

## Desarrollo de un modelo de simulación estocástica para evaluar costos de programas de control de cisticercosis porcina

### Development of a stochastic simulation model to evaluate costs of porcine cisticercosis control programmes

Linda Gallegos<sup>1\*</sup>, Juan Calcina<sup>1</sup>, Eliana Icochea<sup>2</sup>, Eloy Gonzales<sup>1,3</sup>, Luis A. Gomez-Puerta<sup>1</sup>, Armando E. González<sup>1</sup>

#### RESUMEN

El objetivo del estudio fue desarrollar un modelo de simulación estocástica para estimar costos de implementación de programas de control de cisticercosis porcina (CP). Se plantearon tres escenarios: (1) utilización de una vacuna recombinante (VR) comercial, (2) uso mixto de la VR más oxfendazol (OFZ), y (3) dosificación con OFZ. Para establecer la eficacia de las intervenciones se obtuvieron las probabilidades de eliminación de la cisticercosis a través del modelo basado en agentes «cystiSim». El modelo de costo fue desarrollado en R con 10 000 iteraciones. Se encontró que el escenario mixto, con probabilidad de eliminación del 0.987 en 6.5 años, tuvo con costo anual de S/. 335,208 (95% IC: S/ 309,922 – 368,698) (1 US\$ = S/. 3.75). En contraparte, la estrategia de dosificación con OFZ mostró ser menos costosa con S/. 260,518 (95% IC: S/ 237,559 – 293,704) por año y una probabilidad de eliminación de 0.951 en el mismo periodo de evaluación. En los

<sup>1</sup> Laboratorio de Epidemiología y Economía Veterinaria, Facultad de Medicina Veterinaria, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

<sup>2</sup> Laboratorio de Patología Aviar, Facultad de Medicina Veterinaria, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

<sup>3</sup> Estación Experimental El Mantaro, Centro de Investigación IVITA, Facultad de Medicina Veterinaria, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Huancayo, Perú

\* E-mail: [linda.gallegoschu@gmail.com](mailto:linda.gallegoschu@gmail.com)

Recibido: 11 de abril de 2022

Aceptado para publicación: 27 de octubre de 2022

Publicado: 22 de diciembre de 2022

©Los autores. Este artículo es publicado por la Rev Inv Vet Perú de la Facultad de Medicina Veterinaria, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>] que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original

escenarios 1 y 2 la categoría costo de fármacos es la mayor, representando cerca del 50% del costo final, mientras que en el escenario 3 el mayor costo es el personal seguido de los fármacos. El trabajo concluye que la estrategia de dosificación con OFZ es la alternativa menos costosa de los escenarios planteados.

**Palabras clave:** *Taenia solium*, cisticercosis porcina, costo, simulación estocástica, vacuna, oxfendazol

## ABSTRACT

The aim of this study was to develop a stochastic simulation model to estimate implementation costs of porcine cysticercosis (CP) control programmes. Three scenarios were proposed: (1) use of a commercial recombinant vaccine (RV), (2) mixed use of RV plus oxfendazole (OFZ), and (3) dosing with OFZ. To establish the efficacy of the interventions, the probabilities of elimination of cysticercosis were obtained through the «cystiSim» agent-based model. The cost model was developed in R with 10 000 iterations. It was found that the mixed scenario offered a probability of 0.987 eliminating cysticercosis in 6.5 years and with an annual cost of S/. 335,208 (95% CI: S/ 309,922 – 368,698) (1 US\$ = S/. 3.75). In contrast, the dosing strategy with OFZ proved to be less expensive with S/. 260,518 (95% CI: S/ 237,559 – 293,704) per year and a probability of elimination of 0.951 in the same evaluation period. In scenarios 1 and 2, the drug cost category is the highest, representing about 50% of the final cost, while in scenario 3, the highest cost is personnel, followed by drugs. The work concludes that the dosing strategy with OFZ is the least expensive alternative of the proposed scenarios.

**Key words:** *Taenia solium*, porcine cysticercosis, cost, stochastic simulation, vaccine, oxfendazole

## INTRODUCCIÓN

*Taenia solium* es un parásito cestodo zoonótico que se transmite entre el hombre y el cerdo, y se encuentra entre las enfermedades tropicales desatendidas (WHO, 2018). Además, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) la enlista en el primer lugar entre las parasitosis transmitidas por alimentos de mayor preocupación (FAO, 2014). Los humanos pueden desarrollar cisticercosis luego de la ingestión accidental de los huevos de *T. solium*, donde los quistes se alojan principalmente en el sistema nervioso central, causando la neurocisticercosis (Del-Brutto y García, 2015), siendo la principal causa de epilepsia en humanos (Nash *et al.*, 2013).

Esto, indudablemente, ocasiona una alta carga financiera en países donde es endémica, como en Perú (García *et al.*, 2016).

Existen esfuerzos en la comunidad internacional para su control y erradicación, especialmente mediante estrategias de intervención basadas en evidencia, pero estas también deben ser sostenibles en el tiempo y con alto impacto, no solo en la salud humana, animal y ambiental, sino también en la economía de los estados (Thomas *et al.*, 2019). Para combatir la cisticercosis porcina (CP) se cuenta principalmente con la vacuna TSOL18 y el benzimidazol oxfendazol (OFZ) (Gonzalez *et al.*, 1997; Lightowlers, 2010). La vacuna ofrece protección cercana al 100% comprobada en más de un ensayo experimental (Lightowlers, 2010) y los resultados son más

prometedores al combinarla con OFZ (García *et al.*, 2016; Poudel *et al.*, 2019). Aunque no se tiene un consenso sobre las estrategias aceptables para todas las realidades (CystiTeam, 2019; Dixon *et al.*, 2020), organizar campañas masivas de vacunación o dosificación implica una gran inversión, la cual los pequeños productores y comerciantes intermediarios no pueden asumir (Ouma *et al.*, 2021).

Para evaluar tanto la transmisión como la eficacia de las potenciales intervenciones a realizarse para prevenir o controlar esta enfermedad, se han desarrollado diversos modelos matemáticos, entre estocásticos, determinísticos e híbridos (Gonzalez *et al.*, 2002; Kyvsgaard *et al.*, 2007; José *et al.*, 2018), tanto para estudiar la transmisión de *T. solium* como para evaluar intervenciones en el humano y el cerdo (Braae *et al.*, 2016; Lightowlers y Donadeu, 2017; Winskill *et al.*, 2017). Epicyst, desarrollado por Winskill *et al.* (2017), es un modelo de transmisión determinístico que permite evaluar diversos escenarios e intervenciones en ambos hospedadores; en tanto que cystiSim, desarrollado por Braae *et al.* (2016), se diferencia de este último ya que permite obtener la probabilidad de eliminación de la enfermedad estocásticamente. Este tipo de simulaciones son el método de elección cuando los experimentos son muy costosos de realizar en la realidad o cuando no existen fórmulas disponibles para hacer inferencias sobre algún sistema que es objeto de estudio (Corlu *et al.*, 2020).

Al seleccionar alguna estrategia de control de enfermedades como parte de una política pública se requiere conocer no solo la efectividad de estas, sino además, los costos para su ejecución, ya que de ello dependen las decisiones por las autoridades competentes. La Organización Mundial de la Salud (OMS) cuenta con una guía para elaborar planes de inmunización en humanos que analiza las fuentes de financiamiento y los costos futuros (WHO, 2014). Para el sector vete-

rinario existen herramientas para planificar campañas de vacunación y evaluar costos como el modelo desarrollado por Wallace *et al.* (2019) para el control de rabia, y el modelo VacciCost de Tago *et al.* (2017) para el control de la peste de pequeños rumiantes (*peste des petit ruminants*).

Los modelos de simulación estocástica como herramientas de evaluación de costos serían de gran utilidad al comparar diferentes estrategias con miras a seleccionar, como política de salud pública, la alternativa más viable para el control de la CP. El presente estudio plantea un modelo de simulación estocástica para estimar los costos de intervenciones bajo diferentes escenarios, a fin de planificar y presupuestar la toma de decisiones para combatir la cisticercosis porcina.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción del Modelo

En este estudio se desarrolla una herramienta de simulación estocástica para el costo de intervenciones de mitigación de CP en el transcurso de un año. Esta aplicación permite estimar costos de estrategias en base a la vacunación, al uso de OFZ o la combinación de ambos. Para demostrar el comportamiento de la herramienta se evaluaron tres escenarios hipotéticos que se han descrito como potenciales intervenciones eficaces, pero que debido al costo no han sido validados. En todos los escenarios del modelo se asume que son elegibles los cerdos  $\geq 2$  meses de edad. Los escenarios se plantearon con el modelo estocástico *cystiSim* (v0.1.0) disponible en lenguaje de programación de R (<https://CRAN.R-project.org/package=cystiSim>), obteniendo como resultados las probabilidades y tiempos requeridos para la eliminación de la CP. Las fórmulas y parámetros utilizados para el análisis de costo se presentan en los cuadros 1 y 2.

## Descripción de las Estrategias de Control

Las siguientes tres estrategias de tratamiento fueron evaluadas con una cobertura del 90%:

- Escenario 1: Vacunación con vacuna recombinante (VR): Se examinan los costos de aplicar solo la vacuna. La frecuencia de aplicación es cada cuatro meses. De acuerdo con las indicaciones del fabricante se realiza un refuerzo al mes de cada vacunación, siendo en total seis intervenciones anuales, con una probabilidad de eliminación del 0.875 en 20 años según el modelo *cystiSim*.
- Escenario 2: Vacunación con VR y dosificación con oxfendazol (OFZ). Se combina el uso de la VR con OFZ. Se aplica la vacuna y OFZ en la primera intervención, después de un mes se aplica un refuerzo de VR y seis meses después una dosificación con OFZ, con un total de tres intervenciones en un año, con una probabilidad de eliminación del 0.987 en 6.5 años según el modelo *cystiSim*.
- Escenario 3: Dosificación con OFZ. Se examinan los costos de aplicar solo OFZ a intervalos de cuatro meses, siendo tres intervenciones anuales, con una probabilidad de eliminación de 0.951 en 6.5 años según el modelo *cystiSim*.

## Población de Estudio

La provincia de Morropón en Piura, ubicada en la costa norte del Perú, fue seleccionada para este estudio debido a que se contaba con la información necesaria sobre la situación de la enfermedad (Jayashi *et al.*, 2012) y los datos de la población porcina (19 731 cerdos) obtenidos del último Censo Nacional Agropecuario (INEI, 2012).

Para describir de manera estocástica la variabilidad (e incertidumbre) de las edades de los cerdos e introducirlos en el modelo de forma aleatoria e independiente en cada in-

tervención, se utilizó la información de 8642 cerdos del proyecto de eliminación de cisticercosis en la costa norte del país. Con esos datos se utilizó el paquete *fitdistrplus* (v1.1-3) (Delignette-Muller y Dutang, 2015) para obtener la distribución que más se ajustaba a la información colectada y así describir estocásticamente los potenciales escenarios a evaluar. El cálculo de volumen de OFZ se realizó aproximando los pesos con una ecuación de regresión que se obtuvo a partir de los datos del estudio de Ramos (2008) realizado en Tumbes, Perú ( $peso = 5 + 0.302 * edad$ ).

## Evaluación Económica de las Intervenciones

La estructura de los costos en cada escenario se basó en la guía integral de la OMS de costos y financiamiento de inmunizaciones (WHO, 2014) y la herramienta *VacciCost* (Tago *et al.*, 2017). Los acrónimos para cada fórmula se desarrollaron a partir de letras del alfabeto, separadas con guiones bajos y describen actividades involucradas en los costos a calcularse en cada escenario (Cuadro 3). Los componentes se clasificaron en costos de los fármacos, de mantenimiento y suministros para su aplicación, costos en personal (agrupados en equipos) y su entrenamiento, y costos para la movilización social de los programas:

- Escenario 1: Vacunación con VR. Se considera que los costos dependen de: costo de vacunas ( $TC_v$ ), suministros de vacunas ( $TC_{sv}$ ), personal ( $TC_{per_v}$ ), mantenimiento de cadena de frío ( $TC_{mt}$ ), entrenamiento de personal ( $TC_{trv}$ ) y movilización social ( $TC_{ms}$ ).
- Escenario 2: Vacunación con VR y dosificación con OFZ. Este escenario mixto considera los siguientes costos: costo de vacunas ( $TC_{vx}$ ), costo de OFZ ( $TC_{Ox}$ ), personal para vacunación y dosificación ( $TC_{px}$ ), entrenamiento de personal ( $TC_{trx}$ ), suministros de vacunas ( $TC_{svx}$ ), suministros para OFZ

Cuadro 1. Fórmulas empleadas para el cálculo de los costos en programas de control de cisticercosis porcina (Perú)

Fórmulas	Acrónimo	Descripción
VR para escenario 1	$vr$	$= v\_sum * (1 + merma\_v)$
VR para escenario 2	$vr_x$	$= v\_sum_x * (1 + merma\_v)$
Número de frascos de OFZ para escenario 2	$nfO_x$	$= [volOr_x / presentacion]$
Número de frascos de OFZ para escenario 3	$nfo$	$= [volO\_r / presentacion]$
Número de equipos para escenario 1/intervención	$neqv\_i$	$= [v\_sum / (di * prod\_a * nv\_a)]$
Número de equipos para escenario 2/intervención	$neqx\_i$	$= [length(pes1x) / (di * prod\_x * nv\_a)]$
Número de equipos para escenario 2/intervención vacunación refuerzo	$neqv_u\_i$	$= [length(pes2x) / (di * prod\_vx * nvu\_a)]$
Número de equipos para escenario 2/intervención OFZ al sexto mes	$neqOu\_i$	$= [length(pes3x) / (di * prod\_Ox * nOu\_a)]$
Número de equipos para escenario 3/intervención	$neqO\_i$	$= length(pes1O) + length(pes2O) + length(pes3O) / (di * prod\_O * nvO\_a)$
Costo de un equipo para escenario 1/intervención	$ceqv\_i$	$= (nvet\_v * s\_vet + nast\_v * s\_ast)$
Costo de un equipo para escenario 2/intervención	$ceqx\_i$	$= (nvet * s\_vet + nast * s\_ast)$
Costo de un equipo para escenario 3/intervención	$ceqO\_i$	$= (nvet\_O * s\_vet + nast\_O * s\_ast)$

Costos en soles (1 US\$ = S/. 3.86)

- Escenario 3: Dosificación con OFZ. Se consideran: costos de OFZ ( $TC\_O$ ), personal ( $TC\_per\_O$ ), suministros para dosificación ( $TC\_dosf$ ), entrenamiento del personal ( $TC\_trO$ ) y movilización social ( $TC\_msO$ ).

### Colección de Datos y Parametrización de los Costos

La mayor parte de la data colectada para las evaluaciones económicas corresponde a información del Servicio Nacional de Sanidad Agraria (SENASA) publicada en el Portal de Transparencia Estándar del Estado Peruano (PCM, s/f). En dicho portal se bus-

Cuadro 2. Fórmulas para el cálculo de los costos de cada escenario para el control de cisticercosis porcina (Perú)

	Acrónimo	Descripción
Escenario 1: Inmunización con VR		
Costo de VR	$TC_v$	$= vr * pr_v * (1+FMv)$
Suministros	$TC_{sv}$	$= vr + pr_{sv} * (1+FMv)$
Personal	$TC_{per_v}$	$= neqv_i * ceqv_l * nv_a$
Mantenimiento cadena frío	$TC_{mt}$	$= vl_{cf} * cf$
Entrenamiento del personal	$TC_{trv}$	$= neqv_i * nv_a * (nvet_v + nast_v) * train$
Movilización social	$TC_{ms}$	$= mseq_i * neqv_i * nv_a$
Escenario 2: Inmunización con VR y dosificación con OFZ		
Costo de VR	$TC_{vx}$	$= vrx * pr_v * (1+FMv)$
Costo de OFZ	$TC_{Ox}$	$= nfOx * pr_O * (1+FMO)$
Personal para vacunación y dosificación	$TC_{px}$	$= TC_{per_vu} + TC_{per_Ou} + TC_{per_x}$
Entrenamiento del personal	$TC_{trx}$	$= (neqx_i * nx_a * (nvet + nast) + neqvu_i * nvu_a * (nvet_{vx} + nast_{vx}) + neqOu_i * nOu_a * (nvet_{Ox} + nast_{Ox})) * train$
Suministros para VR	$TC_{svx}$	$= vrx * pr_{sv} * (1+FMv)$
Suministros dosificación de OFZ	$TC_{dosfx}$	$= neqx_i * nOx_a * ndosf * pr_{dosf}$
Movilización social	$TC_{msx}$	$= mseq_i * (neqx_i * nx_a + neqvu_i * nvu_a + neqOu_i * nOu_a)$
Mantenimiento de cadena frío	$TC_{mtx}$	$= vl_{cfx} * cf$
Escenario 3: Dosificación con OFZ		
Costo de OFZ	$TC_O$	$= nfO * pr_O * (1+FMO)$
Personal	$TC_{per_O}$	$= neqO_i * ndO_a * ceqO_i$
Suministros para dosificación	$TC_{dosf}$	$= neqO_i * ndO_a * ndosf * pr_{dosf}$
Entrenamiento del personal	$TC_{trO}$	$= neqO_i * ndO_a * (nvet_O + nast_O) * train$
Movilización social	$TC_{msO}$	$= mseq_i * neqO_i * ndO_a$

caron los principales insumos requeridos para el programa de erradicación de enfermedades de ganado porcino en el Perú y sus precios finales de adquisición entre el 2016-2020.

Estos datos se introdujeron en el modelo y con el paquete de R *fitdistrplus* (Delignette-Muller y Dutang, 2015) y se evaluaron mediante histogramas de frecuencia,

Cuadro 3. Fórmulas para el cálculo de costos anual de los tres escenarios planteados en el estudio

Escenario	Acrónimo	Fórmula
Escenario 1	<i>CTV</i>	$TC_v + TC_{sv} + TC_{mt} + TC_{per_v} + TC_{trv} + TC_{ms}$
Escenario 2	<i>CTX</i>	$TC_{vx} + TC_{Ox} + TC_{svx} + TC_{dosfx} + TC_{px} + TC_{trx} + TC_{msx} + TC_{mtx}$
Escenario 3	<i>CTO</i>	$TC_O + TC_{dosf} + TC_{per_O} + TC_{trO} + TC_{msO}$

Cuadro 4. Parámetros utilizados en el modelo de simulación para estimar los costos del programas de control de cisticercosis porcina en Perú. Gastos generales según los datos colectados

Condiciones generales	Valor	Distribución	Fuente (valores)
Proporción de cobertura en las estrategias (%)	90	Fijo	SENASA (2017)
Población total de cerdos (Morropón-Piura)	19,731	Fijo	INEI (2012)
Edades de los cerdos	size= 1.61 mu= 8.45	Binomial negativa	Ajustado
Salario de un veterinario/intervención (S/)	2700	Fijo	SENASA (2019)
Salario de un asistente/intervención (S/)	1400	Fijo	SENASA (2012)
Costo de movilización social/intervención (S/)	200	Fijo	Entrevista
Número de días trabajados por intervención	20	Fijo	Entrevista
Precio de entrenamiento/persona (S/)	min.=20.72 máx.= 44.68	Uniforme (ajustado)	PCM, (n.d.)

distribución acumulada, valores de asimetría y curtosis. Asimismo, mediante un gráfico de Cullen y Frey se estimó la distribución a la que más se aproxima cada conjunto de datos. Algunas de las variables no siguieron este tratamiento y se incluyeron en el modelo asumiendo distribuciones triangulares, donde los valores máximos, mínimo y más probable se obtuvieron de entrevistas a especialistas. Las

variables con menos de 10 datos se introdujeron en el modelo sin ajustarse a una distribución, donde el valor seleccionado para el cálculo de costos fue obtenido por selección aleatoria de los valores colectados. Finalmente, otras variables adicionales se consideraron de referencias bibliográficas. El detalle de las variables, distribuciones y sus respectivos parámetros se presentan en los cuadros 4-6.

Cuadro 5. Parámetros utilizados en el modelo de simulación para estimar los costos del escenario 1 (Vacunación con vacuna recombinante [VR]) según los datos colectados

Vacunación cuatrimestral	Valor	Distribución	Fuente (valores)
Precio de una dosis de vacuna (S/)	(1.4; 1.75; 2.1)	Aleatorio	Okello <i>et al.</i> (2018)
Precio de suministros de una dosis de vacuna (S/)	min.=0.185 máx.= 0.2	Uniforme (ajustado)	PCM (n.d.)
Merma de vacunación (%)	min.=5 máx.=15 más probable=10	Triangular	Entrevista
Flete y movilización de vacuna (%)	15	Fijo	WHO (2014)
Precio de cajas frías pequeñas (1.4 litros) (S/)	(219.48; 310)	Aleatorio	PCM (n.d.)
Precio de cajas frías grandes (7 litros) (S/)	(4.5; 6; 13.39)	Aleatorio	PCM (n.d.)
Porcentaje del costo de mantenimiento de la cadena de frío (%)	5	Fijo	WHO (2014)
Número de veterinario/equipo de vacunación	1	Fijo	Entrevista
Número de asistentes/equipo de vacunación	2	Fijo	Entrevista
Productividad de un equipo de vacunación/día	min.=100 máx.=200 más probable=150	PERT	Entrevista

### Modelo de Simulación para Costos y Análisis de la Información

Las fórmulas para cada escenario fueron plasmadas en un documento de texto de RStudio (v4.0.3). Los costos anuales para cada escenario se definieron como la suma de los costos de sus componentes (Cuadro 3). A su vez cada componente posee fórmulas particulares que combinan parámetros de costos de bienes, servicios y variables de productividad de personal (Cuadros 1-2), bajo las condiciones de cobertura, efectividad y posología de los fármacos descritas anteriormente. Los parámetros fueron introducidos en el modelo con sus respectivas distribuciones (Cuadros 4-6). Luego, estos fueron analizados estocásticamente usando simulaciones Monte Carlo con el paquete mc2d (v0.1-

19) (Pouillot y Delignette-Muller, 2010) con un total de 10 000 iteraciones. Una vez obtenidos los costos anuales de cada escenario se realizaron análisis de sensibilidad basados en el coeficiente de correlación de Spearman con el fin de establecer el impacto de las variables introducidas dentro del modelo.

## RESULTADOS

Se elaboró un modelo de simulación estocástica que estima los costos de implementación de programas de control de CP. De los tres escenarios planteados, la vacunación con la VR resulta siendo la opción de mayor costo, mientras que la dosificación con OFZ la de menor costo (Cuadro 7).



Cuadro 6. Parámetros utilizados en el modelo de simulación para estimar los costos del escenario 2 (Vacunación con VR y dosificación con oxfendazol [OFZ]) y escenario 3 (Dosificación con OFZ) según los datos colectados

Escenario 2: dosificación con OFZ cuatrimestral	Valor	Distribución	Fuente (valores)
Precio un frasco de OFZ (S/)	(46.3; 50.8; 50.12; 53.5; 54.27)	Aleatorio	PCM (n.d.)
Precio de un dosificador oral (S/)	shape=305.29 rate=1.91	Gamma (ajustado)	PCM (n.d.)
Número de dosificadores por equipo	2	Constante	Entrevista
Merma de OFZ (%)	min.=5 máx.=10 más probable=20	Triangular	Entrevista
Flete y movilización OFZ (%)	15	Fijo	Tago <i>et al.</i> (2017)
Concentración de un frasco de OFZ (%)	10	Fijo	PCM (n.d.)
Volumen de presentación de OFZ (ml)	1000	Fijo	PCM (n.d.)
Número de veterinarios por equipo dosificación OFZ	1	Fijo	Entrevista
Número de asistentes por equipo dosificación con OFZ	3	Fijo	Entrevista
Productividad de un equipo para dosificación con OFZ	min.=100 máx.=200 más probable=150	PERT	Entrevista
Escenario 3: vacunación y dosificación con OFZ			
Número de veterinarios para intervención mixta	1	Fijo	Entrevista
Número de asistentes para intervención mixta	3	Fijo	Entrevista
Número de veterinarios para vacunación única (mixta)	1	Fijo	Entrevista
Número de asistentes para vacunación única (mixta)	2	Fijo	Entrevista
Número de veterinarios para dosificación con OFZ (mixta)	1	Fijo	Entrevista
Número de asistentes para dosificación con OFZ (mixta)	3	Fijo	Entrevista
Productividad de equipo para intervención mixta	min.=50 máx.=150 más probable=100	PERT	Entrevista
Productividad de equipo de vacunación (mixta)	min.=100 máx.=200 más probable=150	PERT	Entrevista
Productividad de equipo para dosificación con OFZ (mixta)	min.=100 máx.=200 más probable=150	PERT	Entrevista

Cuadro 7. Resultados de los costos (S/.) e intervalos de credibilidad al 95%, para un año en tres escenarios<sup>1</sup> planteados para el control de la cisticercosis porcina en cerdos de Morropón, Piura

Outputs finales	Media	Mínimo	Máximo	IC 95%
Escenario 1	522,134	445,220	624,319	480,398 – 579,263
Escenario 2	335,208	295,943	400,528	309,922 – 368,698
Escenario 3	260,518	214,875	319,774	237,559 – 293,704

1: Vacunación con vacuna recombinante (VR); 2: Vacunación anual con VR y dosificación con oxfendazol (OFZ) 3: Dosificación con OFZ

Costos en soles (1 US\$ = S/. 3.86)

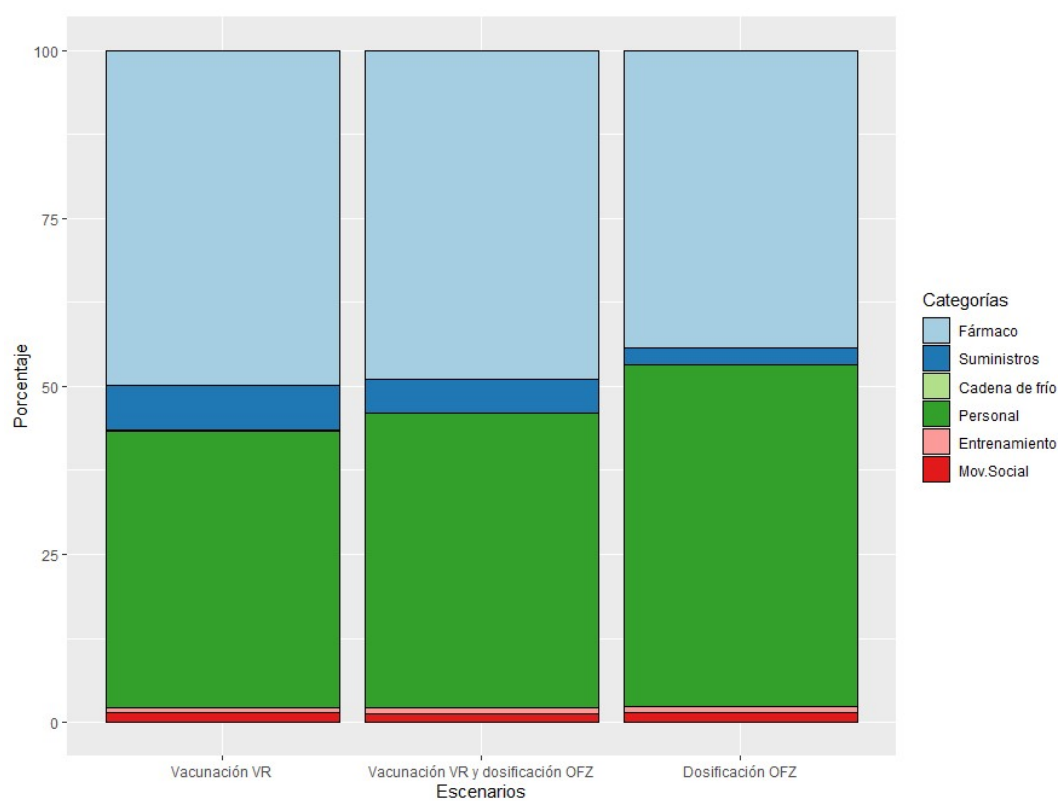


Figura 1. Porcentaje de contribución de las componentes de costos según escenario. VR: vacuna recombinante; OFZ (oxfendazol)

En cuanto a las categorías descritas en cada fórmula, las que generan los mayores costos son similares en todos los escenarios. Los fármacos en los escenarios 1 y 2 representan cerca del 50% del costo final, en tanto que en el escenario 3 representa menos de

la mitad del costo total (Figura 1). En segundo lugar están los costos asociados al recurso humano, con más del 40% para los escenarios 1 y 2, y con alrededor de 50% en el escenario 3. El tercer lugar lo ocupan los suministros en todos los escenarios.

Las variables relacionadas directamente con los costos de personal muestran una correlación positiva en los todos los escenarios. Tanto en los escenarios 1 y 3 las variables «costo de personal» y «movilización social», tienen una correlación positiva fuerte ( $p=0.91$  y  $p=0.92$ ), mientras que, para estos mismos escenarios, la correlación fue moderada en la variable «entrenamiento del personal» ( $p=0.47$  y  $p=0.48$ ). En los escenarios 2 y 3 existe una correlación positiva fuerte para los costos de dosificadores ( $p=0.83$  y  $p=0.84$ ). Finalmente, las correlaciones en los costos de adquisición de vacunas en el escenario 1 ( $p=0.35$ ) y de OFZ ( $p=0.16$  y  $p=0.37$ ) en los escenarios 2 y 3 fueron positivas pero débiles.

## DISCUSIÓN

Este estudio se enfocó en plantear un modelo de simulación estocástico de costos para evaluar programas de control de cisticercosis porcina por *T. solium* que incluyen el uso de herramientas disponibles. En cuanto a los resultados, las categorías de personal y fármacos constituyen la mayor carga económica en los escenarios propuestos. Lyons *et al.* (2019) consideraron dentro del cálculo de costos de los fármacos la merma ocasionada por el volumen desperdiciado en los frascos y las dosis desperdiciadas durante su aplicación. Estas variables no fueron consideradas en el presente modelo, y se optó por una distribución triangular expresada en porcentaje, debido a que no se disponían de datos de estudios previos o de campo.

En el presente estudio la productividad de los equipos fue ajustada a distribuciones del tipo PERT (Vose, 2008; Tago *et al.*, 2017), cuyos valores se obtuvieron mediante entrevistas a especialistas. Sin embargo, para poder ajustar aún más los datos, es posible emplear otras metodologías para evitar caer en subestimaciones o sobreestimaciones (Vose, 2008). Así, un mejor ajuste en el cálculo de la productividad del personal podría contribuir favorablemente en el cálculo de costos.

En el análisis de sensibilidad se observó que la variable determinante en las estimaciones de los costos finales es la productividad de los equipos, lo cual coincide con Tago *et al.* (2017). Esta variable es una de las más difíciles de estimar debido a la variabilidad en los distintos tipos de producción de porcinos (INEI, 2012). En los sistemas extensivos se necesitaría invertir más tiempo en manejar a los animales para que reciban la dosis de vacuna o antiparasitario en comparación con las crías del tipo intensivo (Poudel *et al.*, 2019) y la experiencia de campo del proyecto de eliminación de cisticercosis en Perú.

Aunque los parámetros y sus distribuciones o inclusive las categorías contempladas en este modelo son mejorables y requieren una validación de campo, este modelo intentó en lo posible ajustarse a la realidad nacional en base a presupuestos anuales como se maneja en el sector público (Ministerio de Economía y Finanzas, s/f). Se utilizaron datos de costos de programas nacionales de control de enfermedades llevados a cabo por el SENASA y las otras fuentes de datos fueron obtenidas de la revisión de literatura y opinión de expertos, que si bien son datos imperfectos, no necesariamente reducen el valor de los resultados (Morris, 1999).

Con respecto al desempeño del modelo con los escenarios escogidos, el escenario mixto (vacunación mas OFZ) fue el más costoso, lo cual concuerda con estudios realizados en países de África y Asia (Assana *et al.*, 2010; Poudel *et al.*, 2019). Esta combinación tiene considerables ventajas en cuanto a las posibles reinfecciones, dado que OFZ elimina los quistes viables de la musculatura, mientras que la vacunación ofrece la inmunidad necesaria para evitar una reinfección. Los resultados obtenidos con *cystiSim* demuestran que con esta estrategia se necesita menos tiempo para poder controlar la CP; sin embargo, el tratamiento con OFZ está limitado por su periodo de retiro (Moreno *et al.*, 2012), el cual o no se cumpliría o limitaría el comercio para el aprovechamiento inmediato del animal (Poudel *et al.*, 2019).

La principal desventaja del OFZ es la concentración que se comercializa en el país (10%), requiriendo grandes volúmenes para dosificar animales grandes; por ejemplo, para un cerdo de 80 kg es requerido 24 ml del producto comercial, lo cual ocasiona pérdidas del producto durante su administración, además de riesgo de neumonía por aspiración y posible subdosificación. Este último como efecto de las mermas producidas y de la dificultad de calcular el peso exacto del animal en programas de quimioterapia masiva en medios rurales. Adicionalmente, existe el riesgo de resistencia antihelmíntica en nematodos al OFZ, que ya se viene reportando en rumiantes domésticos (Jaeger y Carvalho-Costa, 2017).

Hasta el momento no existe un consenso de estrategias validadas para lograr la eliminación o la erradicación de la *T. solium*, la cual se había planteado para 2020 (Dixon *et al.*, 2020). Si bien existen herramientas de evaluación de costos de programas de vacunación, como Vaccicost (Tago *et al.*, 2017), el modelo económico propuesto se ajusta a la realidad y necesidades de la producción porcina nacional con el potencial de ser adaptado a otros entornos similares. El estimar costos dentro de un año permite hacer cambios de estrategias dependiendo de la disponibilidad de herramientas y recursos que se dispongan.

## CONCLUSIONES

El modelo de simulación estocástica de costos desarrollado para la implementación de un programa de control de cisticercosis porcina planteado en este estudio mostró un desempeño coherente, con una variabilidad e incertidumbre moderada y permitió determinar el costo de varias estrategias. De estas, la dosificación solo con oxfendazol en el transcurso de un año resultó ser la alternativa menos costosa de las estrategias propuestas en cerdos para la zona de Morropón, Piura-Perú.

## Agradecimiento

La investigación fue financiada por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) con código de proyecto 022-2016.

## LITERATURA CITADA

1. **Assana E, Kyngdon CT, Gauci CG, Geerts S, Dorny P, De Deken R, Anderson GA, et al. 2010.** Elimination of *Taenia solium* transmission to pigs in a field trial of the TSOL18 vaccine in Cameroon. *Int J Parasitol* 40: 515-519. doi: 10.1016/j.ijpara.2010.01.006
2. **Braae UC, Devleesschauwer B, Gabriël S, Dorny P, Speybroeck N, Magnussen P, Torgerson P, et al. 2016.** CystiSim – an agent-based model for *Taenia solium* transmission and control. *Plos Neglect Trop D* 10: e0005184. doi: 10.1371/journal.pntd.0005184
3. **Corlu CG, Akcay A, Xie W. 2020.** Stochastic simulation under input uncertainty: a review. *Oper Res Perspect* 7: 100162. doi: 10.1016/j.orp-2020.100162
4. **CystiTeam Group for Epidemiology and Modelling of Taenia solium Taeniasis/Cysticercosis. 2019.** The World Health Organization 2030 goals for *Taenia solium*: Insights and perspectives from transmission dynamics modelling: CystiTeam Group for Epidemiology and Modelling of *Taenia solium* Taeniasis/Cysticercosis. *Gates Open Res* 3: 1546. doi: 10.12688/gatesopenres-13068.2
5. **Del-Brutto OH, García HH. 2015.** *Taenia solium* cysticercosis — the lessons of history. *J Neurol Sci* 359: 392-395. doi: 10.1016/j.jns.2015.08.011
6. **Delignette-Muller M, Dutang C. 2015.** Fitdistrplus: An R package for fitting distributions. *J Stat Softw* 64: 1-34. doi: 10.18637/jss.v064.i04

7. **Dixon MA, Braae UC, Winskill P, Devleesschauwer B, Trevisan C, Van Damme I, Walker M, et al. 2020.** Modelling for *Taenia solium* control strategies beyond 2020. *B World Health Organ* 98: 198-205. doi: 10.2471/BLT.19.238485
8. **[FAO] Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 2014.** Multicriteria-based ranking for risk management of food-borne parasites. FAO [Internet]. Disponible en: [http://www.who.int/foodsafety/publications/mra\\_23/en/](http://www.who.int/foodsafety/publications/mra_23/en/).
9. **García HH, González AE, Tsang VCW, O'Neal SE, Llanos-Zavalaga F, González G, Romero J, et al. 2016.** Elimination of *Taenia solium* transmission in northern Peru. *New Engl J Med* 374: 2335-2344. doi: 10.1056/NEJMoa-1515520
10. **González AE, Falcon N, Gavidia C, García HH, Tsang VCW, Bernal T, Romero M, et al. 1997.** Treatment of porcine cysticercosis with oxfendazole: a dose-response trial. *Vet Rec* 141: 420-422. doi: 10.1136/vr.141.16.420
11. **González AE, Gilman RH, García HH, López T. 2002.** Use of a simulation model to evaluate control programmes against *Taenia solium* cysticercosis. In: *Taenia solium* cysticercosis: from basic to clinical science. CABI. p 437-448.
12. **[INEI] Instituto Nacional de Estadística e Informática. 2012.** IV Censo Nacional Agropecuario 2012 - Base de Datos REDATAM. [Internet]. Disponible en: <http://censos.inei.gob.pe/Cenagro/redatam/#>
13. **Jaeger LH, Carvalho-Costa FA. 2017.** Status of benzimidazole resistance in intestinal nematode populations of livestock in Brazil: a systematic review. *BMC Vet Res* 13: 358. doi: 10.1186/s12917-017-1282-2
14. **Jayashi CM, Arroyo G, Lightowlers MW, García HH, Rodríguez S, González AE. 2012.** Seroprevalence and risk factors for *Taenia solium* cysticercosis in rural pigs of northern Peru. *Plos Neglect Trop D* 6: e1733. doi: 10.1371/journal.pntd.0001733
15. **José MV, Bobadilla JR, Sánchez-Torres NY, Laclette JP. 2018.** Mathematical model of the life cycle of taenia-cysticercosis: Transmission dynamics and chemotherapy (Part 1). *Theor Biol Med Model* 15: 18. doi: 10.1186/s12976-018-0090-
16. **Kyvsgaard NC, Johansen MV, Carabin H. 2007.** Simulating transmission and control of *Taenia solium* infections using a Reed-Frost stochastic model. *Int J Parasitol* 37: 547-558. doi: 10.1016/j.ijpara.2006.11.018
17. **Lightowlers MW. 2010.** Eradication of *Taenia solium* cysticercosis: a role for vaccination of pigs. *Int J Parasitol* 40: 1183-1192. doi: 10.1016/j.ijpara.2010-05.001
18. **Lightowlers MW, Donadeu M. 2017.** Designing a minimal intervention strategy to control *Taenia solium*. *Trends Parasitol* 33: 426-434. doi: 10.1016/J.PT.2017.01.011
19. **Lyons NA, Jemberu WT, Chaka H, Salt JS, Rushton J. 2019.** Field-derived estimates of costs for Peste des Petits Ruminants vaccination in Ethiopia. *Prev Vet Med* 163: 37. doi: 10.1016/J.PREVETMED.2018.12.007
20. **Ministerio de Economía y Finanzas. s.f. Proyecto de Presupuesto Año 2022.** (Nacional, Regional y Local). [Internet]. Disponible en: [https://www.mef.gob.pe/es/?option=com\\_content&language=es-ES&Itemid=101156&lang=es-ES&view=article&id=7139](https://www.mef.gob.pe/es/?option=com_content&language=es-ES&Itemid=101156&lang=es-ES&view=article&id=7139)
21. **Moreno L, Lopez-Urbina MT, Farias C, Domingue G, Donadeu M, Dungu B, García HH, et al. 2012.** A high oxfendazole dose to control porcine cysticercosis: pharmacokinetics and tissue residue profiles. *Food Chem Toxicol* 50: 3819-3825. doi: 10.1016/j.fct.2012.07.023
22. **Morris R. 1999.** The application of economics in animal health programmes: a practical guide. *Rev Sci Tech OIE* 18: 305-314. doi: 10.20506/RST.18.2.1173

23. **Nash TE, Mahanty S, Garcia HH. 2013.** Neurocysticercosis-more than a neglected disease. *Plos Neglect Trop D* 7: e1964. doi: 10.1371/journal.pntd.-0001964
24. **Ouma E, Dione M, Mtimet N, Lule P, Colston A, Adediran S, Grace D. 2021.** Demand for *Taenia solium* cysticercosis vaccine: lessons and insights from the pig production and trading nodes of the Uganda pig value chain. *Front Vet Sci* 8: 611166. doi: 10.3389/fvets.2021.-611166
25. **[PCM] Presidencia del Consejo de Ministros. s.f.** Portal del Estado Peruano - Portal de Transparencia Estándar - PTE. [Internet]. Disponible en: <http://www.transparencia.gob.pe/>
26. **Poudel I, Sah K, Subedi S, Kumar Singh D, Kushwaha P, Colston A, Gauci CG, et al. 2019.** Implementation of a practical and effective pilot intervention against transmission of *Taenia solium* by pigs in the Banke district of Nepal. *Plos Neglect Trop D* 13: e0006838. doi: 10.1371/journal.-pntd.0006838
27. **Pouillot R, Delignette-Muller M. 2010.** Evaluating variability and uncertainty in microbial quantitative risk assessment using two R packages. *Int J Food Microbiol* 142: 330-340. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2010.07.011
28. **Ramos DD. 2008.** Caracterización de la canal y la carne del cerdo criollo y de los productos cárnicos en el departamento de Tumbes Perú. Tesis Doctoral. España: Univ. de León. 318 p [
29. **[SENASA] Servicio Nacional de Sanidad Agraria. 2019.** Contratación de veintitrés (23) consultores individuales para el servicio de vacunación contra peste porcina clásica en la dirección ejecutiva Senasa Piura. *Minist Agric y Riego*: 4. [Internet]. Disponible en: <https://www.senasa.gob.pe/senasa/descargas-archivos/2019/08/TDR-VACUNADORES-PIURA.pdf>
30. **[SENASA] Servicio Nacional de Sanidad Agraria. 2017.** Proyecto de inversión pública a nivel de factibilidad: «Erradicación de enfermedades en el ganado porcino de crianza familiar» - Código snip 382565. *Minist Agric y Riego*: 232. [Internet]. Disponible en: [http://ofi5.mef.gob.pe/appFs/Download.aspx?f=-10959\\_AGBNPDI\\_-201776\\_-103543.pdf](http://ofi5.mef.gob.pe/appFs/Download.aspx?f=-10959_AGBNPDI_-201776_-103543.pdf)
31. **[SENASA] Servicio Nacional de Sanidad Agraria. 2012.** Términos de referencia para la contratación de técnico vacunador, para proyecto de control y erradicación de enfermedades en porcinos - Huánuco y Cajamarca. *Minist Agric*: 6. [Internet]. Disponible en: [https://www.senasa.gob.pe/senasa/descargasarchivos/jer/04102012-3/BASEASP-2012-PRODESA9-08-2012\\_1.pdf](https://www.senasa.gob.pe/senasa/descargasarchivos/jer/04102012-3/BASEASP-2012-PRODESA9-08-2012_1.pdf)
32. **Tago D, Sall B, Lancelot R, Pradel J. 2017.** VacciCost - A tool to estimate the resource requirements for implementing livestock vaccination campaigns. Application to peste des petits ruminants (PPR) vaccination in Senegal. *Prev Vet Med* 144: 13-19. doi: 10.1016/j.prevetmed.2017.05.011
33. **Thomas LF, Cook EAJ, Fèvre EM, Rushton J. 2019.** Control of *Taenia solium*; a case for public and private sector investment. *Front Vet Sci* 6: 176. doi: 10.3389/fvets.2019.00176
34. **Vose D. 2008.** Risk analysis - a quantitative guide. 3<sup>rd</sup> ed. West Sussex: John Wiley. 735 p.
35. **Wallace RM, Undurraga EA, Gibson A, Boone J, Pieracci EG, Gamble L, Blanton JD. 2019.** Estimating the effectiveness of vaccine programs in dog populations. *Epidemiol Infect* 147: e247. doi: 10.1017/S0950268819001158
36. **[WHO] World Health Organization. 2014.** Comprehensive multiyear planning (cMYP). A tool and user guide for cMYP

- costing and financing. WHO Doc Prod Serv: 110 p. [Internet]. Disponible en: [www.who.int/vaccines-documents/](http://www.who.int/vaccines-documents/)
37. **[WHO] World Health Organization. 2018.** Neglected tropical diseases. WHO [Internet]. Disponible en: [https://www.who.int/neglected\\_diseases/diseases/en/](https://www.who.int/neglected_diseases/diseases/en/)
38. **Winskill P, Harrison WE, French MD, Dixon MA, Abela-Ridder B, Basáñez MG. 2017.** Assessing the impact of intervention strategies against *Taenia solium* cysticercosis using the EPICYST transmission model. Parasite Vector 10: 73. doi: 10.1186/s13071-017-1988-9