

Simulación del nivel de eliminación de sarampión y rubéola según la estratificación e interacción social

Simulating measles and rubella elimination levels according to social stratification and interaction

Doracelly Hincapié-Palacio¹, Juan Ospina-Giraldo², Rubén D. Gómez-Arias¹, Anthony Uyi-Afuwape³ y Gerardo Chowell-Puente⁴

1 Facultad Nacional de Salud Pública, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. doracely@guajiros.udea.edu.co; rdgomez@guajiros.udea.edu.co

2 Escuela de Ciencias y Humanidades, Universidad EAFIT. Medellín, Colombia. jospina@eafit.edu.co

3 Departamento de Matemática, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. aafuwape@matematicas.udea.edu.co

4 Mathematical Computational and Modeling Sciences Center, Arizona State University. Tempe, Arizona, EEUU. gchowell@asu.edu

Recibido 6 Junio 2009/Enviado para Modificación 16 Enero 2010/Aceptado 2 Febrero 2010

RESUMEN

Objetivo Comparar el nivel de eliminación de enfermedades como sarampión y rubéola en población homogénea y heterogénea según la existencia de estratos sociales con interacción entre individuos de estrato social alto y bajo y diversidad en el número promedio de contactos entre ellos.

Métodos Simulaciones del ritmo reproductivo efectivo, derivado de un modelo matemático tipo SIR (Susceptibles Infectados Recuperados), según diferentes ritmos de inmunidad. Se utilizaron datos de incidencia de sarampión (1980 y 2005) y rubéola (1998 y 2005) de América Latina y el Caribe. Se analizó la interacción entre individuos del estrato social alto y bajo con diferente número promedio de contactos mediante análisis de red aleatoria bipartita. Las simulaciones se ejecutaron en MAPLE 12 (Maplesoft Inc, Ontario Canada).

Resultados En la población socialmente homogénea se reprodujo el avance en la eliminación de ambas enfermedades entre los dos períodos de tiempo. En el estrato alto y bajo, se lograría la eliminación en sarampión (2005) pero en rubéola (2005) sólo se lograría si hay alto ritmo de inmunidad en el estrato bajo. Si varía el número promedio de contactos habituales, no se lograría la eliminación de rubéola ni con un ritmo de inmunidad de 95 %.

Conclusión El seguimiento del nivel de eliminación de enfermedades como sarampión y rubéola demanda la consideración de la situación socioeconómica y del patrón de interacción de la población. Especial atención se debe prestar a comunidades con diversidad en el número promedio de contactos en espacios confinados como comunidades desplazadas, carcelarias, educativas, hospitalarias, etc.

Palabras Clave: Simulación por computadora, número básico de reproducción, sarampión, rubéola, factores socioeconómicos (*fuentes: DeCS, BIREME*).

ABSTRACT

Objective The study was aimed at comparing measles and rubella disease elimination levels in a homogeneous and heterogeneous population according to socio-economic status with interactions amongst low- and high-income individuals and diversity in the average number of contacts amongst them.

Methods Effective reproductive rate simulations were deduced from a susceptible-infected-recovered (SIR) mathematical model according to different immunisation rates using measles (1980 and 2005) and rubella (1998 and 2005) incidence data from Latin-America and the Caribbean. Low- and high-income individuals' social interaction and their average number of contacts were analysed by bipartite random network analysis. MAPLE 12 (Maplesoft Inc, Ontario Canada) software was used for making the simulations.

Results The progress made in eliminating both diseases between both periods of time was reproduced in the socially-homogeneous population. Measles (2005) would be eliminated in high- and low-income groups; however, it would only be achieved in rubella (2005) if there were a high immunity rate amongst the low-income group. If the average number of contacts were varied, then rubella would not be eliminated, even with a 95 % immunity rate.

Conclusion Monitoring the elimination level in diseases like measles and rubella requires that socio-economic status be considered as well as the population's interaction pattern. Special attention should be paid to communities having diversity in their average number of contacts occurring in confined spaces such as displaced communities, prisons, educational establishments, or hospitals.

Key Words: Computer simulation, theoretical model, basic reproduction number, measles, rubella, socio economic status (*source: MeSH, NLM*).

En la teoría de la eliminación de enfermedades inmuno prevenibles, se ha identificado la necesidad de considerar la heterogeneidad en la dinámica de la transmisión de las enfermedades según género, edad, raza, estrato socio económico, entre otros (1), aunque se han reconocido las limitaciones computacionales en el manejo de modelos con múltiples parámetros (2,3).

En este trabajo se simula el avance en la eliminación de enfermedades como sarampión y rubéola en América Latina y el Caribe cuando en la población hay dos estratos socioeconómicos bajo y alto y cuando hay diferencias en el número promedio de contactos habituales entre los individuos del mismo estrato social o de otro estrato. Se construyó un algoritmo de álgebra de computadora en MAPLE Version 12 (Maplesoft Inc, Waterloo, Ontario Canada) (4) soportado en los datos publicados para la región sobre sarampión (1980 y 2005) y rubéola (1998 y 2005) (5,6).

En América Latina y el Caribe se tienen importantes avances en la eliminación de éstas enfermedades tal vez a partir de la propuesta eliminación de sarampión para el año 2000 y de rubéola y rubéola congénita en 2010 (7,8). Con respecto a sarampión, es notoria la reducción del número anual de casos, pasando de cerca de 250 000 casos en 1980 a 85 casos en 2005. Sin embargo, se han presentado epidemias en 1997 en Brasil y en 2001-2002 en Venezuela y Colombia, considerada como la última zona de transmisión endémica de la enfermedad. Entre 2003 y 2006 se han reportado brotes en la región relacionados con casos importados de otros países (5).

En cuanto a rubéola, el camino es más tortuoso, en contraste con la vacunación contra sarampión que se inició en los años 70, la vacunación masiva para rubéola sólo se promovió en la segunda mitad de los años 90. Desde entonces, la incidencia de rubéola ha disminuido de 135 000 casos notificados en 1998 a 5 296 en 2005. Entre 2006 y 2008 se reportó una epidemia con más de 18 000 casos confirmados de rubéola y 25 casos confirmados de rubéola congénita, en países como Brasil, Chile, Argentina, Perú, entre otros (5,9).

Sin embargo, en una región caracterizada por la inequidad y la disparidad en el acceso a los servicios sociales y de salud, pueden ocultarse diferencias en la dinámica de la transmisión de las enfermedades entre los países y al interior de estos (6). En América, la disparidad en el acceso a inmunización y en la carga global de la enfermedad, han sido documentados (10,11). De acuerdo con la información del Banco Mundial (12), en 2005 la cobertura de vacunación para sarampión en América Latina y el Caribe fue de 84,3 % en el quintil más alto según un índice de bienestar y del 69 % en el quintil más bajo de la población. En Paraguay en 1990-2000 y en Haití- 2000 se observó una cobertura de vacunación contra sarampión del 50 % en el quintil más bajo de la población. Tal cobertura fue menor de 80 % en el quintil más bajo en Bolivia-2003, Colombia- 2005, Guatemala-1998/99 y Nicaragua-2001 (12).

El avance en la eliminación se analiza mediante el denominado "nivel de eliminación", deduciendo el ritmo reproductivo efectivo a partir de un modelo matemático. El ritmo reproductivo básico (R_0), es el número promedio de casos secundarios generados por un caso primario durante su período de infecciosidad, cuando un caso es introducido en una población completamente susceptible (13). Para el caso de enfermedades recurrentes, el ritmo reproductivo efectivo (R), es aplicado en el contexto de una población parcialmente susceptible, como es analizado en este trabajo. Asumiendo mezcla homogénea, R está relacionado con R_0 por la fórmula $R=(1-p)R_0$, donde p es la fracción de la población efectivamente protegida.

En este trabajo se ilustra la forma de estimación del ritmo reproductivo efectivo, con las limitaciones de los datos disponibles y con la perspectiva de comprender estos fenómenos y promover la concertación de las decisiones de acuerdo con las condiciones propias de las poblaciones.

MÉTODOS

El ritmo reproductivo efectivo se deduce a partir de un modelo matemático en ecuaciones diferenciales tipo SIR (Susceptibles-Infectados- Recuperados) que describe en el tiempo, el proceso de transmisión de la enfermedad debido al contacto de susceptibles e infectados y el posterior surgimiento de individuos recuperados luego de padecer la enfermedad o luego de la inmunización de los individuos susceptibles (15).

El proceso de transición del estado de susceptible a infectado, ocurre de acuerdo con un ritmo denominado beta (β), el número de individuos susceptibles que adquieren la infección en cada unidad de tiempo. Otras fuerzas a considerar son: el ritmo gamma (γ) o ritmo de recuperación de los individuos infectados en cada unidad de tiempo, el ritmo p de inmunidad de los individuos susceptibles, el ritmo q de pérdida de inmunidad y un cierto ritmo de natalidad y mortalidad denotado mu (μ).

El nivel de eliminación se logra cuando el ritmo reproductivo efectivo es menor de uno ($R < 1$). En un modelo SIR con población homogénea, R es una razón entre dos tasas multiplicada por el tamaño de la población susceptible. Las dos tasas son la tasa o ritmo de infección dividido por la tasa o ritmo de recuperación.

De esta forma, si el ritmo de infección es mayor que el ritmo de recuperación, se tendrá $R > 1$ y entonces se propagará la infección, generando brotes o epidemias de acuerdo con el tamaño de la población susceptible. Por el contrario, si el ritmo de infección es menor que el ritmo de recuperación se tendrá $R < 1$ y la infección no se propagará y el eventual brote se extinguirá. Al lograr el nivel de eliminación, se puede propagar la infección a unos cuantos casos pero no se generan brotes debido ya sea a la reducción del tamaño de la población susceptible o al incremento del ritmo de recuperación por aislamiento, cuarentena, diagnóstico y tratamiento de los individuos infectados o enfermos (14).

En este trabajo se deduce R para tres escenarios:

1. La población es homogénea, esto es, no hay diferenciación por estratos socioeconómicos.

2. La población es socialmente heterogénea, con la existencia de dos estratos: bajo (subíndice 1- bajo ingreso) y alto (subíndice - alto ingreso). El ritmo de infección entre los estratos varía así: el ritmo en el que el individuo infectado del estrato bajo le transmite la infección a los individuos del mismo estrato $\beta_{1,1}$ es mayor que la infección transmitida por un individuo del estrato bajo al estrato alto $\beta_{2,1}$ y a su vez este es mayor que el ritmo en el que el individuo de estrato alto le transmite la infección al individuo de estrato bajo $\beta_{1,2}$ y finalmente, es menor el ritmo de infección entre individuos de estrato alto $\beta_{2,2}$. También hay diferencias en los ritmos de adquisición de inmunidad natural o artificial del estrato bajo p_1 y alto p_2 y de los ritmos de pérdida de inmunidad del estrato bajo q_1 y alto q_2 .

3. Además de la heterogeneidad por la existencia de dos estratos sociales alto y bajo, varía el número promedio de contactos habituales de los individuos. Esto se describe mediante una red aleatoria bipartita, es decir, cada individuo de un estrato social tiene diferente número de contactos con individuos del mismo estrato y del otro estrato. En otros términos, la variable aleatoria k , representa el número de posibles contactos (o conexiones) de cada individuo (también denominado "nodo"). Partiendo de la existencia de este entramado de redes sociales, se estima la probabilidad $P_{i,j,k}$ que alguno de los contactos sea con un individuo infectado ($Y_{j,k}(t)$) de un determinado estrato social. Esta probabilidad se denota θ , la cual es dada en términos de la distribución de probabilidad del número de contactos κ y el promedio de contactos según la siguiente expresión (16):

$$\theta_{i,j} = \frac{\sum_{\kappa=0}^{\infty} \kappa P_{i,j,\kappa} Y_{j,\kappa}(t)}{\sum_{\kappa=0}^{\infty} \kappa P_{i,j,\kappa}}$$

Se utilizó el paquete Graphtheory en Maple 12 (Maplesoft Inc, Waterloo, Ontario Canadá) para construir una red de contactos aleatorios a partir de los cuales se generaron muestras aleatorias para el número de contactos habituales de individuos *dentro* del estrato social con su respectiva densidad de probabilidad, media y varianza con $n=100$. Igualmente se simula una red aleatoria para el número promedio de contactos habituales de individuos *entre* diferentes estratos sociales, con $n=100$.

La deducción de R para estos tres escenarios se realiza mediante un algoritmo de análisis de estabilidad local del sistema de ecuaciones diferenciales (17). Los modelos y el análisis de estabilidad no se presentan en este trabajo por limitaciones de espacio, pero pueden solicitarse a los autores.

Se ilustra el logro del nivel de eliminación mediante la simulación de R para cada escenario y diferentes ritmos de inmunidad por estrato, con datos de sarampión (1980 y 2005) y rubéola (1998 y 2005) en América Latina y el Caribe (5,6), mediante un algoritmo en Maple 12 (Maplesoft Inc, Waterloo, Ontario Canadá).

Los valores de los parámetros se presentan en el Anexo 1. El ritmo de infección global β es el número de nuevos casos de sarampión o rubéola, dividido por la población susceptible y multiplicado por uno, al asumirse la ocurrencia de la transmisión de la enfermedad por un único caso. El valor del β global se asume similar al dato de la incidencia global de la enfermedad para cada período. El ritmo de infección específico por estrato, se asume según la relación explicada antes con $\beta_{1,1} > \beta_{2,1} > \beta_{1,2} > \beta_{2,2}$, a partir del β global.

Se asumen valores constantes para los ritmos de recuperación y de pérdida de inmunidad que mejor reproducen el patrón epidemiológico de sarampión y rubéola de América.

RESULTADOS

Modelo SIR con población homogénea

Para rubéola en 1998 y sarampión en 1980, el ritmo reproductivo efectivo es mayor de uno, aún con la inmunización de 95 personas por cada 100 susceptibles por año; en general, R es mayor en sarampión que en rubéola (15) (Tabla 1). Para el segundo período de análisis se estaría logrando el nivel de eliminación en ambas enfermedades dado que $R < 1$. Es evidente la relación inversa entre la magnitud de R y el ritmo de inmunidad, a mayor ritmo de inmunidad, menor valor de R .

Tabla 1. Ritmo reproductivo de sarampión (1980 y 2005) y rubéola (1998 y 2005) en Latinoamérica y el Caribe, según el ritmo de inmunidad en población socialmente homogénea

Proporción a inmunizar x100	Sarampión		Rubéola	
	1980	2005	1998	2005
0	413,9	0,1	248,6	7,1
0,1	23,4	0,01	14,0	0,4
0,25	9,6	0,004	5,8	0,16
0,4	6,1	0,002	3,6	0,10
0,5	4,9	0,002	2,9	0,08
0,75	3,2	0,001	1,9	0,05
0,85	2,8	0,001	1,7	0,05
0,95	2,5	0,001	1,5	0,04

La condición para el logro del nivel de eliminación es que el ritmo reproductivo sea menor de uno ($R < 1$)

Modelo SIR con población socialmente heterogénea

Cuando se considera la existencia e interacción de dos estratos sociales en la población, se deben cumplir dos ritmos reproductivos efectivos a fin de lograr el nivel de eliminación de las enfermedades, de tal forma que se cumpla que tanto R_1 como R_2 sean menores de uno (Anexo 2).

La condición para el logro del nivel de eliminación es que el ritmo reproductivo sea menor de uno ($R < 1$)

La condición para el logro del nivel de eliminación es que ambos ritmos reproductivos sean menores de uno ($R_1 < 1$ y $R_2 < 1$)

En sarampión en 1980, no se logra el nivel de eliminación dado que R_1 es mayor de uno en todos los casos, pero en 2005 se logra la eliminación ($R_1 < 1$ y $R_2 < 1$), independiente del ritmo de inmunidad entre los estratos excepto si el ritmo de inmunidad fuera nulo en ambos estratos, esto es, cuando p_1 y $p_2 = 0$ (Tabla 2). En rubéola en 1998 no se habría logrado el nivel de eliminación, dado que por lo menos uno de los ritmos reproductivos es mayor de uno. En 2005, sólo se lograría el nivel de eliminación cuando se tiene un ritmo de inmunidad alto (de 0,85–0,9) por lo menos en el estrato bajo, dado que R_1 y R_2 son inferiores a uno (Tabla 2).

Tabla 2. Ritmo reproductivo de sarampión (1980 y 2005) y rubéola (1998 y 2005) en Latinoamérica y el Caribe, según el ritmo de inmunidad, en población con dos estratos sociales

Proporción a inmunizar x100	Sarampión				Rubéola			
	1980		2005		1998		2005	
	R_1	R_2	R_1	R_2	R_1	R_2	R_1	R_2
$p_1=0$ $p_2=0$	5,0	7,9E09	5,0	9,0E04	5,0	5,0E05	5,0	2,0E07
$p_1=0,1$ $p_2=0,4$	95,9	79,0	0,04	0,004	60,0	5,5	2,0	0,18
$p_1=0,1$ $p_2=0,9$	96,6	9,17	0,04	0,004	60,4	5,5	2,0	0,18
$p_1=0,85$ $p_2=0,4$	11,8	1,07	0,005	0,0004	7,1	0,6	0,23	0,02
$p_1=0,85$ $p_2=0,9$	11,8	1,07	0,005	0,0004	7,1	0,6	0,23	0,02
$p_1=0,95$ $p_2=0,95$	10,6	0,9	0,004	0,0004	6,4	0,5	0,21	0,01

La condición para el logro del nivel de eliminación es que ambos ritmos reproductivos sean menores de uno ($R_1 < 1$ y $R_2 < 1$)

Modelo SIR con población socialmente heterogénea y diversidad en el número promedio de contactos habituales

En individuos del mismo estrato social, se simuló un promedio de 98 contactos con varianza de 44 mientras que cuando la red de contactos habituales se establece en individuos de diferente estrato socio económico, el promedio de contactos es de 48, con una varianza de 94 (datos no mostrados).

Si se tiene dicha red de contactos, R_1 y R_2 son muy superiores a uno, sin que se logre la eliminación en ambas enfermedades en el primer período de análisis (Tabla 3). En el segundo período se estaría logrando el nivel de eliminación de sarampión en 2005, sólo si se tiene un alto ritmo de inmunidad especialmente en el estrato bajo, mientras que en rubéola en 2005, no se lograría el nivel de eliminación en ningún caso, dado que R_1 y R_2 son mayores de uno.

Tabla 3. Ritmo reproductivo de sarampión (1980 y 2005) y rubéola (1998 y 2005) en Latinoamérica y el Caribe, según el ritmo de inmunidad, en población con dos estratos sociales y red aleatoria de contactos

Proporción a inmunizar x100	Sarampión				Rubéola			
	1980		2005		1998		2005	
	R_1	R_2	R_1	R_2	R_1	R_2	R_1	R_2
$p_1=0$ $p_2=0$	1,3	9,0E09	1,3	4,0E06	1,6	5,4E09	1,3	1,8E08
$p_1=0,1$ $p_2=0,4$	20,1	904,6	4,4	0,4	54,5	544,0	172,8	18,0
$p_1=0,1$ $p_2=0,9$	43,3	904,6	4,4	0,4	119,5	544,0	185,9	18,0
$p_1=0,85$ $p_2=0,4$	19,7	106,4	0,5	0,04	51,2	64,0	22,9	2,1
$p_1=0,85$ $p_2=0,9$	42,0	106,4	0,5	0,04	104,1	64,0	23,1	2,1
$p_1=0,95$ $p_2=0,95$	44,0	95,2	0,46	0,04	107,0	57,2	20,7	1,9

La condición para el logro del nivel de eliminación es que ambos ritmos reproductivos sean menores de uno ($R_1 < 1$ y $R_2 < 1$)

DISCUSIÓN

En este estudio se compara el nivel de eliminación, cuando en la población hay estrato social bajo y alto y hay diversidad en el número promedio de contactos habituales con respecto a una población no diferenciada por estrato social. Se realizan simulaciones con datos de sarampión y rubéola en América Latina y el Caribe, en dos períodos de tiempo.

En general, en el segundo período de tiempo se lograría el nivel de eliminación de ambas enfermedades cuando se tiene una población homogénea mientras que no se lograría si además de la existencia de diferenciación social, es diferente el número promedio de contactos habituales de las personas según el estrato social.

Esto refleja la importancia de considerar la dinámica de la transmisión por estrato social y aún más, considerar condiciones como el hacinamiento y las formas de interacción social de las comunidades, de tal forma que los programas de sostenimiento de la eliminación incluyendo vigilancia epidemiológica, inmunización y en general, las formas de protección y promoción de la salud, partan de las peculiaridades de la comunidad.

La principal limitación del estudio es la carencia de datos desagregados por estrato o nivel socioeconómico, lo cual restringe la verificación de los supuestos del modelo y la precisión en los parámetros simulados. Sin embargo, se logra reproducir el patrón general reportado en la literatura, en relación con la reducción de la incidencia de la enfermedad durante el período analizado, el avance en la eliminación de estas enfermedades, pero también la presencia de brotes de tamaño considerable, aún a pesar de la baja incidencia de la enfermedad, lo que refleja la acumulación de susceptibles, la interacción de susceptibles e infectados y la generación de varias cadenas de transmisión de la enfermedad.

La reproducción del avance en el nivel de eliminación y el patrón de reducción de la incidencia de sarampión y rubéola en la región en el periodo analizado, se logra asumiendo la similitud entre la tasa de incidencia y el ritmo de infección. Como se dijo antes, el ritmo de infección es el número de nuevos casos dividido por la población susceptible y multiplicada por un único individuo infeccioso. Esto corresponde con el cálculo usual de la tasa de incidencia aunque el denominador es la población total en el periodo de análisis y la constante es igual a uno.

La estimación del ritmo de infección a partir de la tasa de incidencia es más apropiado en el primer período de análisis cuando la población susceptible es aproximadamente igual al total de la población, sin embargo, en el segundo período el ritmo de infección podría estar subestimado por la reducción de la población susceptible cerca de 30 años después del inicio de vacunación contra sarampión y diez años luego del inicio de la vacunación contra rubéola (18,19). Un cálculo más cercano del ritmo de infección demandaría el seguimiento de cohortes con una identificación de casos nuevos y de la población susceptible en cada unidad de tiempo analizada, en este caso, también desagregado por estrato social.

En vigilancia epidemiológica no se cuenta con datos sistemáticos del ritmo de recuperación o remoción de casos, esto es, el número de enfermos o infectados que se recuperan, están en cuarentena o mueren por unidad de tiempo. En este trabajo se simuló el ritmo de recuperación que mejor reprodujo el patrón de reducción de la incidencia de sarampión y rubéola en los dos períodos de tiempo (5).

En relación con el ritmo de pérdida de inmunidad por unidad de tiempo según estrato socio económico, no se conocen estudios sobre la estimación de este indicador en la región, por lo que se estimó un valor bajo y constante en el período analizado (20).

El aporte de este artículo desde el punto de vista computacional es ilustrar el manejo de un modelo complejo dadas las interacciones de los individuos entre y dentro de los estratos sociales, con un algoritmo ejecutado en un software disponible en el medio. Si bien el análisis del ritmo reproductivo efectivo en condiciones de heterogeneidad ha sido propuesto por varios autores, la necesidad de resolver múltiples desigualdades lo hacía inmanejable sólo con lápiz y papel. El algoritmo es guiado por Brown et al, (17), quienes desarrollaron modelos adicionales al SIR aunque con menos parámetros a estimar.

En este trabajo se deducen dos ritmos reproductivos efectivos R_1 y R_2 a partir del modelo que procura reflejar el proceso de transmisión de la enfermedad cuando en la población hay dos estratos sociales. El ritmo reproductivo efectivo R , se deduce de un modelo SIR con población homogénea.

Con R , es posible identificar una relación inversa entre su magnitud y el ritmo de inmunización (a mayor ritmo de inmunización, menor R). Con R_1 y R_2 , es más difícil reconocer estas relaciones a simple vista por la complejidad de las expresiones. Aún así, puede visualizarse la inclusión de los ritmos de infección entre y dentro de los estratos sociales en R_1 , mientras que R_2 , sólo incluye ritmos de infección dentro de los estratos sociales ($\beta_{1,p}$ y $\beta_{2,2}$). Otros autores han deducido R como una suma de R para cada grupo, por ejemplo de edad, asumiendo homogeneidad dentro de los subgrupos pero heterogeneidad entre ellos (1,21).

La simulación se centra en enfermedades como sarampión y rubéola, en proceso de eliminación. Cuando se considera la estructura de la población con dos estratos sociales y con interacción entre ellos, se deben obtener ambos ritmos reproductivos, para lograr el nivel de eliminación, esto es, se debe cumplir la condición de $R_1 < 1$ y $R_2 < 1$.

El hecho de no cumplir esta condición en rubéola en el segundo período de tiempo, cuando se analiza la existencia de dos estratos y la diversidad en el número promedio de contactos debe llamar la atención especialmente, en poblaciones hacinadas en espacios confinados.

En Estados Unidos, donde se documentó la interrupción de la transmisión sostenida de rubéola en 2004, a pesar de los esfuerzos planeados para incrementar los niveles de inmunización entre los años 1980 y 1990, se presentaron brotes de rubéola en comunidades cerradas en donde el número promedio de contactos habituales podría ser mayor, como escuelas, universidades, bases militares, hospitales, prisiones, sitios de trabajo, comunidades de inmigrantes y entre individuos quienes rechazan la vacunación (22). Una experiencia similar, se ha descrito en la eliminación de sarampión y rubéola en otros países (23,24).

El logro del nivel de eliminación también se dificulta cuando se observa un bajo ritmo de *inmunidad* en el estrato bajo. Esta situación demanda políticas de largo plazo para el mejoramiento del “estado inmunitario” de la población de estrato bajo, más allá de la *inmunización*. Esto también indica la necesidad de considerar la “heterogeneidad y diversidad” de la comunidad socialmente estructurada, en las acciones de vigilancia epidemiológica, fomento, protección y promoción de la salud ♣

Agradecimientos: Este trabajo fue parcialmente financiado por el Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología COLCIENCIAS, contrato número 111540820522.

Conflictos de interés: Ninguno.

REFERENCIAS

1. Gay N. The Theory of Measles Elimination: Implications for the Design of Elimination Strategies. *The Journal of Infectious Diseases* 2004;189(Suppl 1):S27-35.
2. Diekmann O, Heesterbeek JAP, Metz JAJ. On the definition and the computation of the basic reproduction ratio R_0 in models for infectious diseases in heterogeneous populations. *J Math Biol* 1990; 28:365–82.
3. Hethcote H. An immunization model for a heterogeneous population. *Theor. Pop. Biol* 1978;14(3):338-49.
4. Hincapié-Palacio D, Ospina-Giraldo J, Gómez-Arias R. The epidemic threshold theorem with social and contact heterogeneity. *Proc of SPIE* 2008; 6973: 1-12.
5. Panamerican Health Organization. Health conditions and trends. Health in the Americas 2007 Edition. Washington, D.C.; 2007. p. 58-207.
6. Panamerican Health Organization. Health in the context of development. Health in the Americas 2007 Edition. Washington, D.C.; 2007. p. 28-57.
7. De Quadros C, Izurieta H, Carrasco P, Brana M, Tambini G. Progress toward Measles Eradication in the Region of the Americas. *The Journal of Infectious Diseases* 2003; 187(Suppl 1):S 102-10.
8. Organización Panamericana de la Salud. Nueva meta de los programas de vacunación en la Región de las Américas: eliminar la rubéola y el síndrome de rubéola congénita. *Rev Panam Salud Pública* 2003;14(5):359-63.

9. Castillo – Solórzano C, Marsigli C, Bravo Alcantar P, Andrus JK, Filippis AMB, Danovaro-Holliday MC, et al. Progress toward elimination of rubella and congenital rubella syndrome—The Americas 2003–2008. Centers for Diseases Control and Prevention. *Morbidity and Mortality Weekly Report* 2008; 57 (43): 1176-1179.
10. Bates A, Wolinsky F. Personal, Financial, and Structural Barriers to Immunization in Socioeconomically Disadvantaged Urban Children *Pediatrics* 1998; 101: 591-596.
11. Findley S, Irigoyen M, Schulman A. Children on the move and vaccination coverage in a low income urban latino population. *Am Journal Public Health* 1999;89(11):1728-31.
12. Gwatkin D, Rutstein S, Johnson K, Suliman E, Wagstaff A, Amouzou A. Socio economic differences in health, nutrition and population within developing countries: on overview. World Bank, the Government of the Netherlands and the Swedish International Development Cooperation Agency; 2007.
13. Diekmann O, Heesterbeek JAP. *Mathematical Epidemiology of Infectious Diseases: Model Building, Analysis and Interpretation*. New York: John Wiley and Sons; 2000.
14. De Serres G, Gay N, Farrington P. Epidemiology of transmissible diseases after elimination. *Am Journ of Epidemiol* 2000; 151(11): 1039-1048.
15. Anderson RM, May RM. *Infectious diseases of humans: dynamics and control*. New York: Oxford University Press; 1992.
16. Masuda N, Konno N. Multi-state epidemic processes on complex networks. *Journ Theoret Biol* 2006; 243(1):64-75.
17. Brown C, El Kahoui M, Novotni D, Weber A. Algorithmic methods for investigating equilibria in epidemic modelling. *Journ Symb Comp* 2006; 41:1157-1163.
18. Hinman A, Hersh B, De Quadros C. Rational use of rubella vaccine for prevention of congenital rubella syndrome in the Americas. *Rev Panam Salud Publica* 1998;4(3):156-60.
19. Valenzuela M, O'ryan M. Logros y desafíos del Programa Ampliado de Inmunizaciones en la región de las Américas. *Rev. Méd. Chile* 2000; 128 (8): 911-922.
20. Davidkin I, Peltola H, Leinikki P, Valle M. Duration of rubella immunity induced by two dose measles, mumps and rubella (MMR) vaccination. A 15-year follow-up in Finland. *Vaccine* 2000; 18: 3106-3112.
21. Hethcote H. Qualitative analyses of communicable diseases models. *Math Biosc* 1976; 28:335-56.
22. Centers for Diseases Control and Prevention. Achievements in Public Health: Elimination of Rubella and Congenital Rubella Syndrome. United States, 1969-2004. *Morbidity and Mortality Weekly Report*; 2005.
23. Galindo M, Santín M, Resik S, Ribas M, Guzmán M, Mas Lago P, et al. La eliminación del sarampión en Cuba. *Rev. Pan. Salud Publica* 1998; 4(3):171-177.
24. Rabo E, Taranger R. Scandinavian model for eliminating measles, mumps, and rubella. *British Med Journ* 1984; 289:1402-1404.
25. U.S. Census Bureau, International Data Base. [Internet]. Disponible en: <http://www.census.gov/ipc/www/idb/>. Consultado Abril de 2009.
26. Economic Commission for Latin America and the Caribbean. *Statistical Yearbook for Latin America and the Caribbean, 2005*. Santiago de Chile, 2006. [Internet]. Disponible en: <http://www.eclac.cl> Consultado Abril de 2009.

ANEXO 1

Valores de los parámetros para la simulación

Parámetros	Sarampión		Rubéola		Referencia
	1980	2005	1998	2005	
Incidencia (casos)	250 000	85	135 000	5 296	(5)
Población en miles (miles)	360 388	334 742	505 681	557 903	(25)
Población estrato bajo1 (40 %)	144 155	223 161	202 272	223 161	(26)
Ritmo global de infección β	7×10^{-4}	2×10^{-7}	3×10^{-4}	9×10^{-6}	(5)
Ritmo de infección dentro del estrato bajo $\beta_{1,1}$	7×10^{-4}	2×10^{-7}	3×10^{-4}	9×10^{-6}	
Ritmo de infección a individuos de estrato bajo por individuos del estrato alto $\beta_{1,2}$	1×10^{-5}	2×10^{-9}	3×10^{-5}	9×10^{-8}	
Ritmo de infección a individuos de estrato alto por individuos del estrato bajo $\beta_{2,1}$	$3,5 \times 10^{-4}$	1×10^{-7}	$1,5 \times 10^{-4}$	$4,5 \times 10^{-6}$	
Ritmo de infección dentro del estrato alto $\beta_{2,2}$	1×10^{-6}	2×10^{-10}	$2,5 \times 10^{-7}$	9×10^{-9}	
Ritmo de recuperación de individuos infectados del estrato bajo γ_1	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	
Ritmo de recuperación de individuos infectados del estrato alto γ_2	1×10^{-3}	1×10^{-3}	1×10^{-3}	1×10^{-3}	
Ritmo de pérdida de inmunidad de individuos recuperados del estrato bajo q_1	1×10^{-8}	1×10^{-8}	1×10^{-8}	1×10^{-8}	
Ritmo de pérdida de inmunidad de individuos recuperados del estrato alto q_2	1×10^{-9}	1×10^{-9}	1×10^{-9}	1×10^{-9}	
Tasa de mortalidad 2000 2005 ritmo de muerte μ	6×10^{-3}	6×10^{-3}	6×10^{-3}	6×10^{-3}	

ANEXO 2

Expresiones matemáticas del ritmo reproductivo según la diferenciación social de la población

Ritmo reproductivo efectivo R con natalidad y mortalidad, sin estratificación social

$$R_0 := \frac{N \beta (q + \mu)}{(\mu + p + q) (g + \mu)}$$

Ritmo reproductivo 1 R_1 si hay dos estratos sociales bajo (subíndice 1) y alto (subíndice 2)

$$R_1 := \frac{\frac{N_1 q_1 \gamma_2 \beta_{1,1}}{q_1 + p_1} + \frac{q_2 N_2 \gamma_1 \beta_{2,2}}{q_2 + p_2} + \frac{\beta_{2,1} N_2 q_2 \beta_{1,2} N_1 q_1}{(q_1 + p_1)(q_2 + p_2)}}{\frac{\beta_{2,2} N_2 q_2 \beta_{1,1} N_1 q_1}{(q_1 + p_1)(q_2 + p_2)} + \gamma_1 \gamma_2}$$

Ritmo reproductivo 2 R_2 si hay dos estratos sociales bajo (subíndice 1) y alto (subíndice 2)

$$R_2 := \frac{\frac{N_1 q_1 \beta_{1,1}}{q_1 + p_1} + \frac{N_2 q_2 \beta_{2,2}}{q_2 + p_2}}{\gamma_1 + \gamma_2}$$