Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

Diseño de un Índice de Selección Sintético (ISS) para caracteres de crecimiento y calidad morfológica en reproductores de camarón (*Penaeus vannamei*) dirigido a las condiciones industriales de cultivo en Ecuador.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Acuícola

Presentado por:
Magaly Elizabeth Montachana Chimborazo
Jakie Melissa Escobar Rivas

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2020

Escuela Superior Politécnica del Litoral

College of Maritime Engineering and Marine Sciences

Design of a Synthetic Selection Index (ISS) for growth and morphological quality characteristics in shrimp breeders (*Penaeus vannamei*) aimed at industrial growing conditions in Ecuador.

CAPSTONE COURSE

A project submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of:

Aquaculture Engineer

By:

Magaly Elizabeth Montachana Chimborazo

Jakie Melissa Escobar Rivas

GUAYAQUIL - ECUADOR

Year: 2020

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mi amada madre Magdalena por ser el motor de mi vida y el modelo ejemplar de lo que es ser una mujer valiente y trabajadora, a mi padre Carlos que me enseñó que lo más importante es creer en uno mismo. A mis hermanos y demás familiares por darme ánimos para seguir adelante, a mi mejor amigo Johnny por estar siempre presente en mis triunfos y derrotas.

Y, por último, a mi profesor y amigo Marco Álvarez, por enseñarme que rendirme no es una opción.

Magaly Montachana

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mi hermosa madre Mara por ser una figura ejemplar, velar mis noches de estudio y ser el pilar fundamental de mi vida, la mujer más valiente, trabajadora y fuerte, a mis abuelos, sobre todo a mi abuela Fausta por su apoyo incondicional desde que llegue al mundo, siempre motivándome y decirme que Dios tiene grandes cosas para mí. A mis hermanos por su cariño y motivación, a todos mis tíos por su apoyo en cada etapa y a mis increíbles amigos, por ser una familia incondicional y compañeros de grandes aventuras. A Dios por todo el amor que me brinda y lo bueno que me ha permitido vivir y tener.

Y, por último, a mi por todo el esfuerzo, dedicación y amor que dedique en todos estos años de estudio.

Jakie Escobar

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro más cálido y sincero agradecimiento a Bonny Bayot,*Ph.D,* quien nos dio la guía para la consecución de este trabajo. A Juan Manuel Afonso López *Ph.D*, y su equipo de investigación,quien nos brindó su experiencia profesional y dedicación desde el inicio al fin. Al Ingeniero Walter Intriago, y su equipo de investigación y desarrollo, por facilitarnos las herramientas para realizar el levantamiento de información necesario en el desarrollo de este proyecto. A todos los técnicos y especialistas, quienes permitieron identificar la necesidad de una herramienta para mejorar la producción acuícola ecuatoriana.

Finalmente, agradecemos a la ESPOL por mostrarnos que la excelencia se construye a diario con gran esfuerzo y dedicación.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Jakie Melissa Escobar Rivas y Magaly Elizabeth Montachana Chimborazo* y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

Jakie Melissa
Escobar Rivas

Magaly Elizabeth
Montachana Chimborazo

EVALUADORES

Firmado electrónicamente por:
WILFRIDO ERNESTO
ARGUELLO GUEVARA

Wilfrido Arguello Guevara, Ph.D

PROFESOR DE LA MATERIA

Firmado electrónicamente por:
BONNY NARCISA
BAYOT ARROYO

Bonny Narcisa Bayot Arroyo, Ph.D.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El camarón *Penaeus vannamei* es el producto acuícola de mayor importancia económica a nivel mundial. La cadena de producción inicia con la selección de los candidatos a reproductores de larvas de camarón. La selección masal es la metodología comúnmente utilizada para la selección de reproductores. Sin embargo, la selección masal no ejerce ningún control sobre la genealogía. Esto a su vez causa depresión consanguínea, que deriva en la pérdida de los valores adaptativos, crecimiento, reproductivos, entre otros, y a la vez genera inexactitud en la estima del talento genético. Frente a esta problemática, se diseñó un índice de selección sintético para caracteres de crecimiento y calidad morfológica para reproductores de camarón, utilizando información genealógica. Se construyó un prototipo de índice sintético multicarácter, para lo cual se registró el peso de cosecha y 28 parámetros de calidad morfológica con repercusión económica para 354 y 646 juveniles provenientes de un cultivo intensivo y de uno semi-intensivo, respectivamente. Adicionalmente, se realizó el genotipado de los 1000 individuos, con el objetivo de estimar el parentesco entre los individuos, correlacionarlo con la variación fenotípica y determinar la heredabilidad de los caracteres medidos. Se construyó un índice de selección sintético basado en los dos caracteres con mayor heredabilidad, que integró efectos fijos, genealogía, parámetros genéticos y corrección por parámetros ambientales (sistema de cultivo y sexo), mediante la metodología Best Lineal Unbiased Prediction (BLUP). Los resultados de este trabajo pueden ser adaptado a la mayoría de los modelos económicos y productivos de las empresas del Ecuador.

Palabras Clave: Índice de selección, genealogía, talento genético, depresión consanguínea, *Penaeus vannamei*.

ABSTRACT

The Penaeus vannamei shrimp is the world's most economically important aquaculture product. The production chain begins with the selection of candidates for shrimp larvae breeders. Mass selection is the commonly used methodology for selection of breeders. However, that method does not exercise any control over genealogy. This, in turn, causes consanguineous depression, which results in the loss of adaptive values, growth, reproductive values, among others, and at the same time generates inaccuracy in the estimation of genetic talent. In order to face this problem, this project designed a synthetic selection index for growth traits and morphological quality for shrimp breeders, using genealogical information. A multi-character synthetic index prototype was built, for which the harvest weight was determined, and 28 morphological quality parameters were recorded with economic repercussions for 354 and 646 juveniles from an intensive and a semi-intensive culture, respectively. Additionally, the 1000 individuals were genotyped, in order to estimate the kinship between the individuals, correlate it with the phenotypic variation and determine the heritability of the measured characters. A synthetic selection index was constructed based on the two characters with the highest heritability, which integrated fixed effects, genealogy, genetic parameters and correction for environmental parameters (culture system and sex), using the Best Lineal Unbiased Prediction (BLUP) methodology. The results of this work can be adapted to most of the economic and productive models of companies in Ecuador.

Keywords: *Selection index, genealogy, genetic talent, blood depression, Penaeus vannamei.*

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES 7
ABSTRACT II
ÍNDICE GENERAL III
ABREVIATURAS V
SIMBOLOGÍA VI
ÍNDICE DE FIGURAS VII
ÍNDICE DE TABLAS VIII
CAPÍTULO 1 9
1. INTRODUCCIÓN 9
1.1 Descripción del problema 10
1.2 Justificación del problema 11
1.3 Objetivos 12
1.3.1 Objetivo General 12
1.3.2 Objetivos Específicos 12
1.4 Marco teórico 12
1.4.1 Mejora genética en Acuicultura 12
1.4.2 Mejoramiento genético en Ecuador 13
1.4.3 Selección genética 14
1.4.4 Índice de selección 14
1.4.5 Metodología BLUP 14
1.4.6 Heredabilidad 15
1.4.7 Depresión consanguínea 15
1.4.8 Selección masal o individual 16
CAPÍTULO 2 18
2. Metodología 18

2.1 Selección masal 18
2.1.1 Protocolo de selección masal de reproductores de camarón.....19
2.2 Selección genética 20
2.2.1 Procedimiento para el diseño de un índice de selección sintético 21
2.3 Evaluación de las alternativas 22
CAPÍTULO 3.....25
3 Resultados Y ANÁLISIS 25
3.1 Determinación del índice de selección sintético 25
3.1.1 Material biológico 25
3.1.2 Genotipado 26
Caracterización morfológica 26
3.2 Análisis estadístico 28
3.3 Prototipo del Índice de Selección Sintético Multicarácter 29
3.3.1 Resultados preliminares de la aplicación del ISS en individuos pertenecientes a un programa de mejora genética 31
3.3.2 Cálculo del índice.....33
3.4 Análisis de costos.....33
3.4.1 3.4 Análisis de beneficios de utilizar un Índice de selección .....**Error! Bookmark not defined.**
CAPÍTULO 4.....35
4. Conclusiones Y Recomendaciones 35
4.1 Conclusiones 37
4.2 Recomendaciones 38
BIBLIOGRAFÍA 40
ANEXOS.....42

ABREVIATURAS

ADN	Ácido desoxirribonucleico
AHPND	Necrosis hepatopancreática aguda
BLUP	Best Lineal Unbiased Prediction
CAT	Center Aquaculture Technologies
CNA	Cámara Nacional de Acuacultura
IHHNV	Virus de la necrosis hipodérmica y hematopoyética infecciosa
ISS	Índice de Selección Sintético
ISSM	Índice de Selección Sintético Multicaracter
PL	Postlarva
PMG	Programas de mejora genética
SNPs	Single nucleotide polymorphism
WSSV	Virus del síndrome de la mancha blanca

SIMBOLOGÍA

µL	Microlitro
cm	Centímetro
g	Gramos
kg	Kilogramos
L	Litro
m^2	Metro cuadrado
m^3	Metro cúbico
mg	Miligramo
mm	Milímetro
ng	Nanogramo
nm	Nanómetro
ppm	Partes por millón
T	Toneladas
V	Volumen
W	Peso

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Pirámide de la industria acuícola mostrando la cadena del proceso de producción del camarón (Afonso, 2019). 11
Figura 2.1 Distribución normal de los pesos de una población de reproductores de camarón, formando la campana de Gauss de una distribución normal, con los pesos de los individuos más grandes distribuidos en la cola superior derecha. 19
Figura 3.1 Criterios para medir la calidad morfológica de los candidatos a reproductores: (1) longitud total; (2) longitud del cefalotórax y cada segmento abdominal; (3) ancho del cefalotórax y cada segmento abdominal; (4) altura del cefalotórax y cada segmento abdominal. Fuente: Autores.....28

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Valores de heredabilidades de acuerdo con el tipo de carácter (Ciappesoni, Pravia, Ravagnolo, & Aguilar, 2004).....15
Tabla 1.2 Efectos de la consanguinidad sobre algunos caracteres productivos en especies domésticas (Galeno, 2019).....16
Tabla 2.1 Criterios ponderados para determinar la mejor alternativa de selección de reproductores. 23
Tabla 2.2 Puntuaciones asignadas a los métodos de selección de reproductores masal y genética aplicando un índice de selección sintético. 24
Tabla 3.1 Promedio de puntuaciones obtenidas para los métodos de selección de reproductores de camarón masal y genética aplicando un índice de selección sintético. 25
Tabla 3.2 Parámetros de medición para la caracterización morfológica de camarón. El volumen de cada segmento abdominal = LS_i * AS_i * HS_i.....27
Tabla 3.3 Covarianzas (COV) fenotípicas (P) y genotípicas (G) de los caracteres volumen del cuarto segmento abdominal (v4s) y peso a la cosecha (Pc).....31
Tabla 3.4 Costos para el desarrollo del índice de selección sintético multicarácter (ISSM) para reproductores de camarón 34

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El camarón es el producto acuícola de mayor importancia económica a nivel mundial. Ecuador es el segundo país exportador de camarón de cultivo más grande a escala global, tras India (Alvarado, 2020), y a nivel nacional es el primer producto no petrolero de exportación. Entre todos los países productores, el camarón ecuatoriano destaca en los mercados internacionales por su calidad. Sin embargo, para mantener esta posición a nivel mundial es imprescindible mejorar continuamente los procesos de toda la cadena productiva.

La cadena de producción de camarón inicia con la selección de los candidatos a reproductores de larvas de camarón. La selección más común es la masal, que se realiza en las granjas de engorde luego de un tiempo de cultivo que generalmente dura entre 90 y 120 días. Cumplido ese tiempo se cosecha la piscina cuya población presentó el mejor crecimiento, supervivencia y ausencia de eventos relacionados a salud. Sobre esta selección se realiza una evaluación de la calidad morfológica, estado de salud y peso de cada camarón. Este tipo de selección ha dado buenos resultados en Ecuador, permitiendo que la producción alcance exportaciones de 635 mil toneladas entre enero y diciembre del 2019 (CNA, 2019).

El sistema de cultivo utilizado en Ecuador es en su mayoría extensivo, con densidades de siembra entre 6 y 12 camarones/m^2, llegando a utilizar más de 175 mil hectáreas de producción, y extendiéndose a lo largo de la costa, zona continental y manglares del país. El Acuerdo Ministerial N° 1391 establece que no se cederá más concesiones para el cultivo de este crustáceo, puesto que implica un impacto ambiental por la destrucción de ecosistemas de manglares (Armijos, 2015). Ante la perspectiva de no poder crecer en extensión geográfica, el sector camaronero ha tenido que invertir en la mejora de los procesos de alimentación, nutrición, salud y mejora genética, para lograr una producción más sustentable y mantener su liderazgo en el mercado global. La selección masal es el tipo de selección de reproductores, y es el más usado en el Ecuador, pero tiene la desventaja que, al ser

basada en una selección a nivel fenotípica e individual, se originan inexactitudes sobre las posibles respuestas del ciclo biológico del individuo.

1.1 Descripción del problema

La producción de camarón es un proceso cíclico que inicia con la selección de reproductores, que son la materia prima para la obtención de nauplios (semilla) de camarón. Estos son enviados al laboratorio para la cría de las larvas, para luego finalmente ser enviados al engorde en camaroneras. El método de *selección masal* utilizado para evaluar a los candidatos a reproductores de camarón es relativamente fácil y muy común en Ecuador. Sin embargo, este método no ejerce ningún control sobre la genealogía. Dado que, este tipo de selección no considera la información genética de los ascendientes, tiene el inconveniente de que no se puede predecir el comportamiento de la progenie, lo que determina que sea una selección netamente fenotípica.

La falta de control sobre la genealogía da paso a la depresión consanguínea provocada por el apareamiento frecuente entre parientes. La depresión consanguínea se traduce en la pérdida de valores adaptativos de supervivencia, fecundidad, crecimiento, entre otros, debido a la expresión de alelos recesivos heredados de los progenitores emparentados (Sánchez, 2007). Otra gran problemática de la selección masal es la inexactitud en la estima del talento genético de los reproductores, éste último definido como la habilidad que tienen los progenitores para transmitir genes superiores a su descendencia. La inexactitud de la estimación del talento genético impide el mejoramiento productivo del camarón, Por lo tanto, la selección masal no es una herramienta eficiente para evaluar el talento de un individuo, ya que sólo usa información del mismo, dejando de lado la de sus parientes. Si el Ecuador sigue con este tipo de selección de reproductores, se recaerá en serios problemas de consanguinidad y pérdida absoluta del talento genético. Esto puede incluir a genes ligados a crecimiento, calidad morfológica, supervivencia, entre otros caracteres de interés para las empresas camaroneras.

1.2 Justificación del problema

La producción de camarón *Penaeus vannamei* es un pilar fundamental en la economía ecuatoriana, al liderar la lista de productos de exportación no petroleros del país. El 67% del camarón ecuatoriano se exporta al mercado asiático y el restante 33% se exporta a EEUU, Europa y América. En 2019 la producción de camarón creció en un 25%, a pesar que el precio disminuyó en los últimos 25 meses (CNA, 2019). Las exigencias de mantener la calidad del producto en el mercado internacional, la alta variación de precios en el mercado internacional, la constante competencia con otros mercados, el incremento de precios en ciertos insumos y prohibiciones para extender las hectáreas de cultivo de camarón, entre otros factores, direccionan al sector camaronero a la constante mejora de los procesos de producción. Dado que, la producción de larvas (semillas), afecta todos los estratos productivos del sector camaronero (Figura 1.1), es vital establecer procesos eficaces para esta etapa de producción, la cual depende directamente del correcto cruce de reproductores. El diseño de un índice de selección de reproductores basado en la información de la genealogía (selección genética de reproductores) constituye una alternativa a los programas de *selección masal* y representa una contribución significativa a la sostenibilidad de la industria camaronera ecuatoriana.

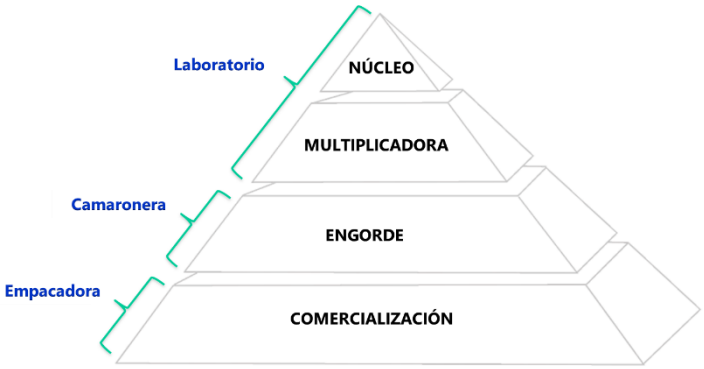


Figura 1.1 Pirámide de la industria acuícola mostrando la cadena del proceso de producción del camarón (Afonso, 2019).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un índice de selección sintético con caracteres de crecimiento y calidad morfológica para reproductores de camarón *Penaeus vannamei* dirigido al modelo de producción de cultivo en Ecuador, utilizando fuentes de información genealógica.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar y medir los parámetros de calidad morfológica y de crecimiento de reproductores cultivados en dos sistemas de cultivo que tengan repercusión sobre la producción y economía de la empresa.
- Implementar la metodología BLUP (Best Lineal Unbiased Prediction), como herramienta para corregir los parámetros genéticos del efecto fenotipo ambiente.
- Calcular el índice de selección para los caracteres morfológicos y de crecimiento utilizando una matriz de parámetros genéticos previamente corregidos por BLUP.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Mejora genética en Acuicultura

El sector acuícola ha logrado grandes avances de productividad gracias a programas de mejora genética (PMG), que han sido dirigidos en su mayoría a peces. Los peces mejorados genéticamente crecen más rápido y aprovechan de forma más eficiente el alimento. Además, la mejora se puede extender hacia resistencia a enfermedades, logrando así disminuir el uso de farmacéuticos. Otra ventaja que ofrece la genética es la alteración reproductiva de ciertas especies, al incrementar la tasa de fecundidad debido al desarrollo de individuos estériles cuya energía está netamente dirigida a crecimiento. La clara ventaja de utilizar un PMG es la conservación de la diversidad genética de gran valor que poseen las especies (FAO, 2009).

Entre las especies de interés económico para la acuicultura están el salmón del atlántico, el bagre de canal, carpas, dorada y la tilapia. Esta última ha sido extensamente investigada puesto que es la segunda especie más cultivada en el

mundo. En su primera etapa (1996) y durante tres años se logró una mejora con las ganancias genéticas de: 10,4 % de peces sin mancha, 8-21 % en largo y 5-25 % en peso (Damas, Portales, Dorado, & Días, 2015). Actualmente, la genética en la acuicultura se aplica en distintas áreas, entre las que se encuentran estudios de diversificación genética de especies en bancos de confinamiento natural para la obtención de stock de reproductores, control y manejo de reproducción, estudios de trazabilidad y, estructura y distribución de poblaciones naturales.

1.4.2 Mejoramiento genético en Ecuador

La mejora genética de camarón en Ecuador es liderada por la empresa Texcumar S.A. (San Pablo, Península de Santa Elena). Desde el año 1999, se ha realizado selección genética sobre la producción de nauplios y larvas a través de un programa de selección masal y análisis de enfermedades y de microsatélites para medir las distancias genéticas y niveles de consanguinidad en lotes de reproductores provenientes de granjas camaroneras (Rocha, TEXCUMAR, 2011). En 2011 la empresa producía 100 millones de nauplios al día, y nueve años después luego de la implementación de diferentes estrategias de genética llegaron a producir 350 millones de nauplios al día, lo que se tradujo en un crecimiento en ese periodo de 3.5 veces (Rocha, Selecćon genómica en camarón: Posibles aplicaciones en Ecuador., 2020).

La empresa Biotecnología y Genética Marina (BIOGEMAR S.A.) es una empresa ecuatoriana dedicada a la producción de postlarvas de camarón bajo condiciones de cultivo amigables con el medio ambiente y el consumidor. Actualmente cuenta con la certificación de Naturland y GLOBAL G.A.P. En el 2014 esta empresa y la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC) suscribieron un acuerdo específico para el desarrollo Tecnológico y la Transferencia de Conocimiento entre ambas corporaciones para la implementación de un PMG de camarón *P. vannamei*. El proyecto consiste en integrar la selección genética de reproductores élite de camarón en procesos de producción ya existentes, sin variar el modelo de negocio de la empresa (IPAC, 2014).

1.4.3 Selección genética

La selección genética es un método que selecciona animales candidatos a reproductores basándose en la información de su genealogía, es decir, basados en el conocimiento del núcleo familiar y progenitores de los animales candidatos. Como criterio de selección, se identifican los animales que presenten un valor genotípico elevado para utilizarlos como padres de la nueva generación. Este tipo de selección permite tener un progreso genético, ya que se seleccionarán solo los individuos que presenten una alta superioridad genética, con los cuales se tendrá una exactitud de la estimación de sus valores genotípicos (Ciappesoni, Pravia, Ravagnolo, & Aguilar, 2004).

1.4.4 Índice de selección

Un índice de selección genética estima el valor genético de un individuo para uno o más caracteres. Es un cálculo predictivo que utiliza información de la genealogía, el rendimiento productivo, los efectos ambientales, entre otros. Mientras más alta es la heredabilidad de estos caracteres, la estimación del índice será más exacta. Además, para mejorar la exactitud del índice se consideran los factores ambientales que están relacionados directamente con la producción. Por tanto, los parámetros productivos medidos a partir de los caracteres estudiados se corrigen por los efectos ambientales, para esto se utiliza el método de Best Lineal Unbiased Prediction (BLUP), el cual es un método de predicción lineal no sesgada (Génétique, 2011).

1.4.5 Metodología BLUP

La metodología BLUP es un modelo lineal mixto de análisis de varianza, que se basa en la relación lineal que hay entre el genotipo y fenotipo, corrigiendo para los efectos ambientales. Este método permite realizar una valoración genética a los individuos de una población, corrige los efectos fijos y utiliza toda la información de parentesco que tienen cada individuo para darle un valor genético a cada animal (Gutiérrez, 2010).

1.4.6 Heredabilidad

Se denomina heredabilidad a la proporción de caracteres fenotípicos que se observan en el animal atribuible a la variación genética, por tanto, implica la ganancia genética que los progenitores heredan a sus progenies (Tabla 1.1). Mientras mayor es la heredabilidad de un carácter, se obtendrá mayor exactitud en la selección de los reproductores con mayor rendimiento, y los descendientes tendrán una mayor ganancia genética (Ciappesoni, Pravia, Ravagnolo, & Aguilar, 2004). Por lo tanto, cuando una heredabilidad es muy baja, es necesario recopilar toda la información de su genealogía para concederle un valor o talento genético a los animales (Gutiérrez, 2010). Un valor de heredabilidad cero indica que todos los animales tienen el mismo valor genético y son idénticos, lo cual muestra una selección incoherente, dado que las ganancias o diferencias observadas se deben al efecto del ambiente.

Tabla 1.1 Valores de heredabilidades de acuerdo con el tipo de carácter (Ciappesoni, Pravia, Ravagnolo, & Aguilar, 2004)

Heredabilidad	Posibilidad de la ganancia genética por selección	Características
<0.1 Baja	Baja	Reproductivas
0.1 a 0.3 Media	Moderada	Heredabilidad de producción ganada
>0.3 Alta	Alta	Crecimiento y morfología

1.4.7 Depresión consanguínea

Es un fenómeno que se presenta por la expresión de alelos indeseables producto de combinaciones homocigotas, el mismo que puede disminuir el desempeño productivo de crecimiento, reproducción, supervivencia y adaptabilidad de los individuos consanguíneos con mayor proximidad parental (Galeno, 2019). La tabla 1.2 muestra como ejemplo algunos efectos negativos sobre algunos caracteres productivos presentados en tres especies domésticas donde se ha observado depresión consanguínea.

Tabla 1.2 Efectos de la consanguinidad sobre algunos caracteres productivos en especies domésticas (Galeno, 2019).

Especie	Raza	Carácter	Depresión consanguínea, expresada como el cambio por cada 1% de incremento de consanguinidad del individuo.
Vacuno lechero	Holstein	Producción de leche Producción de grasa Producción de proteína Score de células somáticas	-29,6 kg -1,08 kg -0,97 kg + 0,012 kg
Vacuno de carne	Hereford	Tasa de preñez Peso al destete (como característica de la madre)	-0,23 % +0,47 kg
Oveja	Corridale	Peso de Vellón Peso al destete Sobrevivencia de cordero	-0,017 kg -0,111 kg - 0,028 %

La consanguinidad puede dar contribuciones positivas. El objetivo es mantener un alto grado de parentesco con los individuos con caracteres superiores sin aumentar el grado de homocigosis.

1.4.8 Selección masal o individual

La selección masal o individual es un método sencillo y de bajo costo que realiza la selección de animales candidatos a reproductores, basándose únicamente en el comportamiento y fenotipo del animal, y con el cual se puede producir ganancia en los caracteres que presenten una mayor heredabilidad (Ponzoni, Nguyen, & Khaw, 2006). Esta selección tiene como criterios de selección a: peso, estado patológico y características morfológicas de los individuos. La selección para el criterio peso consiste de dos fases, donde en una primera fase se seleccionan ejemplares élites de mayor peso en la campana de distribución normal. Actualmente, se seleccionan animales con un peso promedio de cosecha con una media entre 20-21 g (Yugcha, 2020). En tanto que, la segunda fase se realiza aproximadamente a los 180 días de

cultivo, cuando se seleccionan los camarones que alcanzaron talla de reproductores, seleccionando machos con peso mayor a 29-30 g de peso y hembras con peso mayor a 30-35 g (FAO, 2004). El tercer criterio de selección de reproductores en la selección masal se basa en la selección de animales fundamentándose en características visuales del individuo que indiquen una buena calidad morfológica. Tales características son: cuerpo recto, cuerpo sin lesiones, cuerpo sin tumores, apéndices completos, apéndices sin necrosis, exoesqueleto sin lesiones, exoesqueleto sin necrosis, rostrum completo, rostrum recto, branquias limpias, músculo del abdomen limpio de bacterias, músculo sin opacidad y músculo sin estrías (Aguirre, 2000). Cumplidos estos criterios, los animales son trasportados a las salas de maduraciones para cumplir con un proceso de cuarentena de 15-21 días, para luego realizar la selección de individuos basados en el estado patológico. En este proceso se colectan muestras de los animales para hacer análisis microbiológicos y de detección de patógenos por análisis molecular. Sin embargo, esta práctica no es un procedimiento común en los laboratorios de maduración, ya que implica excluir reproductores positivos a los principales patógenos emergentes y re-emergentes del momento: virus del síndrome de la mancha blanca (WSSV), virus de la necrosis hipodérmica y hemapoyética infecciosa (IHHNV) y genes PirA y PirB, codificantes para la toxina causante de la enfermedad de la necrosis hepatopancreática aguda (AHPND). Estos análisis son necesarios al realizar la última fase de selección para aparear a los animales. Con los cruzamientos por selección masal, los rasgos con alta heredabilidad son limitados y existe riesgo de producir altos niveles de consanguinidad debido al cruzamiento entre parientes proveniente de los pocos padres que generan una descendencia mayor. Por tanto, las futuras generaciones tendrán un potencial de diversidad genética baja (Ponzoni, Nguyen, & Khaw, 2006).

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

El primer escalón en el proceso de producción de camarón *P. vannamei* es la reproducción para obtener la semilla, conocida como nauplio, y posterior cultivo hasta obtener post-larvas, que, en el proceso de producción de engorde, serán sembradas en estanques de tierra. El proceso de selección de reproductores es guiado bajo criterios técnicos establecidos por el empresario. En este trabajo se realizó una indagación de campo para la recopilación de información de los métodos de selección en Ecuador y una revisión bibliográfica acerca de las alternativas de selección de reproductores de camarón. Se determinó que el método de selección de reproductores utilizado en Ecuador es la *selección masal.* Mientras que, la selección genética utilizando un índice de selección sintético fue seleccionada como alternativa a la masal. Se establecieron criterios de evaluación ponderados y finalmente se realizó la valoración para las dos alternativas de selección de reproductores, en base a entrevistas a especialistas del área de producción y genética de camarón.

2.1 Selección masal

Este método tiene una estrecha relación entre la proporción de animales seleccionados para progenitores de una población (presión de selección) y la pérdida de la variabilidad genética. Debido a esto se recomienda presiones de selección que van desde 5 al 10%. Presiones más altas aumentan la probabilidad de caer en consanguinidad por cruces con individuos emparentados (Pérez, 2004). La selección masal se basa en la selección de los animales más grandes ubicados en la cola superior de la curva de distribución normal de los pesos de los individuos de una población de camarones (Figura 2.1).

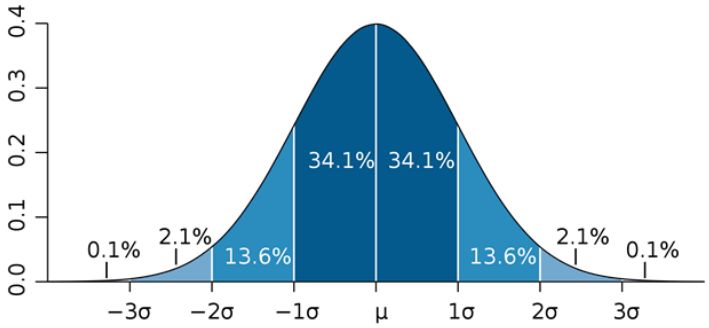


Figura 2.1 Distribución normal de los pesos de una población de reproductores de camarón, formando la campana de Gauss de una distribución normal, con los pesos de los individuos más grandes distribuidos en la cola superior derecha.

A continuación, se detalla el protocolo de selección masal de reproductores obtenido en el campo:

2.1.1 Protocolo de selección masal de reproductores de camarón

1. Efectuar la trazabilidad de la piscina a cosechar, mediante la colección de información de crecimiento, factor de conversión alimenticio, supervivencia, eventos de enfermedades y estado de muda.
2. Realizar un muestreo previo para determinar la distribución de pesos de la población y la presión de selección de reproductores a la cosecha.
3. Programar la fecha de cosecha, preferible en la noche y durante aguajes.
4. Capturar los animales a la cosecha con una red de pesca. Los animales son colocados en tinas con agua en las mismas condiciones de temperatura y salinidad de la piscina. Además, se coloca aeración para proveer suficiente oxígeno (> 5 mg/l) y evitar el estrés de los camarones.
5. Se selecciona una muestra de camarones hembras y de machos para conocer el peso promedio de cada sexo y así seleccionar animales con pesos según la presión de selección seleccionada (entre 5 y 10%).
6. Realizar el filtro de selección por calidad morfológica, indicativo de la salud del animal y por peso basado en la presión de selección.
7. Descartar los camarones con algún defecto físico (golpes, miembros incompletos, deformaciones y poca actividad-letargia).

8. Colocar los animales seleccionados en tanques con aeración a una densidad de entre 1 m^3 y 300 animales/m^3. Machos y hembras se colocan en tanques distintos.
9. Reducir el estrés y metabolismo de los animales (se coloca hielo picado en el agua contenida en los tanques de transporte y llenados con el agua de la piscina de cosecha).
10. Transportar a los animales durante un tiempo máximo de 8 horas, realizando los controles de temperatura y oxígeno cada 2 horas.
11. La recepción de los camarones se la realiza en los laboratorios de maduración donde son colocados en tanques para entrar a etapa de cuarentena, la cual dura entre 15 y 21 días.
12. En los tanques de maduración ciertos laboratorios realizan programas para el control de enfermedades, donde se analiza individualmente cada reproductor para detección de WSSV, IHHNV y genes PirA y PirB, causantes de AHPND. Luego se realiza nuevamente una selección masal basada en calidad morfológica y se descartan los reproductores positivos a estos patógenos.
13. Posteriormente, los reproductores pasan a salas de maduración donde se les administra dieta específica para estimular la madurez sexual y nutrición. Machos y hembras son colocados a razón de 1.4 hembras por cada macho y la cruza se realiza al azar de forma natural sin tener un control sobre los apareamientos. La vida reproductiva de cada animal es alrededor de 90 y 100 días, con una producción, que varía entre 100 mil y 300 mil nauplios por hembra (Tomalá, 2020).

2.2 Selección genética

Dentro de la mejora genética existen herramientas que permiten predecir el talento genético de los individuos para caracteres de interés de una empresa. Los índices de selección sintéticos es una herramienta de la mejora genética muy utilizada para incrementar los volúmenes de producción y mejorar las características de calidad del organismo a ser mejorado genéticamente.

El principal beneficio del uso de esta herramienta radica en la minimización de los efectos de la consanguinidad, que se consigue a través del diseño de

apareamientos, lo que maximiza la exactitud del talento genético de los reproductores.

Mediante una revisión bibliográfica se recopiló la información del proceso y el análisis estadístico que requiere el proceso de una selección genética, el cual se detalla a continuación:

2.2.1 Procedimiento para el diseño de un índice de selección sintético

1. Contratar personal con conocimiento sobre Programas de Mejoramiento Genético (PMG) y suplir de las herramientas necesarias para llevar a cabo los procesos tecnológicos que este programa requiere, lo cual implica inversión. Materiales y equipos para preservar muestras de ácido desoxirribonucleico (ADN) son fundamentales para desarrollar un PMG basado en un índice de selección sintético. Así como, equipos y programas para la obtención, análisis, evaluación y modelamiento de la información recabada en campo. También se necesita personal capacitado y especializado en los procesos de producción para dar asistencia al Profesional a cargo del PMG.
2. Selección de un método de mejora genética que sea aplicable dentro del modelo de procesos de una empresa productora de camarón.
3. Determinar los criterios a los cuales apunta la mejora genética o talento establecidos acorde a las necesidades del cliente.
4. Establecer un método para la obtención de toda la información que sea necesaria para que el índice sea lo más exacto posible.
5. Integrar todas las fuentes de información y análisis estadísticos para la construcción del índice de selección sintético.
6. En base a los resultados del índice, seleccionar a los individuos cuyos talentos sean altos, que implica la selección de los individuos que presentan los valores más altos del índice de selección sintético y más baja consanguinidad.
7. Realizar los apareamientos dirigidos con los reproductores previamente seleccionados.
8. Mantener un control absoluto sobre la trazabilidad de cada familia (cruce), y sus descendientes, los cuales serán evaluados en la siguiente generación.
9. Enviar los nauplios descendientes a los laboratorios de larvas y luego a las granjas camaroneras, para cumplir con el ciclo de engorde e iniciar otra vez el ciclo de selección de reproductores basado en un índice de selección sintético.

2.3 Evaluación de las alternativas

Para determinar la mejor alternativa de selección de reproductores de camarón se realizó entrevistas a tres profesionales del ámbito camaronero: un especialista en mejoramiento genético, un jefe de producción de un laboratorio de producción de nauplios y larvas, y un coordinador de un programa de selección masal. Los profesionales establecieron que los criterios más importantes para la selección de reproductores son: costo de inversión, control de la genealogía, viabilidad y rendimiento productivo. Los profesionales asignaron una ponderación a cada uno de los criterios, obteniéndose las ponderaciones promedias de 20, 30, 15 y 35%, para los criterios de costo de inversión, control de la genealogía, viabilidad y rendimiento productivo, respectivamente (Tabla 2.1). Cada criterio fue categorizado en tres clases, asignando a cada clase un valor de entre 1 y 3, siendo 1 y 3 los valores mínimo y máximo para cada criterio. Los criterios categorizados para evaluar las alternativas de selección de reproductores de camarón son descritos a continuación y resumidos en la Tabla 2.1.

Costo de inversión. Costo de inversión requerido para obtener 1000 camarones reproductores seleccionados por las metodologías masal o genética, y categorizado de acuerdo a si estos costos son menores a $5,000, entre $5,000 y $50,000, o mayor a $50,000.

Control de la genealogía. Variable categórica de control sobre la información genealógica de cada individuo, lo cual garantiza minimizar la consanguinidad y pérdida de la diversidad genética, misma que puede provocar grandes pérdidas económicas a causa de la depresión total del talento de los reproductores. Se incluyó tres categorías (sin control, control medio y control total).

Viabilidad. Complejidad de llevar a cabo cualquiera de los métodos de selección dentro de los procesos de producción establecidos por la empresa, categorizada como: muy complejo, medianamente complejo y sencillo.

Rendimiento productivo. Beneficios por la obtención de reproductores con altos talentos genéticos, y categorizados como medio, bueno y excelente.

Tabla 2.1 Criterios ponderados para determinar la mejor alternativa de selección de reproductores.

Valor	Costo de inversión (20%)	Control de la genealogía (30%)	Viabilidad (15%)	Rendimiento productivo (35%)
1	$ 50,000 -100,000	Sin control	Muy complejo	Medio
2	$ 5,000-50,000	Control medio	Medianamente complejo	Bueno
3	< $ 5,000	Control total	Sencillo	Excelente

Finalmente, los dos métodos de selección de reproductores fueron evaluados por los profesionales acuícolas, puntuando cada criterio de selección y ponderando estas puntuaciones de acuerdo a los valores de ponderación previamente determinados para cada criterio de selección (Tabla 2.2). El método que tuvo la mayor valoración fue escogido como la mejor alternativa de selección de reproductores (Tabla 2.2).

Tabla 2.2 Puntuaciones asignadas a los métodos de selección de reproductores masal y genética aplicando un índice de selección sintético.

	Alternativas de selección de reproductores de camarón											
	Selección Masal						Selección genética aplicando un índice de selección sintético *(ISS)*					
Criterios de selección de reproductores (ponderación)	**Profesional 1**		**Profesional 2**		**Profesional 3**		**Profesional 1**		**Profesional 2**		**Profesional 3**	
	Puntuación	**Puntuación ponderada**	**Puntuación**	**Puntuación ponderada**	**Puntuación**	**Puntuación ponderada**	**Puntuación**	**Puntuación ponderada**	**Puntuación**	**Puntuación ponderada**	**Puntuación**	**Puntuación ponderada**
Costo de inversión (20%)	3	20%	3	20%	2	13%	1	7%	1	7%	2	13%
Control de la genealogía (30%)	1	10%	1	10%	1	10%	3	30%	3	30%	3	30%
Viabilidad (15%)	3	15%	3	15%	3	15%	2	10%	1	5%	2	10%
Rendimiento productivo (35%)	1	12%	2	23%	2	23%	3	35%	3	35%	3	35%
Total	8	57%	9	68%	8	61%	9	82%	8	77%	10	88%

Tabla de puntuaciones obtenidas a partir de entrevistas a profesionales relacionados con la reproducción de camarón.

CAPÍTULO 3

3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Mediante una matriz comparativa se estableció que el método de selección genética de reproductores de camarón aplicando un índice de selección sintético para caracteres de interés económico y productivo de la empresa es la mejor alternativa de selección de reproductores. Este método de selección de reproductores obtuvo un valor ponderado de 82% para los criterios de selección establecidos por los expertos (Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Promedio de puntuaciones obtenidas para los métodos de selección de reproductores de camarón masal y genética aplicando un índice de selección sintético.

Métodos de selección	Promedio de valorizaciones
	Ponderado
Selección masal	62%
Selección genética	82%

3.1 Determinación del índice de selección sintético

Para el diseño del índice es importante determinar los criterios de importancia económica y productiva según las necesidades del cliente. En este estudio se propuso los criterios de crecimiento y calidad morfológica, por ser de principal interés en la producción y reproducción de camarón *P. vannamei*.

3.1.1 Material biológico

Los animales utilizados en el análisis correspondieron a los empleados en un programa de mejora genética, descendientes de una segunda generación (F2). Los reproductores de la primera generación (F1: 262 hembras y 131 machos) generaron familias con igual número de nauplios en las instalaciones de una empresa de Maduración. Los nauplios fueron cultivados en un laboratorio hasta post larva 12 (PL12) en tanques de larvicultura de 33 toneladas.

En este estudio se consideró como *efecto fijo* el sistema de cultivo para engorde, teniendo dos niveles. En el cultivo intensivo se sembró una muestra al azar de 90.000 postlarvas PL12 en tanques cubiertos de geomembrana a una densidad 300 animales/m^2. En el cultivo semi-intensivo, postlarvas PL12 fueron sembradas a una densidad de 30 animales/m^2 en una piscina industrial a baja salinidad (2 ppm), en una camaronera ubicada en Durán, Guayaquil. El segundo efecto fijo que se consideró fue el sexo del camarón (macho o hembra).

A los 93 días de cultivo, considerados a partir de PL12, se tomó una muestra al azar de 354 juveniles provenientes del cultivo intensivo y 646 juveniles provenientes del sistema semi-intensivo. Los animales fueron sacrificados por inmersión en agua con hielo picado, y se realizaron mediciones en fresco de las características morfológicas.

A todos los animales se les extrajo una muestra biológica de pleópodos, que se conservó en *RNAlater* durante 8 horas a 4ºC y posteriormente a temperatura ambiente, hasta su análisis genético. Paralelamente, cada animal fue marcado en el ojo con un código numérico mediante un anillo, y luego conservado mediante congelación a –20ºC.

3.1.2 Genotipado

Para estimar el parentesco entre los individuos y correlacionarlo con la variación fenotípica y así determinar la heredabilidad se realizó el genotipado de los animales. Las muestras de tanto descendientes (F_2) como reproductores (F_1) fueron sometidos a los procesos de extracción de ADN, calidad del ADN, normalización del ADN y genotipado mediante SNP-Array.

3.1.3 Caracterización morfológica

Los descendientes provenientes de ambos sistemas de cultivo fueron descongelados y los 29 parámetros morfológicos descritos en la tabla 3.2 fueron utilizados como criterios para medir la calidad morfológica de los candidatos a

reproductores. Los parámetros morfológicos fueron estimados con un calibrador vernier digital (error ± 0.01 mm).

Tabla 3.2 Parámetros de medición para la caracterización morfológica de camarón. El volumen de cada segmento abdominal = LS_i * AS_i * HS_i.

Parámetros de medición		
Longitud (cm)	Ancho (cm)	Altura (cm)
Longitud total del camarón (LT) Cefalotórax (LC)	Cefalotórax (AC)	Cefalotórax (HC)
1º segmento abdominal (LS1)	1º segmento abdominal (AS1)	1º segmento abdominal (HS1)
2º segmento abdominal (LS2)	2º segmento abdominal (AS2)	2º segmento abdominal (HS2)
3º segmento abdominal (LS3)	3º segmento abdominal (AS3)	3º segmento abdominal (HS3)
4º segmento abdominal (LS4)	4º segmento abdominal (AS4)	4º segmento abdominal (HS4)
5º segmento abdominal (LS5)	5º segmento abdominal (AS5)	5º segmento abdominal (HS5)
6º segmento abdominal (LS6)	6º segmento abdominal (AS6)	6º segmento abdominal (HS6)

El volumen de cada segmento abdominal fue calculado como la multiplicación entre longitud, ancho y altura (LS_i * AS_i * HS_i). Mientras que, el volumen total del abdomen (VTA) se estimó sumando los volúmenes de cada segmento mediante la fórmula 3.1

$$VTA = \sum (LS_i * AS_i * HS_i) \quad (3.1).$$

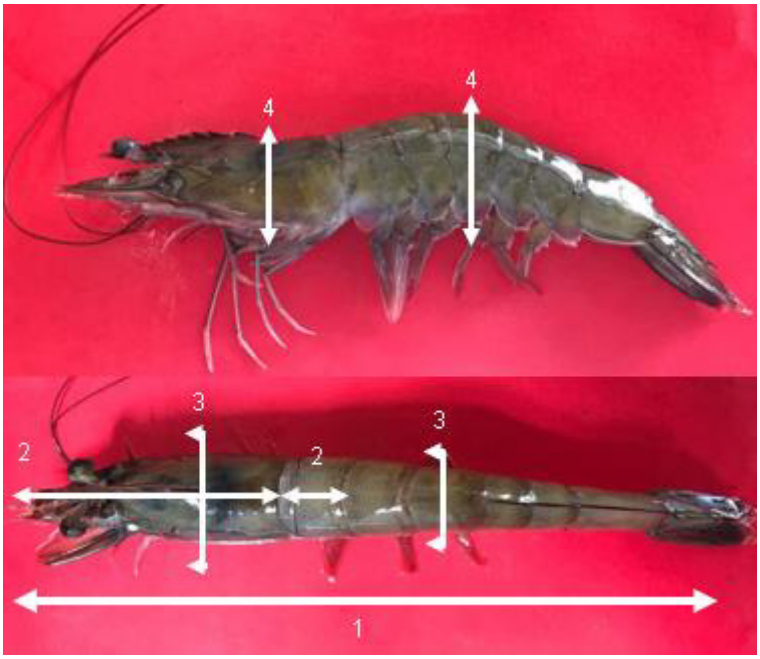


Figura 3.1 Criterios para medir la calidad morfológica de los candidatos a reproductores: (1) longitud total; (2) longitud del cefalotórax y cada segmento abdominal; (3) ancho del cefalotórax y cada segmento abdominal; (4) altura del cefalotórax y cada segmento abdominal. Fuente: Autores.

3.2 Análisis estadístico

El efecto de los dos sistemas de cultivo (intensivo y semi-intensivo) y sexo (macho y hembra) de los candidatos a reproductores sobre cada uno de los caracteres de calidad morfológica y crecimiento fue estimado mediante el modelo lineal general (Ortiz & Montenegro, 2005) resumido en la ecuación 3.2. La normalidad y homocedasticidad de los datos fueron evaluados para los dos sistemas de cultivo y sexo (macho y hembra) de los candidatos a reproductores.

$$Y_{ijk} = \mu + S_i + T_j + I_{ij} + e_{ijk} \quad (3.2)$$

Donde, Y_{ijk} es el valor de los caracteres de calidad morfológica y de crecimiento de cada animal μ es la media total de la población, S_i es el efecto fijo del sexo, T_j es el efecto fijo del sistema de cultivo (intensivo y semi-intensivo), I_{ij} es la interacción entre el sexo y el sistema de cultivo y e_{ijk} es el error residual.

Para la estima de parámetros genéticos (heredabilidades, covarianzas genéticas y fenotípicas) de los caracteres objetivos de la selección se utilizó el siguiente Modelo Mixto (Rencher & Schaalje , 2008).

$$y = X\beta + Zu + \varepsilon \qquad (3.3)$$

Donde *y* es el dato del carácter morfológico, *β* es una sumatoria de los efectos fijos siembra (variable categórica para 4 días de siembra), sistema de cultivo (intensivo y semi-intensivo), estación de desove y tanque de desove, *u* es el efecto animal aleatorio y *ε* el error residual.

3.3 Prototipo del Índice de Selección Sintético Multicarácter

Para diseñar el Índice *de Selección Sintético Multicarácter* (ISSM) se llevó a cabo el siguiente proceso:

1. Definición de los caracteres objetivos de la selección que se desearon mejorar genéticamente (A_1 , A_2 , A_3 ... A_n estos pueden ser peso, largo, volumen de carne de cola, etc.).
2. Estimación de los valores económicos (v_1 , v_2 , v_3 ... v_n) de cada objetivo ¨A_n¨ de la selección, para la determinación del *Valor Genético Aditivo Conjunto* (H) (Gutiérrez, 2010). Donde H representa la sumatoria del valor genético de los caracteres objetivos de la selección ponderados por su respectivo valor económico.

$$H = v_1A_1 + v_2A_2 + v_3A_3 + \ldots + v_nA_n$$

3. Definición de los caracteres de criterios de la selección (F_1 , F_2 , F_3 ... F_n), que son los caracteres que se utilizará para seleccionar los reproductores con los cuales se alcanzará los caracteres objetivos de la selección. Para el caso del presente diseño, los criterios de selección escogidos son de crecimiento y de calidad morfológica.
4. Estimación de los pesos relativos de cada criterio de selección (b_1 , b_2 , b_3 ... b_n), donde b_i es la importancia relativa para cada criterio de selección ¨F_n¨. La sumatoria de los criterios de selección ponderados establecen el *Criterio de selección conjunto* (K) (Gutiérrez, 2010) y determina el índice de selección sintético multicarácter.

$$K = b_1F_1 + b_2F_2 + b_3F_3 + \ldots + b_nF_n$$

4.1 Aplicación de ecuaciones normales, definidas por el número de caracteres objetivos (columnas) y caracteres criterios (filas).

4.2 Determinación de los valores de las covarianzas fenotípicas entre criterios de selección, así como las covarianzas genéticas entre criterios y objetivos de la selección. Para la obtención de las covarianzas fue necesario obtener las heredabilidades de cada carácter. Además, para maximizar la correlación entre el valor aditivo conjunto (H) de los objetivos reproductivos de la selección y el criterio de selección conjunto (K) se igualaron ambos modelos lineales.

$$b_1 COV(F_1F_1) \dots\dots\dots + b_n COV(F_1F_n) = v_1 COV(A_1A'_1) \dots\dots\dots + v_m COV(A_1A'_m)$$
$$b_1 COV(F_2F_1) \dots\dots\dots + b_n COV(F_2F_n) = v_1 COV(A_2A'_1) \dots\dots\dots + v_m COV(A_2A'_m)$$

$$b_1 COV(F_nF_1) \dots\dots\dots + b_n COV(F_nF_n) = v_1 COV(A_nA'_1) \dots\dots\dots + v_m COV(A_nA'_m)$$

Donde,

n = número de criterios de selección

m = número de objetivos de selección

v_k= valor económico neto para el objetivo k

COV (F_i F_j) = covarianza entre los criterios de selección i y j.

COV (A_i A_k) = covarianza entre los valores genéticos aditivos del criterio i y el objetivo k.

i = 1 hasta n

j = 1 hasta n

k = 1 hasta m

4.3 Los sistemas de ecuaciones anteriores pueden ser expresados matricialmente como Pb = Gv. Donde, P es la matriz de covarianza fenotípica de los criterios de selección y b son sus respectivos pesos relativos, y G es la matriz de covarianza genotípica entre objetivo y carácter de la selección, con v como los respectivos valores económicos.

$$\begin{pmatrix} COV(F_1F_1) & COV(F_1F_n) \\ COV(F_2F_1) & COV(F_2F_n) \\ COV(F_nF_1) & COV(F_nF_n) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} COV(A_1A'_1) & COV(A_1A'_m) \\ COV(A_2A'_1) & COV(A_2A'_m) \\ COV(A_nA'_1) & COV(A_nA'_m) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_n \end{pmatrix}$$

4.4 Deducción del vector columna de los pesos relativos (b_i). Para resolver el índice de selección sintético multicarácter se necesita despejar la matriz b, que se realiza mediante la determinación la matriz inversa de P, de tal forma que, $b = P^{-1} Gv$

4.5 Determinación del Criterio de selección conjunto o Índice de selección sintético multicarácter.

$$K = b_1F_1 + b_2F_2 + b_3F_3 + \ldots + b_nF_n$$

4.6 Desarrollo de la matriz de parentesco, así como la matriz fenotípica o de rendimiento donde se registra el sexo, peso y el índice de selección sintético multicarácter.

4.7 Organización de los individuos de mayor a menor índice para identificar los reproductores con mejores talentos genéticos.

3.3.1 Resultados preliminares de la aplicación del ISS en individuos pertenecientes a un programa de mejora genética

Considerando que los caracteres volumen del cuarto segmento (*vs4)* y peso a la cosecha (Pc) fueron los dos caracteres que presentaron las mayores heredabilidades, se diseñó un prototipo de ISS para estos dos criterios de selección. Los elementos de las matrices de covarianza fenotípica y genotípicas para estos dos caracteres son mostradas en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Covarianzas (COV) fenotípicas (P) y genotípicas (G) de los caracteres volumen del cuarto segmento abdominal (v4s) y peso a la cosecha (Pc)

Covarianza fenotípica (P)		Covarianza genotípica (G)	
COV (Pv4s, Pv4s)	0.26521	COV (Av4s, Av4s)	0.11726
COV (Pv4s, PC)[1]	0.39127	COV (Av4s,Ac)[1]	0.39308
COV (Pv4s, PC)[2]	0.39127	COV (Av4s,Ac)[2]	0.39308
COV (PC, PC)	5.66984	COV (Ac,Ac)	1.31769

Los parámetros genéticos se obtuvieron mediante la aplicación de la metodología BLUP para corregir el efecto fenotipo ambiente.

Para los siguientes cálculos se considera que *"v"* es el factor que define a la importancia económica relativa. Para este diseño, el volumen del cuarto segmento (*vs4)* y el peso a la cosecha (*Pc)* son a la vez considerados como criterios y objetivos de selección.

$$\boldsymbol{Pb} = Gv, y\ a\ su\ vez;\ b = P^{-1}Gv$$

$$\boldsymbol{P} = \begin{pmatrix} cov\ (Pv4s, Pv4s) & cov\ (Pv4s, Pc) \\ cov\ (Pv4s, Pc) & cov\ (Pc, Pc) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.26521 & 0.39127 \\ 0.39127 & 5.66984 \end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{P^{-1}} = \begin{pmatrix} 4.197 & -0.289 \\ -0.2896 & 0.196 \end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{G * v} = \begin{pmatrix} cov\ (Av4s, Av4s) & cov\ (Av4s, Ac) \\ cov\ (Av4s, Ac) & cov\ (Ac, Ac) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v4s \\ Pc \end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{G * v} = \begin{pmatrix} 0.11726 & 0.39308) \\ 0.39308 & 1.31769 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 5 \end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{G * v} = \begin{pmatrix} 2.08266 \\ 6.98153 \end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{b}\ =\ P^{-1}Gv = \begin{pmatrix} 4.197 & -0.289 \\ -0.2896 & 0.196 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2.083 \\ 6.982 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6.720 \\ 0.767 \end{pmatrix}$$

Donde,

Pb: Matriz de covarianza fenotípicas, multiplicada por los pesos relativos

b de cada criterio de selección (importancia relativa de cada criterio de selección)

Gv: Matriz de covarianza de los caracteres genéticos volumen del cuarto segmento abdominal y peso a la cosecha, multiplicada por los valores económicos v de cada objetivo, asignado por el empresario. Para el índice desarrollado en este trabajo, los expertos asignaron los valores de 1 para el volumen del 4to segmento y 5 para el peso a cosecha.

3.3.2 Cálculo del índice

El ISSM utilizando los criterios de selección volumen del cuarto segmento (vs4) y el peso a la cosecha (Pc) es expresado más abajo. Donde F_1 es el valor del cuarto segmento abdominal medido y F_2 corresponde al peso a la cosecha de cada animal, y b_1 y b_2 son determinados de acuerdo a los cálculos anteriores.

$$ISSM = b_1F_1 + b_2F_2$$

El resultado de aplicar esta metodología es una lista de valores de ISSM para cada reproductor dentro del grupo de reproductores potencialmente a ser seleccionado. Es decisión del empresario seleccionar el número de camarones con los ISSM más altos (presión de selección). Posterior a ello se identifica el parentesco entre individuos, indicando el valor de la consanguinidad de cada posible apareamiento.

3.4 Análisis de costos

Los costos de inversión estimados para el desarrollo de un índice de selección sintético basado en caracteres de crecimiento y calidad morfológica para la selección de 1000 reproductores es detallado en la Tabla 3.4. Se considera que, para cualquiera de los dos sistemas de cultivo analizados se requiere de un técnico, tres auxiliares y un especialista en genética (Tabla 3.4). El costo total se compone del costo de personal ($4,277.15), costos de conservación de muestras ($1,680), costo de extracción de DNA y genotipado ($9,920) y costo por envío de muestras ($198.03). A partir de todos estos rubros se obtuvo que el desarrollo de un índice de selección sintético multicarácter para 1000 reproductores tiene un costo total estimado de $16,025.18, y por reproductor corresponde a $16.03.

Tabla 3.4 Costos para el desarrollo del índice de selección sintético multicarácter (ISSM) para reproductores de camarón

Costos de personal	Unidad	$ Costo unitario	$ Costo total
Técnicos	1	$ 100.00	$ 700.00
Auxiliares	3	$ 23.33	$ 489.93
Especialista en genética	1	$ 326.76	$ 2,287.32
Anillos con numeración para identificación de muestra	1000	$ 0.05	$ 50.00
Auxiliares ára medición de caracteres morfológicos	2	$ 23.33	$ 699.90
			$ 4,227.15
Costos de conservación de muestras			
Tubos de Microcentrifuga (unidad)	1000	$ 0.50	$ 500.00
RNA later (ml)	1000	$ 1.18	$ 1,180.00
			$ 1,680.00
Costos extracción y genotipado			
Extracción (muestra)	1000	$ 2.92	$ 2,920.00
Genotipado (muestra)	1000	$ 7.00	$ 7,000.00
			$ 9,920.00
Envío de muestras por DHL			**$ 198.03**
Costo total $			**$ 16,025.18**
Costo por muestra $			**$ 16.03**

Para el cálculo de los costos se consideró 15 días de trabajo para el personal que realiza medición de los caracteres morfológicos y para las otras actividades se consideró 7 días.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La aplicación de índices de selección multicarácter con integración de información genealógica permite una selección más acertada sobre las características productivas determinadas por la empresa. La implementación de un índice de selección genética en un programa de mejoramiento puede redundar en un mejor desempeño del crecimiento y de la calidad morfológica a largo plazo, disminuyendo la presentación de problemas relacionados con la pérdida de valores adaptativos. Esto a su vez implicará el mantenimiento de un nivel productivo competitivo en el mercado de exportación, beneficiando la rentabilidad de la empresa.

La fortaleza principal que ofrece esta alternativa es que, una vez establecido el índice, éste puede modelarse acorde a las necesidades de la empresa. Lo cual es posible por la flexibilidad de poder cambiar los criterios y objetivos de importancia económica y productiva de la empresa, acoplándose así a cualquier cambio en que pudiera presentarse frente a las exigencias del mercado internacional, incluso en la búsqueda de la diversificación de mercado. Además, esta propuesta integra la mejora genética en acuicultura en el modelo de producción y negocio de las empresas de camarón en el Ecuador, utilizando como modelo a empresas de maduración, larvicultura y engorde consolidadas del sector. Por lo que de tener éxito el proyecto, podría extenderse con facilidad a otras empresas del sector, acercado de una manera sencilla la mejora genética en camarón a través de la mejora de los procesos y la consideración de los efectos fijos de su producción en el Ecuador.

La principal limitación que pudiera presentarse son los costos de inversión, ya que la propuesta requiere la integración de información genealógica obtenida de la aplicación de un programa de mejora genética que implica inversiones altas, en tecnología, infraestructura y contratación de especialistas en genética. Sin embargo, es importante recalcar que los beneficios están por encima de los costos

de inversión ya que se pueden incluso duplicar la producción en apenas 3.5 años (Afonso, 2019).

En tal sentido, la ganancia de peso que se puede obtener en los reproductores al aplicar el índice de selección sintético con respecto al método de selección masal, incrementará de generación tras generación. La simulación de tres escenarios: selección de reproductores usando información genealógica de 6, 25 y 30 parientes (ISS (6), ISS (25) e ISS (30)). Si se utilizara información genealógica de 30 parientes - ISS (30), en la primera generación se observaría una ganancia de peso adicional de 6.60 % comparada con la selección masal. Para la séptima generación la ganancia en peso sería del 33.09 %. Es decir que, cuando con la séptima generación se obtiene reproductores de 34.54 g mediante la selección masal, aplicando el índice de selección sintético usando información genealógica de 30 parientes - ISS (30), se obtendría reproductores de 45.97 g. (Tabla 4.1 y Figura 4.1).

Tabla 4.1 Simulación de ganancia genética del carácter peso (g) en distintas generaciones

Generación	Métodos de selección				Tasa de ganancia genética (ISS/Masal) (%)		
	Masal (g)	ISS (6) (g)	ISS (25)(g)	ISS (30) (g)	ISS (6) / Ind.	ISS (25) / Ind.	ISS (30) / Ind.
0	23.11	23.11	23.11	23.11	—	—	—
1	24.74	25.05	25.76	26.37	1.25	4.11	6.60
2	26.37	26.99	28.41	29.64	2.35	7.71	12.38
3	28.01	28.93	31.05	32.90	3.31	10.89	17.49
4	29.64	30.88	33.70	36.17	4.17	13.72	22.03
5	31.27	32.82	36.35	39.43	4.94	16.25	26.10
6	32.90	34.76	39.00	42.70	5.64	18.53	29.77
7	34.54	36.70	41.65	45.97	6.27	20.60	33.09

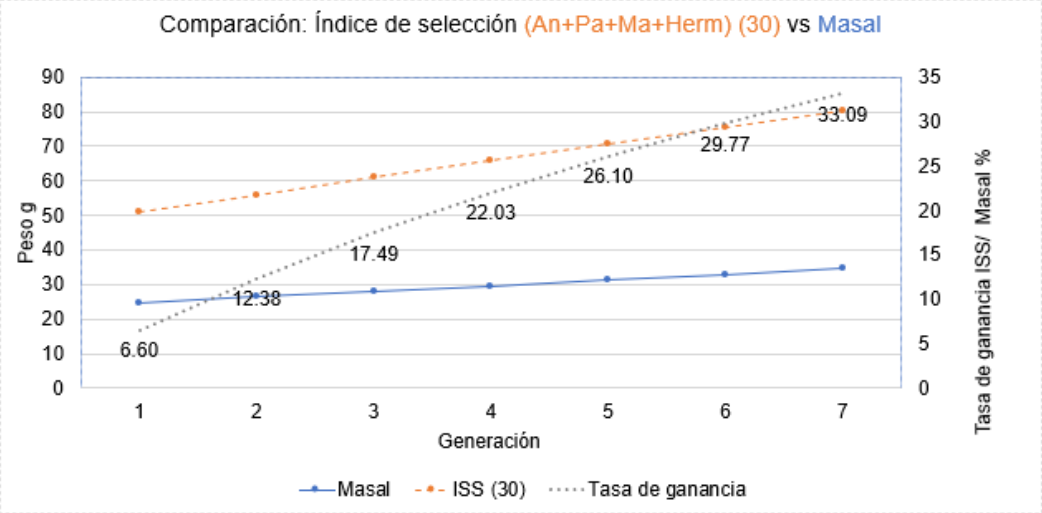


Figura 4.1 Tasa de ganancia genética (peso de los reproductores) aplicando selección masal y selección mediante índice de selección sintético usando información genealógica de 30 parientes - ISS (30) (Autores, 2020).

4.1 Conclusiones

Después de realizar indagaciones acerca de los métodos de selección de reproductores en Ecuador, se realizó una matriz comparativa de la selección masal y la selección genética, la cual mostró a la selección genética con un valor ponderado establecido por los expertos de 82%, siendo superior a la sección masal, que obtuvo un valor de un 62% para los criterios establecidos. Obtenidos estos valores se elaboró como mejor alternativa el diseño de un índice de selección sintético multicarácter, que integró caracteres de calidad morfológica y de crecimiento de reproductores de camarón *P. vannamei* manteniendo un control de la genealogía. Se midieron los parámetros de crecimiento a peso de cosecha y se determinaron y midieron los parámetros de calidad morfológica con repercusión económica para la empresa, siendo estos la longitud, el ancho y el alto del cefalotórax y cada segmento abdominal del camarón. Como resultado se logró diseñar un índice de selección sintético definiendo los caracteres objetivos de la selección basándose en los valores altos de las heredabilidades de los parámetros medidos y así darle un valor económico. La aplicación de esta metodología permitió

minimizar los efectos de consanguinidad en los apareamientos y maximizar el talento genético de las siguientes generaciones de reproductores.

Mediante la metodología BLUP se obtuvieron los valores de las covarianzas genotípicas y fenotípicas, las cuales se utilizaron en el posterior cálculo del índice de selección para el carácter de volumen de cuarto segmento abdominal y el peso a la cosecha. La selección de los animales con alto valor genético determinado por el ISSM dependerá de la presión de selección que establezca el empresario.

El análisis del costo de inversión mostró que implementar un índice de selección sintético centrado en la obtención de datos para 1000 camarones, integrando información genealógica, especialistas en genético, personal auxiliar, materiales para identificación y conservación de muestra, requirió un costo total de $16 025.18 y por reproductor de $16.03.

4.2 Recomendaciones

Para futuros trabajos se recomienda realizar las mediciones de calidad morfológica deben realizarse en el menor tiempo posible después de someter a las muestras al descongelamiento y este debe ser al ambiente para evitar que ésta se torne flácida y provoque errores en las mediciones.

Por otro lado, se podrían realizar diseños de índices relacionados a los parámetros reproductivos del camarón, tales como, tasa de fertilidad, intervalo de cada puesta (copula), número de huevos y nauplios por hembra, también sería importante llevar estos análisis hacia un programa de control de enfermedades. Debido a la maleabilidad que tiene el índice es posible medir todo lo nombrado anteriormente de manera simultánea, es decir diseñar un índice de selección sintético enfocado al crecimiento y a su vez realizar un seguimiento sobre los otros parámetros productivos de interés, de esta manera se puede determinar a qué mejoras se están apuntando de manera simultánea a la definida, en principio la calidad de la carne es una propuesta que también podría sumarse a la aplicación de estos índices.

La Cámara Nacional de Acuicultura en 2019 reportó el ingreso al país de $ 3 653 mil millones de dólares, con una producción anual de 635 mil toneladas por concepto de la exportación de camarón de cultivo, obteniendo una ganancia económica anual por tonelada de $ 5,748.9. Con base en tales valores, se estima

que, si el 30% de la industria camaronera del país aplicara el ISSM se lograría en dos generaciones (G1 Y G2 - Año 1) ganancias adicionales de $28 y $94 millones, y en 3.5 años una ganancia adicional para el país de $331 millones (Tabla 4.2). En tanto que, si el 100% de la industria camaronera del país aplicara el ISSM, se podría obtener 16,236.67 toneladas adicionales de camarón en la primera generación de reproductores, alcanzando una ganancia extra de $ 93 millones. Si el 100% de la industria siguiera utilizando un ISSM hasta la generación 7 (3.5 años) de reproductores, se obtendría una ganancia adicional de US$ 1102 millones (Tabla 4.2).

Tabla 4.2 Ganancia económica (millones US$) adicional al año en escenarios donde el Ecuador selecciona reproductores con ISS

Porcentaje de la Industria que implementa ISS	Ganancia (millones US $) adicional del país, si se implementa selección de reproductores por ISS						
	Año 1		Año 2		Año 3		Año 3.5
	G 1	G 2	G 3	G 4	G 5	G 6	G 7
30%	28	94	152	204	251	293	331
50%	47	157	254	341	418	488	551
80%	75	251	406	545	669	781	882
100%	93	314	508	681	836	976	1,102

Considerando las ganancias económicas que pueden ser obtenidas mediante la selección de reproductores con los índices de selección sintética, y que la ganancia es directamente proporcional al incremento de participación de la industria (%) y al número de generación de camarón, se concluye que la aplicación de los índices de selección sintético multicarácter puede ser un aporte significativo para la industria de camarón de cultivo en el Ecuador.

BIBLIOGRAFÍA

Afonso, J. M. (2019). Cadena de procesos productivos de camarón blanco. España, Canarias.

Aguirre, M. E. (2000). *MANEJO DE REPRODUCTORES PARA CAMARONES PENEIDOS DE TELICUM ABIERTO.* Sabana Grande Caracas (Venezuela) : Los Ruices. Apartado 50130 .

Alvarado, P. (8 de enero de 2020). *El Comercio*. Obtenido de El Comercio: https://www.elcomercio.com/actualidad/camaron-record-ecuador-exportacion-economia.html

Armijos, M. (2015). Análisis del impacto económico de la aplicación del Decreto Nº 1391 en la regularización de la Industria Acuícola Camaronera del Ecuador. *Revista Ciencia UNEMI*, 11;20.

Cardellino, R., & Rovira , J. (1987). *Mejoramiento Genético Animal.* Montevideo, Uruguay: Agropercuaria Hemusferio Sur.

Ciappesoni, G., Pravia, M., Ravagnolo , O., & Aguilar , I. (2004). *Objetivos de Selección y progreso genético.* Uruguay. Obtenido de http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/9811/1/SAD392p60-68.pdf

Ciappesoni, G., Pravia, M., Ravagnolo, O., & Aguilar, I. (2004). *Objetivos de Selección y progreso genético.* Uruguay. Obtenido de http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/9811/1/SAD392p60-68.pdf

CNA. (Abril de 2019). *Cámara Nacional de Acuicultura*. Obtenido de Cámara Nacional de Acuicultura: http://www.cna-ecuador.com/estadisticas/

Damas, T., Portales, A., Dorado, N., & Días, G. (Enero de 2015). *Mejoramiento genético de tilapia (Oreochromis mossambicusx O. aureus) y su cría en ambiente marino.* Obtenido de Mejoramiento genético de tilapia (Oreochromis mossambicus: https://www.oceandocs.org/bitstream/handle/1834/9400/Teresa.pdf?sequence=1&isAllowed=y

FAO. (2004). *Manejo sanitario y mantenimiento de la bioseguridad de los laboratorios de postlarvas de camarón blanco (Penaeus vannamei) en América Latina.* Roma. Obtenido de http://www.fao.org/

FAO. (2009). *Desarrollo de la Acuicultura.* Obtenido de Gestión de recursos Genéticos: http://www.fao.org/3/a-i0283s.pdf

Galeno, A. (2019). Mejoramiento genético Animal. En A. Galeno, *Mejoramiento genético Animal* (págs. 114-115). Bogotá: Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

Génétique, F. (01 de 11 de 2011). Indices genéticos precisos y variados "El valor genético de un animal". *France Génétique elevage*. Obtenido de http://es.france-genetique-elevage.org/El-valor-genetico-de-un-animal.html

Gutiérrez, G. J. (2010). *Iniciación a la valoración genética animal Metodología adaptada al EEES.* Madrid: Editorial Complutense S.A.

IPAC. (7 de Noviembre de 2014). La ULPGC y BIOGEMAR colaboran para la mejora genética del camarón en Ecuador. *IPAC*. Obtenido de http://www.ipacuicultura.com/noticias/en_portada/37545/la_ulpgc_y_biogemar_colaboran_para_la_mejora_genetica_del_camaron_en_ecuador.html

Ortíz , J., & Montenegro , A. (2005). *Modelamiento Estadístico: memorias del Simposio de Estadística de la Universidad Nacional de Colombia.* Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Pérez, P. F. (31 de Julio de 2004). *Centro Nacional de Acuicultura e investigaciones Marinas.* Obtenido de Centro Nacional de Acuicultura e investigaciones Marinas: https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/8447/1/bquinc109.pdf

Ponzoni R, W., Nguyen N, H., & Khaw H, L. (2006). *IMPORTANCE AND IMPLEMENTATION OF SIMPLE AND ADVANCED SELECTIVE BREEDING PROGRAMS FOR AQUACULTURE SPECIES IN DEVELOPING COUNTRIES.* 8th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production, Brasil.

Rencher , A. C., & Schaalje , G. B. (2008). *Linear Models in Statistics* (2nd. edn ed.). New Jersey: Wiley-Interscience.

Rocha, J. (Mayo de 2011). *TEXCUMAR*. Obtenido de http://www.texcumar.com/MejoramientoGenetico.aspx

Rocha, J. (2020). Selecćon genómica en camarón: Posibles aplicaciones en Ecuador. *AQUACULTURA*, 52-54. Obtenido de http://www.texcumar.com/MejoramientoGenetico.aspx

Sánchez, F. M. (2007). *Academia mexicana de ciencia.* Obtenido de https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/images/revista/58_4/PDF/13-483-72-78.pdf

Santibañez, D. (2017). *Identificacion de recursos geneticos en poblaciones de tilapia, mediante el analisis de la región control del ANDmt en Baja California del Sur.* La Paz, Baja California Sur: Centro de Investigaciones Biológicas del Noreste.

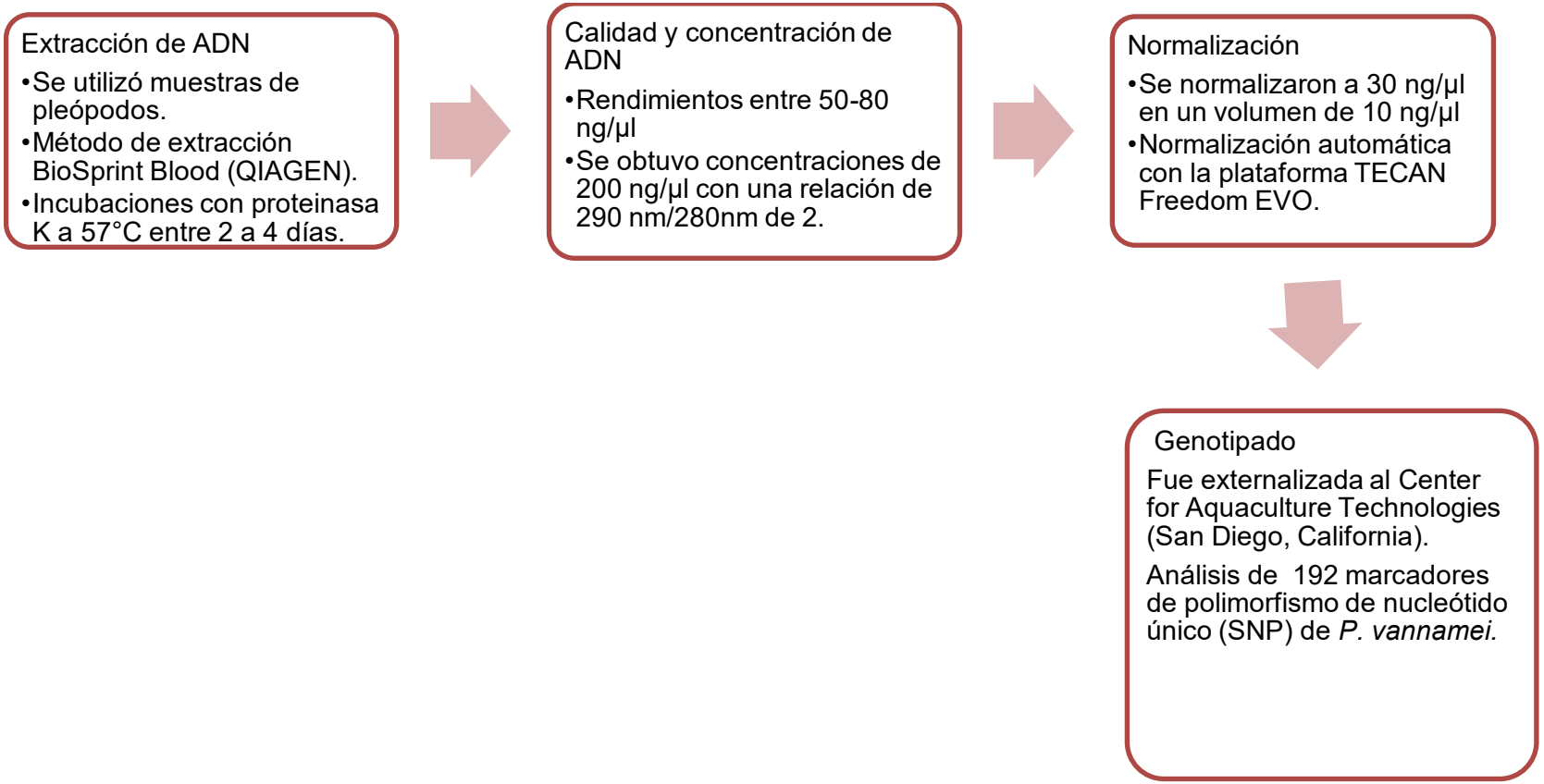
ThermoFisher. (s.f.). *ThermoFisher Scientific* . Obtenido de https://www.thermofisher.com/ec/en/home/life-science/microarray-analysis/microarray-analysis-instruments-software-services/microarray-analysis-instruments/genechip-scanner.html

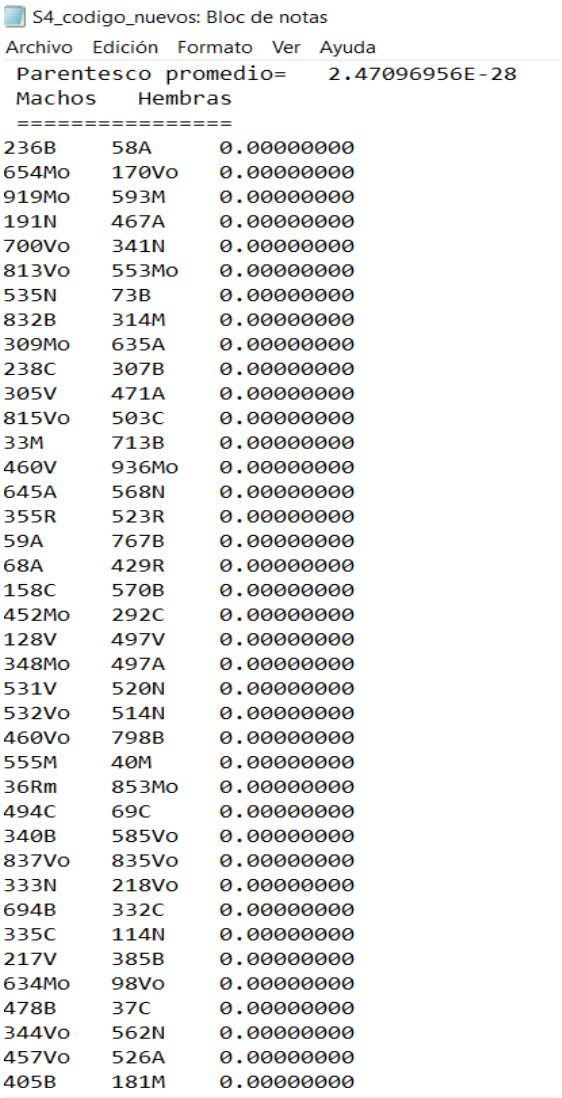
Tomalá, M. (25 de Junio de 2020). Tasa de fecundidad de camarón hembra. (M. E. Rivas, Entrevistador)

Yugcha, E. (23 de Mayo de 2020). Ingeniero. (M. Montachana, Entrevistador)

ANEXOS

Proceso para el fenotipado de los individuos de ADN de camarón





S4_codigo_nuevos: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

Parentesco promedio= 2.47096956E-28

Machos	Hembras	
236B	58A	0.00000000
654Mo	170Vo	0.00000000
919Mo	593M	0.00000000
191N	467A	0.00000000
700Vo	341N	0.00000000
813Vo	553Mo	0.00000000
535N	73B	0.00000000
832B	314M	0.00000000
309Mo	635A	0.00000000
238C	307B	0.00000000
305V	471A	0.00000000
815Vo	503C	0.00000000
33M	713B	0.00000000
460V	936Mo	0.00000000
645A	568N	0.00000000
355R	523R	0.00000000
59A	767B	0.00000000
68A	429R	0.00000000
158C	570B	0.00000000
452Mo	292C	0.00000000
128V	497V	0.00000000
348Mo	497A	0.00000000
531V	520N	0.00000000
532Vo	514N	0.00000000
460Vo	798B	0.00000000
555M	40M	0.00000000
36Rm	853Mo	0.00000000
494C	69C	0.00000000
340B	585Vo	0.00000000
837Vo	835Vo	0.00000000
333N	218Vo	0.00000000
694B	332C	0.00000000
335C	114N	0.00000000
217V	385B	0.00000000
634Mo	98Vo	0.00000000
478B	37C	0.00000000
344Vo	562N	0.00000000
457Vo	526A	0.00000000
405B	181M	0.00000000

Lista de los primeros 40 apareamientos con los ISS más altos de reproductores de camarón, con consanguinidad “0”