

## RESUMEN

Actualmente existe una clara concienciación de la población por la sostenibilidad, el cuidado del medio ambiente y el bienestar animal. Pero, además los consumidores exigen alimentos seguros lo que implica a toda la cadena productiva empezando por la producción primaria. Un adecuado control de las enfermedades transmisibles a este nivel es uno de los pilares fundamentales de la seguridad alimentaria junto con el control en el momento del sacrificio, procesado y distribución.

En esta tesis se plantea la utilización de herramientas matemáticas que permitan optimizar el uso de las medidas de bioseguridad, de implantación general en granjas de aves, como son la vacunación, la limpieza y desinfección, y la detección y eliminación de animales infectados. Esto con la finalidad de lograr una producción libre de infección y por lo tanto evitar el sacrificio temprano de los animales. De esta forma, se puede contribuir a la sostenibilidad de las granjas. Además, de garantizar la inocuidad de los alimentos a nivel de la producción primaria.

Así, se ha estudiado el comportamiento de un modelo matemático estructurado que incorpora la contaminación del medio ambiente como un modo indirecto de transmisión de la enfermedad, centrándose en el análisis de un brote de *Salmonella* en una granja de pollos. Las variables consideradas han sido: individuos susceptibles e infectados y la cantidad de bacterias acumuladas en el recinto (sistema SIB), y, además, se considera reposición de los individuos muertos de forma que el tamaño de la población es el mismo en cualquier etapa. El sistema se considera dinámico y no lineal, en tiempo discreto y por ello su modelización se basa en ecuaciones en diferencias. Se ha analizado el comportamiento del sistema alrededor de los puntos de equilibrio a) libre de enfermedad y b) endémico. Tras el análisis del proceso se ha obtenido el número reproductivo básico ( $R_0$ ). Este número indica el comportamiento de la enfermedad, ya que si  $R_0$  es menor que la unidad, la enfermedad tiende a desaparecer pero en caso contrario la enfermedad permanece endémica o puede llegar a crecer. El resultado obtenido del modelo indica que este indicador es menor que uno, si y sólo si, la población se mantiene por debajo de cierto valor umbral, lo que permite tener la enfermedad controlada hacia su desaparición.

También, se han estudiado tres modelos para conseguir redirigir la evolución de la enfermedad hacia su desaparición considerando las siguientes medidas: a) *vacunación*, b) *limpieza y desinfección periódica* y c) *análisis y eliminación periódica de individuos infectados*. Los objetivos a alcanzar con el modelo propuesto fueron que la vacunación redujese la incidencia de la enfermedad entre los sujetos susceptibles y determinar su impacto sobre la incidencia. Respecto a la *desinfección del recinto* y la *eliminación de infectados*, el objetivo ha sido construir, en cada caso, un nuevo sistema dinámico con coeficientes periódicos que representase matemáticamente la estrategia de acción periódica elegida. La finalidad ha sido optimizar el número de etapas que se puede estar sin actuar sobre el proceso y manteniéndose éste estable, es decir con el número reproductivo básico menor que la unidad. Y, por último, se han comparado ambas estrategias, en base a sus periodos máximos-

Los resultados obtenidos indican que, respecto a la efectividad de la *vacunación*, el nuevo número reproductivo básico es función de la tasa de vacunación y de la tasa de efectividad de la vacuna. Si el proceso transcurre con un número reproductivo básico muy alto se requiere vacunar a un mayor número de individuos. Además, cuanto más efectiva sea la vacuna la tasa de vacunación se puede reducir. Para el modelo de impacto la vacunación, se ha indicado que la tasa de vacunación en los programas de vacunación se reduce si el impacto de ésta es positivo reduciendo la tasa de contagios entre los vacunados respecto a la de los susceptibles. Cuanto menor impacto produzca la vacuna, la tasa de contagio entre vacunados será más próxima a la de susceptibles y por lo tanto la tasa de población vacunada ha de ser mayor. Respecto al impacto de la *limpieza y desinfección periódica*, se ha comprobado que la infección se mantiene con una tendencia a la desaparición si estamos como máximo sin volver a desinfectar un número de etapas menor que un determinado tiempo  $N$ . Éste es el valor crítico o umbral de la medida de limpieza y desinfección. Respecto a la medida de *eliminación de infectados*, el procedimiento consiste en dejar cada  $N$  etapas el número de individuos infectados en 0, pero como quedan bacterias en el recinto, aparecen nuevos infectados. Se ha encontrado un valor máximo del periodo  $N$  que podemos estar sin eliminar los nuevos infectados manteniéndose el sistema estable a cero. Éste es el límite crítico de eliminación de infectados. Una comparación entre estos dos procedimientos nos ha permitido concluir que, si la tasa de supervivencia de individuos infectados es menor que la tasa de supervivencia de las bacterias, entonces el valor crítico de eliminación de infectados es menor que el valor umbral de la medida de limpieza y desinfección y por tanto la medida elegida es el control de la desinfección. En caso contrario, es más eficiente la técnica de eliminación de infectados.

Finalmente, se ha construido un modelo compartimental, determinista, integrando tanto la transmisión directa como indirecta. La existencia de otras enfermedades infecciosas, tales como la tuberculosis o la brucelosis que se pueden transmitir por ambas vías: por contacto directo de un individuo susceptible con un individuo infectado, pero también, por contacto de un susceptible con la bacteria que se mantiene viva en el entorno, nos ha llevado a generalizar el estudio anterior, construyendo un modelo matemático en el que se recogen las dos vías de transmisión. El proceso se representa matemáticamente mediante un sistema no lineal de tiempo discreto. Los objetivos que se han planteado son: a) encontrar los puntos de equilibrio libre de enfermedad y endémico, para conocer la estabilidad del sistema  $N$ -periódico obtenido con la modelización, b) conocer cómo se reduce la incidencia de la enfermedad, a través de la estabilidad de la matriz aplicando las técnicas de *limpieza y desinfección periódica* y *análisis y eliminación periódica de individuos infectados*. Los resultados indican que si la tasa de supervivencia de los individuos infectados más la tasa de infección mediante contacto directo por la población es menor que la tasa de supervivencia de la bacteria es preferible optar por la desinfección del recinto ya que podemos pasar más tiempo sin intervenir; y en caso contrario, es mejor eliminar los individuos infectados.

La aplicación de estas estrategias de control conforme a los resultados obtenidos podrían ayudar a mejorar y optimizar el uso de los recursos y contribuir a una mayor eficiencia en la bioseguridad de la granja, en la producción primaria, y por tanto, en la seguridad de toda la cadena alimentaria.

Palabras clave: epidemiología, salmonella, ecuaciones en diferencias, tiempo discreto, número reproductivo básico, puntos de equilibrio.