 80 días y la diferencia entre la rapidez de variación de la población de gestantes susceptibles, infectadas y recuperadas, y la variación de la población de los gatos susceptibles, infectados y recuperados al cabo de estos días, esto por la adición de la constante de proporcionalidad para las gestantes.

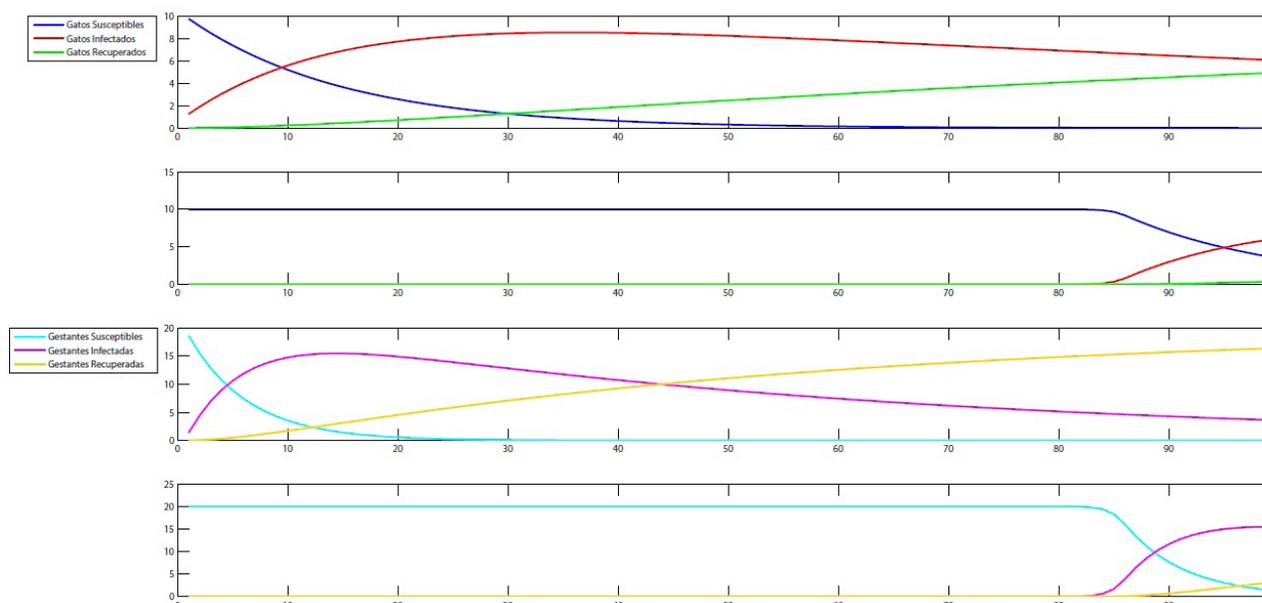


Figura 5. Comportamiento de las poblaciones de felinos susceptibles e infectados a través del tiempo, cuando el campo de velocidades es del tipo de la figura 3: En el lugar del inoculo **GI** (Primer y tercera fila de arriba a abajo) en el medio de la frontera oriente de Neiva y en el lugar **S** centro de la ciudad (Segunda y cuarta fila de arriba a abajo).

DISCUSIÓN

Estos resultados demuestran que la prevalencia en mujeres embarazadas de la E.S.E. Carmen Emilia Ospina de Neiva, Colombia es de 55,4% para IgG y de 10,4% para IgM, durante el periodo de estudio, lo que indica una alta exposición y circulación de este parásito en la ciudad de Neiva. La seropositividad del IgG muestra que la población de gestantes que asistieron a este centro de salud, en algún momento de su vida tuvieron contacto con el parásito, además, refleja que un 44,6% de mujeres embarazadas son susceptibles de contraer la infección. Estos resultados son similares a los encontrados en otros lugares de Colombia, de acuerdo al Estudio Nacional de Salud la prevalencia es de 53%,⁷ Empresas Sociales del estado (ESEs) de Villavicencio 55,2%,²³ Hospital Eduardo Arredondo Daza de Valledupar 58%,²⁴ IPS de Sincelejo 56%,²⁵ que contrastan con una mayor prevalencia en mujeres de otros estudios colombianos, como el que se realizaron en la Secretaria de Salud de Armenia 63%,⁹ Seguro Social del Quindío 60%;²⁶ mientras que en otros estudios

colombianos se han encontrado tasas de seropositividad más bajas, como la del Instituto Materno Infantil de Bogotá 47%²⁷ y el laboratorio CEIMLAB S.A.S de Cúcuta 31,1%.²⁸ Estas tasas dependen de cada lugar del estudio, ya que puede variar de acuerdo con las condiciones climáticas, que permiten o no la viabilidad de los ooquistes, costumbres culturales y factores humanos.

Aunque el presente estudio se trabajó con una muestra de las gestantes que asistieron al centro de salud y no toda la población, al asociar la presencia de títulos positivos de IgM con las variables estudiadas, se hallaron como factores de riesgo para adquirir la infección el contacto con gatos, que aumenta la probabilidad en 2,9 veces de contraer toxoplasmosis; siendo este un factor predisponente encontrado en otros estudios, también se asoció tomar agua de la llave, probablemente sea el hallazgo más sorprendente de este estudio, confirmando lo encontrado en Santa Isabel do Ivaí (Brasil)¹² y Victoria (Canadá),¹¹ que indica la importancia de la difusión de ooquistes de *T. gondii* en agua de distribu-

ción para consumo por acueducto y en Francia donde un estudio reveló que 16,6% de las muestras de agua pública contenían ooquistes de *Toxoplasma*.²⁹

Durante este trabajo hemos estudiado el comportamiento de una enfermedad a nivel epidemiológico y haciendo uso del modelo matemático propuesto originalmente por Duarte,¹ para analizar la evolución de la parasitosis en las mujeres gestantes de Neiva. El modelo aplicado muestra buenos resultados en términos de la descripción de la dinámica de la propagación de *T. gondii*, las simulaciones numéricas se realizan en diferentes escenarios, presentando la manera en la que la infección se expande basados en algunas situaciones existentes que podrían suceder en la vida real, permitiendo confirmar el hecho de que un solo gato infectado en la ciudad de Neiva puede difundir el parásito *T. gondii* a sitios cercanos donde no estaba presente. Los resultados de la simulación muestran que aproximadamente de 76 a 87 días esta infección puede propagarse en la mitad de la población de gatos en Neiva (Figura 5), teniendo la posibilidad de dispersar la infección a un gran número de personas y en especial a mujeres embarazadas, quienes en este estudio se les comprobó que tomar agua de la llave era un factor de riesgo para adquirir la infección. Además, permite predecir los lugares hacia los que el parásito se desplazará por medio del transporte por agua, ya sea mediante aguas lluvias o por el río las Ceibas, que suministra el agua potable para el consumo de los ciudadanos. Por lo tanto, la aplicación de los modelos matemáticos a través de las simulaciones de casos hipotéticos, resultan efectivos para la toma de decisiones y así evitar la propagación, ya que ayudan a determinar que decisión es la más apropiada según el escenario en el que nos encontremos, por ejemplo, si hay control de natalidad de gatos, implementándose una posible campaña de vacunación de los gatos susceptibles de Neiva, haría que se reduzca claramente la población de *T. gondii*, impidiendo la infección y dispersión del mismo.

Infortunadamente el estudio presentó limitaciones que son el no alcanzar acceder a toda la población de las gestantes que asistieron a la E.S.E. Carmen Emilia Ospina para determinar los factores de riesgo y encontrar posibles nuevos otros mecanismos de transmisión, también se presentaron obstáculos para calcular la verdadera tasa de natalidad y mortalidad de los gatos de Neiva, obteniendo con esto mejores simulaciones que se ajusten más a la realidad de la ciudad y así contribuir al avance en el conocimiento de la infección por *T. gondii*.

Finalmente, es importante sugerir que, para futuras líneas de investigación en este estudio, proponemos la adición de elementos como la tasa de natalidad y mortalidad de gatos en la ciudad de Neiva y establecer los factores de riesgo con toda la población de mujeres embarazadas para estudiar la evolución de la enfermedad toxoplasmosis en la población Neivana.

En términos de la infección, se concluye que para ayudar a prevenir la propagación del *T. gondii* deben implementarse medidas de control como las acciones de higiene, programas educativos respecto a los gatos, tales como controlar la población de gatos silvestres en las calles de Neiva, con campañas de vacunación y esterilización. La intervención del agua será una medida de control contundente para evitar la propagación del parásito *T. gondii*, puesto que, si las plantas de tratamiento no filtran este parásito, este se desplazará rápidamente a los hogares neivanos. En relación a las gestantes y mujeres en edad reproductiva, se deberán tener medidas de control y prevención, tales como evitar la manipulación de heces de gato, cocinar bien cualquier tipo de carne, lavar muy bien las frutas y verduras, no consumir agua sin hervir y en lo posible, que el agua que tomen sea filtrada. Todos estos datos proporcionan información necesaria para concientizarlos de la necesidad de tomar medidas de control, tanto con los gatos como del consumo de agua mal tratada.

AGRADECIMIENTOS

Nos gustaría que estas líneas sirvieran para expresar nuestro más profundo y sincero agradecimiento al centro de salud ESE Carmen Emilia Ospina por su colaboración en el suministro de los datos necesarios de las mujeres gestantes que asistían al control prenatal, para la realización de la parte estadística de esta investigación.

REFERENCIAS

1. Duarte I. Un modelo difusión-Advección para la propagación de *Toxoplasma gondii*. *Rev Investig - Univ Quindío*. 2012;23(2):36-49.
2. López-Castillo CA, Díaz-Ramírez J, Gómez JE. Factores de riesgo en mujeres embarazadas, infectadas por *Toxoplasma gondii* en Armenia-Colombia. *Rev Salud Pública*. 2005;7:180-90.
3. Díaz Suárez O, Parra AM, Arajo Fernandez M. Seroepidemiología de la Toxoplasmosis en una Comunidad Marginal del Municipio Maracaibo,



- Estado Zulia, Venezuela. *Invest Clin.* 2001;42:107–22.
4. Alford CA, Stagno S, Reynolds DW. Congenital toxoplasmosis: Clinical, laboratory, and therapeutic considerations with special reference to subclinical disease. *Bull NY Acad Med.* 1974;50(2):160–81.
 5. Desmots G, Forestier F, Thulliez PH, Daffos F, Capella-Pavlovsky M, Chartier M. Prenatal diagnosis of congenital toxoplasmosis. *Lancet. Elsevier;* 1985;325(8427):500–4.
 6. Wilson CB, Remington JS, Stagno S, Reynolds DW. Development of adverse sequelae in children born with subclinical congenital *Toxoplasma* infection. *Pediatrics* [Internet]. 1980;66(5):767–74. Available from: <http://europepmc.org/abstract/MED/7432882>
 7. Juliao O, Corredor A, Moreno GS. Estudio Nacional de Salud: Toxoplasmosis en Colombia, Ministerio de Salud. Imprenta Inst Nac Salud. 1988;
 8. Gómez JE, Castaño JC, Montoya MT. Toxoplasmosis congénita en Colombia: un problema subestimado de salud pública. *Colomb Med.* 1995;26:66–70.
 9. Gómez JE, Montoya MT, J.C. C, Rios MP, Perez JC. Epidemiología de la infección por *Toxoplasma gondii* en gestantes de Armenia (Quindío). *Colomb Med.* 1993;24:14–8.
 10. J.E. G. Diagnóstico de la toxoplasmosis humana: nuevos conceptos y técnicas. *Med lab.* 2000;9(3/4):167–85.
 11. Isaac-Renton J, Bowie WR, King A, Irwin GS, Ong CS, Fung CP, et al. Detection of *Toxoplasma gondii* Oocysts in Drinking Water. *Appl Environ Microbiol* [Internet]. 1998;64(6):2278–80. Available from: <http://aem.asm.org/content/64/6/2278.abstract>
 12. de Moura L, Baahia-Oliveira LMG, Wada MY, Jones JL, Tuboi SH, Carmo EH, et al. Waterborne outbreak of toxoplasmosis, Brazil, from field to gene. *Emerg Infect Dis.* 2006;12:326–9.
 13. Dubey JP, Choudhary S, Tilahun G, Tiao N, Gebreyes WA, Zou X, et al. Genetic diversity of *Toxoplasma gondii* isolates from Ethiopian feral cats. *Vet Parasitol.* Elsevier; 2013;196(1):206–8.
 14. Montesinos-López OA, Hernández-Suárez CM. Modelos matemáticos para enfermedades infecciosas. *Salud Publica Mex* [Internet]. scielomx; 2007;49(3):218–26. Available from: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0036-36342007000300007&nrm=iso
 15. Trejos D, Duarte I. Un modelo matemática de la propagación de toxoplasma *Gondii* (Nicolle y Manceaux,1909), através de gatos. *Actual Biol.* 2005;27(83):143–9.
 16. Ocampo L, Duarte I. Modelo para la dinámica de transmisión de la toxoplasmosis congénita. *Rev Salud Pública.* 2010;12(2):317–26.
 17. Aranda DF, Villanueva RJ, Arenas AJ, González-Parrá GC. Mathematical modeling of Toxoplasmosis disease in varying size populations. *Comput Math with Appl.* Elsevier; 2008;56(3):690–6.
 18. Sullivan A, Agosto F, Bewick S, Su C, Lenhart S, Zhao X. A mathematical model for within-host *Toxoplasma gondii* invasion dynamics. *Math Biosci Eng.* 2012;9(3):647–62.
 19. Ye Liu YP, Li C. Dynamic study of mathematical models on antibiotics and immunologic adjuvant against Toxoplasmosis. *Wseas Trans Math.* 2012;11:1018–27.
 20. Anderson R, May RM. Infectious diseases of humans. Vol. 1. Oxford University Press; 1991.
 21. Bouza LG. Cuantos años vivira nuestro gato [Internet]. *El Mundo del Gato*; 2014. Available from: [\url{http://www.elmundodelgato.com/noticia/492/Felicultura/Cuantos-anos-vivira-nuestro-gato.html}](http://www.elmundodelgato.com/noticia/492/Felicultura/Cuantos-anos-vivira-nuestro-gato.html)
 22. de Pereda Sebastián D, Ivorra B, Ramos AM. Modelización matemática de la difusión de una epidemia de peste porcina entre granjas. *Proy fin Máster en Investig matemática.* 2010;
 23. Castro AT, Góngora A, González ME. Seroprevalencia de anticuerpos a *Toxoplasma gondii* en mujeres embarazadas de Villavicencio, Colombia. *Rev Orinoquia.* 2008;12(1):91–100.
 24. Torres JJ. Prevalencia de infección por *Toxoplasma gondii* en mujeres embarazadas, en Valledupar, Cesar. *Rev Colomb Microbiol Trop.* 2013;3(1):32–3.



25. Manrique E, Machado N, Blanco P. Alta tasa de seroconversión para toxoplasma en gestantes de Sincelejo, Sucre. *Infectio*. 2004;8:263–7.
26. Gómez JE, de Londoño MT, Castaño-Osorio JC. A maternal screening program for congenital toxoplasmosis in Quindio, Colombia and application of mathematical models to estimate incidences using age-stratified data. *Am J Trop Med Hyg*. 1997;57:180–6.
27. Barrera AM, Castiblanco P, Gómez JE. Toxoplasmosis adquirida durante el embarazo, en el Instituto Materno Infantil de Bogotá. *Rev Salud Pública*. 2002;4(3):286–93.
28. Cárdenas D, Lozano C, Castillo Z, Cedeño J, Galvis V, Rios J, et al. Frecuencia de anticuerpos anti *Toxoplasma gondii* en gestantes de Cúcuta, Colombia. *Rev Medica Hered*. 2016;26(4):230–7.
29. Villena I, Aubert D, Gomis P, Ferté H, Inglard JC, Denis-Bisiaux H, et al. Evaluation of a strategy for *Toxoplasma gondii* oocyst detection in water. *Appl Environ Microbiol*. *Am Soc Microbiol*; 2004;70(7):4035–9.