

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Posgrados**

**Modelo matemático que permite la optimización de la carga orgánica que se envía a Galápagos desde el Ecuador continental**

**Mayra Alexandra Hinojosa López**

**Ximena Córdova, Ph.D.  
Directora de Trabajo de Titulación**

Trabajo de titulación de posgrado presentado como requisito  
para la obtención del título de Magíster en Matemáticas Aplicadas

Quito, 19 de diciembre de 2017

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**COLEGIO DE POSGRADOS**

**HOJA DE APROBACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Modelo matemático que permite la optimización de la carga orgánica que se envía a Galápagos desde el Ecuador continental**

**Mayra Alexandra Hinojosa López**

Firmas

Ximena Córdova, Ph.D.  
Directora del Trabajo de Titulación .....  
Miembro del Comité de Trabajo de Titulación

Carlos Jiménez, Ph.D.  
Miembro del Comité de Trabajo de Titulación .....  
Director de la Maestría en Matemáticas Aplicadas

César Zambrano, Ph.D.  
Miembro del Comité de Trabajo de Titulación .....  
Decano del Colegio de Ciencias e Ingeniería

Hugo Burgos, Ph.D.  
Decano del Colegio de Posgrado .....

**Quito, 19 de diciembre de 2017**

### © Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma:	.....
Nombre:	Mayra Alexandra Hinojosa López
Código de estudiante:	00123154
C.I.:	1717257032
Fecha:	Quito, 19 de diciembre de 2017

## **DEDICATORIA**

A Dios por darme la fortaleza para seguir adelante y guiar mi vida.

A mi hija Stephany por ser mi luz y mi motivación de superación.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Ximena Córdova por ser la directora de esta investigación.

A la Directora Ejecutiva de la Agencia de Regulación y Control de la Bioseguridad y Cuarentena para Galápagos (ABG) por proporcionarme datos estadísticos para el desarrollo de esta investigación.

A mis profesores de la Maestría de Matemáticas Aplicada de la USFQ por compartir sus conocimientos.

## RESUMEN

La presente investigación trata sobre la generación de un modelo matemático utilizando sistemas dinámicos que permite optimizar la carga orgánica que se envía a Galápagos desde el Ecuador continental vía marítima, con el fin de cubrir la demanda de los habitantes y turistas de las islas. El modelo que se obtuvo se lo simuló en el software Stella para realizar una proyección de cuanta carga orgánica se necesita exportar para no tener desabastecimiento de productos orgánicos, considerando tanto el crecimiento poblacional como el crecimiento de turistas. De acuerdo con los datos históricos proporcionados por la Agencia de Regulación y Control de la Bioseguridad y Cuarentena para Galápagos (ABG) se observa con la simulación que el modelo se ajusta a la realidad. Con el paso del tiempo la carga orgánica que se necesita es mayor que la capacidad de carga de los buques, por lo tanto se recomienda incorporar un nuevo buque en los próximos años o incentivar a los habitantes de Galápagos a producir más productos orgánicos en sus fincas agrícolas.

**Palabras Clave.** Sistemas dinámicos, cadena de suministro, transporte marítimo, productos orgánicos.

## ABSTRACT

The present research deals with the generation of a mathematical model using dynamic systems that allows to optimize the organic load that is sent to Galapagos from continental Ecuador by sea, in order to cover the demand of the inhabitants and tourists of the islands. The model that was obtained was simulated in the software Stella to realize a projection of how much organic load needs to be sent to the islands in order not to have a shortage of organic products considering both the population and tourists growth. According to historical data provided by the Agency for Regulation and Control of Biosafety and Quarantine for Galapagos (ABG) it is observed, with the simulation, that the model fits very well. It was shown that the organic load required is greater than the carrying capacity of the vessels, therefore it is recommended to incorporate a new vessel in the coming years or to encourage Galapagos inhabitants to produce more organic products on their farms Agricultural activities.

**Keywords.** Dynamic systems, supply chain, maritime transport, organic products.

## TABLA DE CONTENIDO

Resumen.....	6
Abstract.....	7
1. Introducción.....	11
2. Revisión de Literatura.....	11
2.1. Cadenas de Suministro.....	11
2.2. Sistemas Dinámicos.....	13
2.3. Galápagos.....	15
3. Marco Teórico.....	19
3.1. Estructura de Sistemas Dinámicos.....	19
3.2. Modelo que Controla la Producción.....	21
3.3. Herramienta de Simulación Stella.....	22
4. Datos y Metodología.....	23
5. Formulación Matemática.....	29
6. Resultados.....	32
7. Conclusiones y Recomendaciones.....	37
8. Referencias.....	39

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Carga orgánica que se envió a Galápagos.....	26
Tabla 2: Carga orgánica que ingresó y que se retiene en Galápagos.....	27
Tabla 3: Carga orgánica mínima requerida para cubrir la demanda de Galápagos.....	34

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Población Histórica de Galápagos.....	15
Figura 2: Distribución de población en Galápagos.....	16
Figura 3: País de Origen de Turistas en Galápagos.....	17
Figura 4: Turistas en Galápagos.....	18
Figura 5: Bucle de retroalimentación positiva.....	20
Figura 6: Bucle de retroalimentación negativa.....	20
Figura 7: Elementos de construcción de sistemas para Stella software.....	23
Figura 8: Productos orgánicos transportados a Galápagos.....	24
Figura 9: Cadena de suministro.....	25
Figura 10: Cursograma del modelo propuesto.....	33
Figura 11: Carga orgánica proyectada necesaria para cubrir la demanda.....	34
Figura 12: Análisis de sensibilidad para diferentes valores de la tasa de crecimiento de la población (residentes).....	35
Figura 13: Análisis de sensibilidad para diferentes valores de la tasa de crecimiento itinerante.....	36
Figura 14: Análisis de sensibilidad para diferentes valores de la tasa de crecimiento de la población (residentes) y de la tasa de crecimiento itinerante (turistas).....	37

## **1. INTRODUCCIÓN**

El crecimiento poblacional y turístico, así como la escasa producción agropecuaria en las islas Galápagos han generado un incremento constante de la demanda, calidad y precio de productos perecibles por parte de los habitantes de Galápagos quienes con el fin de satisfacer sus necesidades y las de los turistas deben transportar productos desde el Ecuador continental hasta las islas (Wildaid, 2012). El tipo de transporte de productos hacia Galápagos más utilizado es el transporte marítimo de carga, por ser el más económico, (Agencia de Regulación y control de la Bioseguridad y Cuarentena para Galápagos), pero el de menor garantías sanitarias ya que los productos están propensos a daños físicos por manipulación, presencia de plagas, tiempos de permanencia en el transporte. El objetivo de este trabajo es simular, mediante un modelo matemático, la optimización del transporte de carga marítimo de productos orgánicos desde el puerto de Guayaquil hasta las islas Galápagos mediante sistemas dinámicos.

## **2. REVISIÓN DE LA LITERATURA**

### **2.1. CADENAS DE SUMINISTRO**

Según Mbang y James (2012), una cadena de suministro es un proceso en el que las materias primas son transformadas en productos terminados y luego entregados a los clientes finales. Mientras que Van der Heyden y Camacho (2006), describen a una cadena de suministro como un sistema conformado por productores, proveedores, transformadores y por una secuencia de operaciones de producción, transformación y comercialización de un conjunto de productos en un entorno dinámico que implica flujos constantes de artículos producidos, información y fondos. Rodríguez, Morales y Sánchez (2005), sostienen que un modelo de cadena

de suministros debe capturar actividades relevantes asociadas con los niveles de inventario, flujo y transformación del bien desde la etapa de materia prima hasta el cliente final. Una cadena de suministro necesita una gestión la misma que brinda a las empresas una oportunidad de visualizar la organización para obtener los mejores beneficios. (Agarwal & Shankar, 2005). Para Chopra & Meindl (2013) “Una cadena de suministro está formada por todas aquellas partes involucradas de manera directa o indirecta en la satisfacción de una solicitud de un cliente”.

Las cadenas de suministros pueden ser directas, inversas y cerradas. Según Ros, De la Fuente, Campuzano y De Nieves (2003), la cadena de suministro directa comprenden todos los procesos de negocio, recursos humanos, tecnología e infraestructura que permiten el flujo hacia delante (desde los proveedores hacia los clientes) tanto de materiales como de información, los cuales facilitarán la entrega al cliente final del producto o servicio demandado por el mismo, mientras que en la cadena de suministro inversa se plantea la gestión de los productos y materiales devueltos por los clientes para su tratamiento adecuado, en la que se orienta todo el flujo de productos y materiales desde el clientes hacia el fabricante o proveedor para recuperar el valor que todavía poseen dichos productos o materiales. Para Espíritu (2013), una cadena de ciclo cerrado consiste en una cadena de suministro directa y una inversa, es posible distinguir dos diseños diferentes: La cadena de ciclo cerrado secuencial, en la cual el flujo inverso es independiente del flujo directo y la cadena de ciclo cerrado integrada, en la cual las rutas en el flujo inverso son las mismas que en el directo. Según Guide y Van Wassenhove (2009), la cadena de suministro cerrada puede ser definida como el diseño, control y funcionamiento de un sistema para maximizar el ciclo de vida de un producto con

recuperación dinámica de diferentes tipos de retornos a lo largo del tiempo. Según Wang y Hsu (2010), la logística de ciclo cerrado se refiere a aquellas actividades asociadas a la transformación y los flujos de bienes y servicios junto con la información desde los orígenes de los materiales hasta los usuarios finales; la gestión se refiere a la integración y al tratamiento de esas actividades, tanto internas como externas a la empresa, efectivamente, la gestión integrada de una cadena de suministro intenta cerrar los ciclos de materiales y prevenir la pérdida de materiales en la cadena utilizando los costos mínimos para conseguir los costos mínimos para conseguir el máximo valor.

Las cadenas de suministro pueden simularse y modelarse utilizando: eventos discretos, sistemas dinámicos y modelado basados en agentes (Riddalls, Bennett & Tipi, 2000).

## **2.2. SISTEMAS DINÁMICOS**

Sterman (2000) define a un modelo de sistemas dinámicos como el conjunto de relaciones entre las distintas características de un conjunto de objetos que permiten describir el comportamiento de un sistema en el tiempo. Mientras que para Campuzano, Martínez y Ros (2010), el objetivo de los sistemas dinámicos es reconocer la interacción que existe entre varias funciones dentro de un sistema, con el fin de facilitar la comprensión del mismo y mejorar la interacción de los componentes de dicho sistema.

Según Mula, Campuzano, Díaz y Carpio (2013), la simulación basada en sistemas dinámicos es una herramienta para modelar elementos de un sistema real, para

obtener resultados que se aproximan a estos mediante la definición de variables y parámetros susceptibles de cambios para analizar y discernir los efectos sobre el sistema que se estudia. En una cadena de suministro los tipos de problemas que se pueden modelar mediante simulación de sistemas dinámicos se tiene Optimización, Análisis de decisión, Evaluación de diagnóstico, Gestión de riesgo y Planificación de proyectos (GoldSim Technology Group LLC, 2007).

Los sistemas dinámicos tienen su origen en la dinámica industrial, su creador es Forrester, indica que “la dinámica industrial es un enfoque cuantitativo que estudia las características de retroalimentación de la información de los sistemas industriales formados por seis flujos: información, pedidos, materiales, dinero, personal y máquinas”. La metodología de dinámica de sistemas se propone para modelar y simular sistemas complejos, como las cadenas de suministro, con el fin de representar el sistema y simular el comportamiento del mismo. (Forrester,1961)

Según Andres, Sanchis y Poler (2016) la simulación de cadenas de suministro utilizando la dinámica industrial de Forrester permiten:

- Representar la Cadenas de suministros como el conjunto de empresas, máquinas y procesos.
- Realizar análisis “AS IS” (proceso "Tal Como Está").
- Generar escenarios que permitan realizar análisis ‘TO-BE’ o “WHAT IF” (herramienta de mejoramiento que permite a los tomadores de decisiones evaluar previamente el impacto de decisiones estratégicas, tácticas u operativas), como herramienta que permite dar soporte a la toma de decisiones.

- Cuantificar los beneficios y compararlos con los diferentes escenarios simulados.

### 2.3. GALÁPAGOS

Las islas Galápagos son un archipiélago, ubicadas en el Océano Pacífico a 1000 km de la costa del Ecuador, están conformadas por 13 islas grandes, 6 islas medianas y 107 rocas e islotes. Su formación geológica fue por actividad sísmica y volcánica (Tobar, 1997).

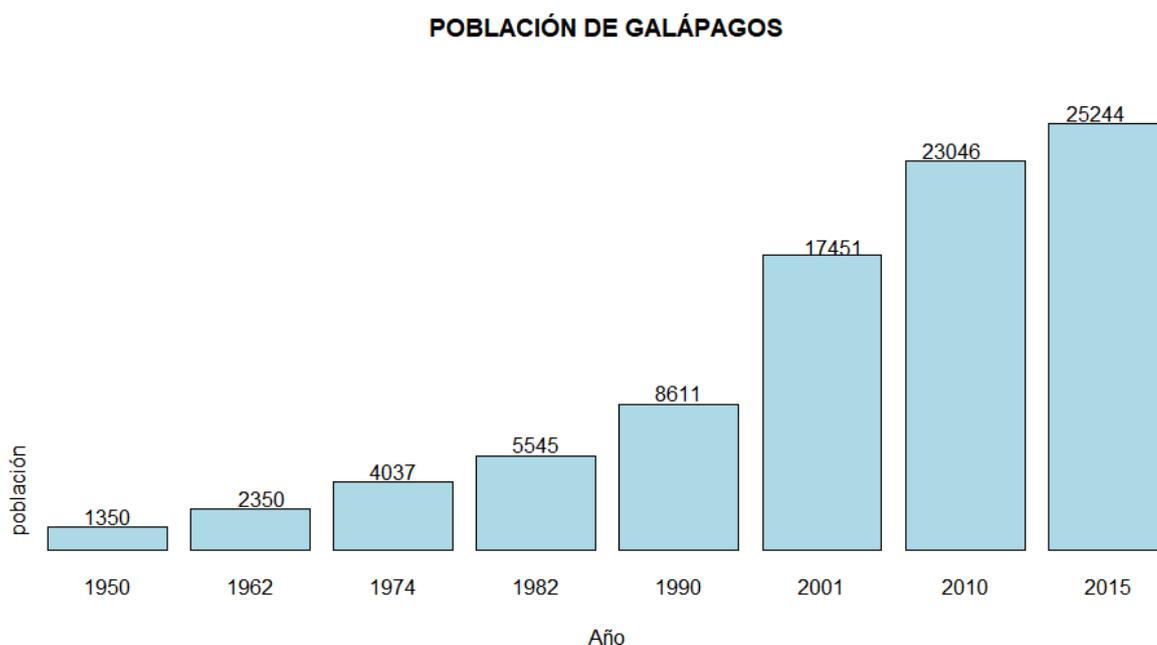


Figura 1: Población Histórica de Galápagos.  
Fuente: Censo de Población y Vivienda Galápagos 2015.

De acuerdo a los resultados del Censo de Población y Vivienda Galápagos 2015, la población total se conforma por residentes habituales y población flotante. Los residentes habituales, son personas que han estado viviendo al menos seis meses en algún lugar; o aunque tengan menos tiempo, planean quedarse en dicho lugar por más de seis meses. Conforman la población flotante las personas que se

encuentran en un lugar por vacaciones, diligencias, atención médica, visita a familiares u otras razones, y su estancia en el lugar no le tomará más de seis meses. En el 2015 residen en Galápagos 25.244 personas, Figura 1, en el período de 1950-2015 se ha multiplicado la población en 18,8 veces; repartidos en las islas San Cristóbal, Floreana, Santa Cruz e Isabela. A nivel cantonal, la distribución de la población es la siguiente (ver Figura 2); Santa Cruz con 15.701 habitantes (62%), San Cristóbal con 7.199 (29%) e Isabela con los restantes 2344 (9%).

## Población por islas en Galápagos

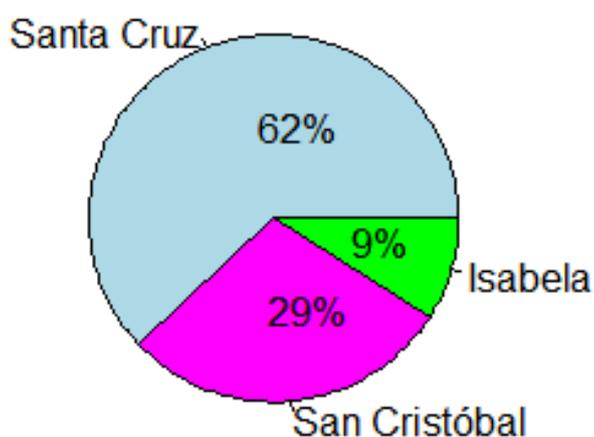


Figura 2: Distribución de población en Galápagos.  
Fuente: Censo de Población y Vivienda Galápagos 2015

En base al informe de visitantes de las áreas protegidas de Galápagos, 224.755 turistas llegaron a Galápagos en el 2015, el 31% corresponde a turistas nacionales y el 69% a turistas extranjeros, las nacionalidades más representativas de los turistas que visitan Galápagos se muestran en la Figura 3. (Dirección del Parque Nacional Galápagos & Observatorio de Turismo de Galápagos, 2015).

En el 2016, 218.365 turistas llegaron a Galápagos se dio un decremento con respecto al 2015, la reducción de turistas a Galápagos se dio en abril 2016, debido al terremoto en la costa ecuatoriana. En los últimos 10 años, Galápagos creció a un ritmo de +3,04%. Este crecimiento es similar al crecimiento del turismo mundial (+2,94%), pero inferior al crecimiento del turismo receptor de Ecuador continental (+4,19%) en el mismo periodo. El segmento de visitantes extranjeros ha crecido a un ritmo de +3,09% mientras que el segmento de visitantes nacionales ha crecido a un ritmo de +2,93% entre 2007 y 2016. (Dirección del Parque Nacional Galápagos & Observatorio de Turismo de Galápagos, 2016).

### País de Origen de Turistas en Galápagos

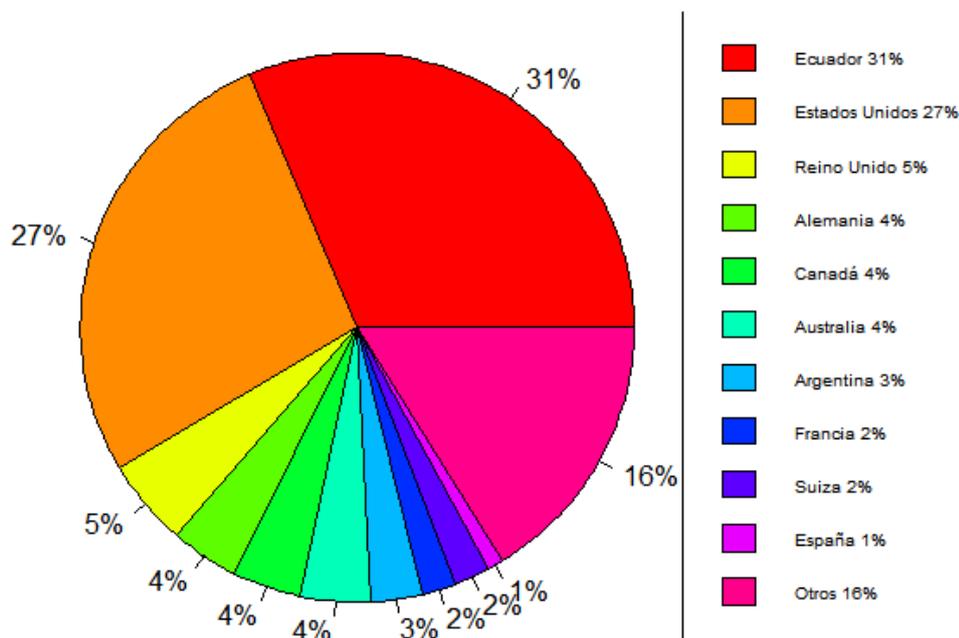


Figura 3: País de Origen de Turistas en Galápagos.

Fuente: Dirección del Parque Nacional Galápagos & Observatorio de Turismo de Galápagos, 2015

En la Figura 4 se muestra la cantidad de turistas que visitaron las islas Galápagos desde el 2000 al 2015.

## TURISTAS EN GALÁPAGOS

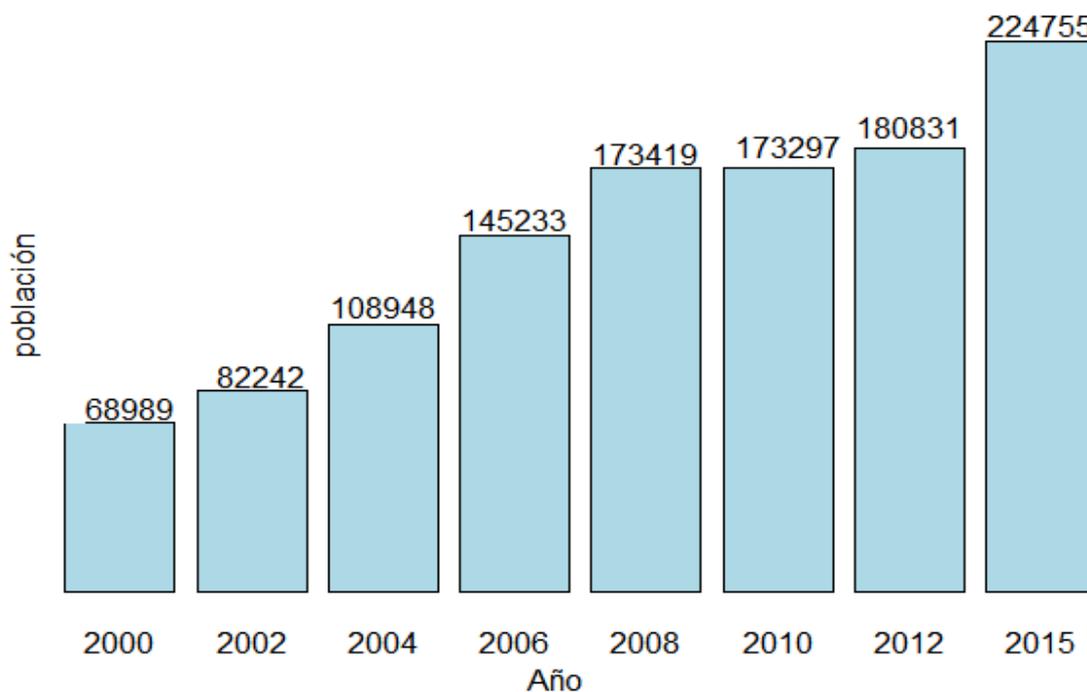


Figura 4: Turistas en Galápagos.

Fuente: Dirección del Parque Nacional Galápagos & Observatorio de Turismo de Galápagos, 2015

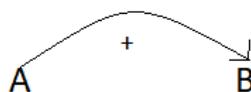
Debido a la fuerte demanda interna que existe por el incremento poblacional y el constante ingreso de turistas a las islas, una parte de productos se debe exportar desde el Ecuador continental y otra parte se debe producir en las islas, sin embargo el 59% del territorio productivo son pastizales (Censo Agropecuario, 2014), Según el Ministerio de Agricultura y Ganadería Acuacultura y Pesca (MAGAP), los productores identifican tres problemas en el cultivo de alimento: el acceso al agua, la falta de mano de obra y las plagas. Tradicionalmente la producción de Galápagos se ha concentrado en los siguientes productos: café, maíz, yuca, naranja, papas, y carne de res, actualmente en las fincas agrícolas se incluye el cultivo de vegetales y frutas, así como la crianza de gallinas y cerdos. Los productos que se exportan desde el Ecuador continental se estima que el 86,7%

son transportados vía marítima por ser el medio más económico, y el resto por vía área. Se estima que el 75% de los productos orgánicos que ingresa a Galápagos lo hace vía marítima (Wildaid, 2012)

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1. ESTRUCTURA DE SISTEMAS DINÁMICOS

La estructura del sistema es el conjunto de las relaciones entre los elementos de un sistema y se representa mediante el diagrama de influencias o causal. En su forma más simple el diagrama causal está formado por un grafo orientado. A las flechas que representan las aristas se puede asociar un signo. Este signo indica si las variaciones del antecedente y del consecuente son, o no, del mismo signo. Supongamos que entre A y B existe una relación de influencia positiva.



Si A se incrementa, B también se incrementa, y, por el contrario, si A disminuye, B también disminuye. Una influencia negativa produce un incremento de A pero una disminución de B, y viceversa. (Aracil, 1995)

Los sistemas pueden estar formados por bucles de realimentación positiva o por bucles de realimentación negativa.

**Bucles de realimentación positiva:** Es uno de los mecanismos de retroalimentación por el cual los efectos o salidas de un sistema causan efectos acumulativos a la entrada, tal como el caso de un crecimiento de la población, ver figura 5. (Aracil, 1995)

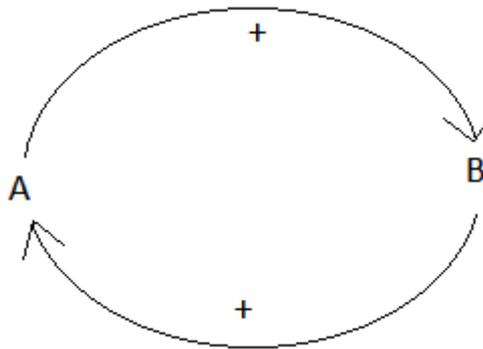


Figura 5: Bucle de retroalimentación positiva.  
Fuente: Aracil, 1995. Elaboración propia

**Bucles de realimentación negativa:** Tiene la propiedad de perturbar uno de sus elementos del sistema por una acción externa, ver figura 6. (Aracil, 1995)



Figura 6: Bucle de retroalimentación negativa.  
Fuente: Aracil, 1995. Elaboración propia

Los bucles de realimentación positiva y negativa constituyen los ejemplos más simples de estructura de un sistema. Los sistemas reales son complejos y en su estructura hay un sinnúmero de bucles de realimentación positiva y negativa.

Matemáticamente una influencia puede expresarse de la forma:

$$\frac{dx}{dt} \rightarrow x$$

En la que  $\frac{dx}{dt}$  denota la variación con respecto al tiempo de la magnitud  $x$ . Esta expresión representa la variación con respecto al tiempo de  $x$ , e influye en el crecimiento de la propia variable. La variable se denomina variable de nivel o variable de estado y la variable  $\frac{dx}{dt}$  variable de flujo. (Aracil, 1995)

### 3.2. MODELO QUE CONTROLA LA PRODUCCIÓN

Las ecuaciones diferenciales son utilizadas en el control de sistemas de producción, un modelo matemático que permite controlar la producción está dado por: (Riddalls, Bennett & Tipi, 2000)

$$\frac{di}{dt} = p_a(t) - d(t) \quad (1)$$

$$\frac{dp_a}{dt} = \alpha (p_d(t) - p_a(t)) \quad (2)$$

Donde  $p_d(t)$  es la tasa de producción deseada,  $p_a(t)$  es la tasa de producción actual,  $d(t)$  es la demanda y  $i(t)$  es el nivel de inventario.

Betria y Lara (2011) describen un modelo matemático para una cadena de abastecimiento cerrada constituida por un canal tradicional y un canal reverso, donde la fábrica produce un único ítem que es vendido a un distribuidor, el distribuidor recibe los pedidos de los clientes y luego entrega el producto (canal tradicional), una vez que el producto cumple su vida útil es recolectado, inspeccionado y remanufacturado. Finalmente, el producto remanufacturado

ingresa al inventario de productos terminados en fábrica creándose así un bucle cerrado (canal reverso). El modelo lo define como:

$$\frac{dL_i}{dt} = R_p(t) + T_2(t) - R_1(t) \quad (3)$$

Donde  $L_i(t)$  es el nivel de inventarios en la fábrica,  $R_p(t)$  es la tasa de producción,  $R_1(t)$  es la tasa de entrega de fábrica al distribuidor y  $T_2(t)$  es la tasa de remanufactura.

$$\frac{dP_u}{dt} = T(t) - T_1(t) - T_4(t) \quad (4)$$

Donde  $P_u(t)$  es el nivel de productos usados,  $T(t)$  es la tasa a la cual los productos finalizan su vida útil,  $T_1(t)$  es la tasa de recolección de la empresa y  $T_4(t)$  es la tasa de desecho.

### 3.3. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN STELLA

La simulación de sistemas dinámicos involucra el diseño de modelos de un sistema, para realizar experimentos en él. El propósito de estos experimentos son determinar cómo el sistema real realiza y predice el efecto de cambios al sistema a través del tiempo. El software Stella es un programa de simulación por computadora, que proporciona un marco de referencia y una interfaz gráfica de usuario para la observación e interacción cuantitativa de las variables de un sistema, permite simular sistemas a través del tiempo. La interfase se puede utilizar para describir y analizar sistemas complejos, se puede representar los estos sistemas, con 4

elementos o bloques de construcción: stock, flujo, conector y convertidor; ver figura 7. (Chalupsky, 2006)

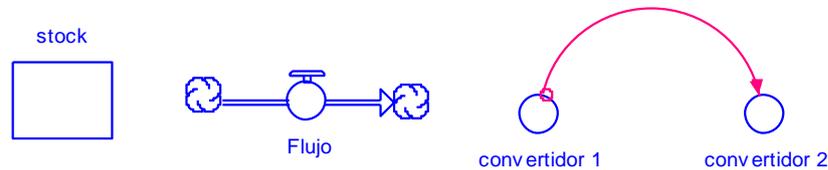


Figura 7: Elementos de construcción de sistemas para Stella software.  
Fuente: Stella software. Elaboración propia

Stock: Es un símbolo genérico para cualquier parte del sistema que acumula o consume recursos.

Flujo: Un flujo es la tasa de cambio de un stock.

Convertidor: Un convertidor se utiliza para tomar datos de entrada y manipularlos para convertir esa entrada en alguna señal de salida.

Conector: Un conector es una flecha que le permite a la información pasar entre: convertidores; stocks y convertidores; stocks, flujos y convertidores. Un conector cuya dirección va de un convertidor 1 a un convertidor 2 significa que el convertidor 2 es función del convertidor 1.

#### 4. DATOS Y METODOLOGÍA

##### Cadena de suministro

Los productos son transportados desde Guayaquil hacia Galápagos mediante cuatro buques de cabotaje que se encargan de distribuir los productos a las tres principales islas del archipiélago así: (Ministerio de transporte y obras públicas, 2011)

RUTA 1: Guayaquil-Puerto Baquerizo Moreno (Isla San Cristóbal).

RUTA 2: Guayaquil-Puerto Ayora (Isla Santa Cruz).

RUTA 3: Guayaquil-Puerto Villamil (Isla Isabela) - Puerto Velasco Ibarra (Isla Floreana).

Cada buque se demora tres semanas en transportar los productos y la capacidad de carga varía desde 250 a 450 toneladas. Los productos transportados a Galápagos, Figura 8, son muy variados entre ellos se tiene:

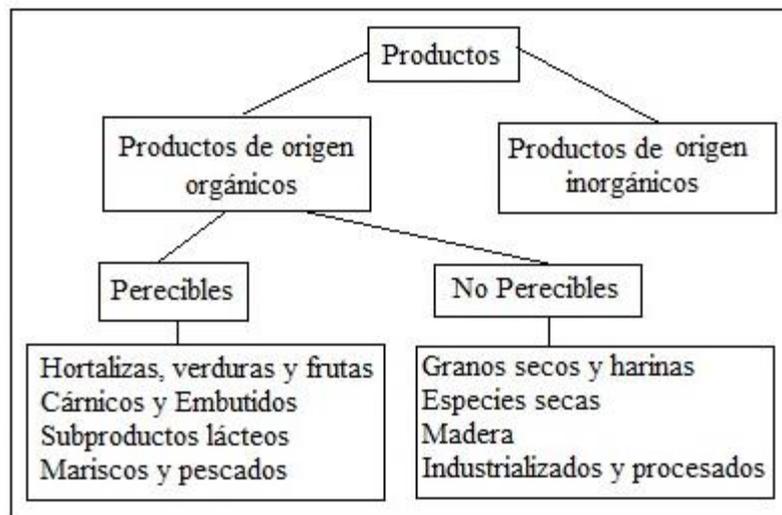


Figura 8: Productos orgánicos transportados a Galápagos.

Fuente: ABG. Elaboración propia

El estudio de este documento se centra en los productos orgánicos (percederos y procesados). Los productos orgánicos que se transportan deben mantener una temperatura específica, en toda la cadena de frío desde los productores, intermediarios, operadores logísticos y distribuidores con el propósito de que estos productos lleguen a los consumidores en buenas condiciones de calidad evitando la propagación de parásitos por productos deteriorados o dañados. Para el transporte de estos productos se debe conocer los horarios de la recepción de productos perecibles, los requisitos sanitarios, así como las necesidades de bodega en frío, ya que en muchas ocasiones en el muelle de embarque puede suceder aglomeración de carga con condiciones desfavorables para la conservación del producto.

La Figura 9 presenta la cadena de suministros en el transporte de productos orgánicos desde Guayaquil a Galápagos vía marítima, contempla 3 fases:

1. Operaciones de Pre-embarque
2. Operaciones de Embarque
3. Operaciones de Desembarque



Figura 9: Cadena de suministro  
Fuente: Elaboración propia

**Operación de Pre-embarque:** Un sistema de transporte marítimo de carga a Galápagos se inicia desde que el producto a ser transportado llega al muelle de Guayaquil donde la Agencia de Regulación y Control de la Bioseguridad y Cuarentena para Galápagos (ABG) debe asegurar que el producto se encuentre en óptimas condiciones de calidad, sanitarias y en los embalajes adecuados, exigidos por ABG para el transporte de productos a las islas Galápagos. En las operaciones de pre-embarque se debe considerar las fechas de zarpe de los barcos para planificar la hora de entrega de carga, especialmente en productos perecederos.

**Operación de embarque:** Antes de proceder a embarcar la carga, las embarcaciones deben estar completamente limpias, desinfectadas, fumigadas y libres de cualquier tipo de plagas. Antes de partir el barco hacia Galápagos, para obtener el permiso de salida del puerto (zarpe) debe presentar en la capitanía de puerto el certificado de fumigación y

desratización vigente realizada por ABG. En la Tabla 1 se presenta la cantidad de carga orgánica que se embarcó hacia Galápagos.

Año	Carga orgánica que se embarcó en Guayaquil (Kg)
2010	8.684.546,23
2011	11.032.667,21
2012	14.578.609,70
2013	15.590.784,21
2014	18.453.560,37
2015	17.817.173,95
2016	19.988.114,26

Tabla 1: Carga orgánica que se envió a Galápagos.

Fuente: Agencia de Regulación y Control de la Bioseguridad y Cuarentena para Galápagos (ABG)

**Operaciones de desembarque:** El barco al llegar a cualquier puerto en Galápagos debe ser abordado por un inspector de ABG con el fin de comprobar la ausencia de plagas, el buen estado de los embalajes y la no ruptura de los sellos adhesivos de seguridad colocados por los inspectores en la ciudad de Guayaquil. Además, el capitán del barco deberá presentar el certificado de desratización y de fumigación del barco para que sea autorizado a desembarcar. En Galápagos se verifica la calidad de la inspección previamente realizada en Guayaquil. La carga es desembarcada a las barcazas para ser trasladadas al muelle en la isla. Si la carga en el muelle cumple con todos los requisitos de ABG es liberada y entregada al destinatario. Si la carga no cumple con los requisitos, el inspector debe analizar la posibilidad de aplicar algún tratamiento cuarentenario, si no es posible aplicar algún tratamiento la carga puede ser incinerada o devuelta al continente. Ver en la Tabla 2 la cantidad de carga retenida por encontrarse en mal estado.

Año	Carga orgánica ingresa a Galápagos (Kg)	Carga orgánica que se retiene en Galápagos (Kg)
2010	8.684.176	370,23
2011	11.032.250	417,21
2012	14.577.294	1315,70
2013	15.590.102	682,21
2014	18.452.320	1240,37
2015	17.814.089	3084,95
2016	19.985.629	2485,26

Tabla 2: Carga orgánica que ingresó y que se retiene en Galápagos.

Fuente: Agencia de Regulación y Control de la Bioseguridad y Cuarentena para Galápagos (ABG)

En este trabajo se modela el transporte de carga marítima que se envía desde Guayaquil a las islas Galápagos de productos orgánicos, considerando que los productos orgánicos, como frutas, hortalizas, legumbres, productos cárnicos y lácteos presentan diversos problemas de ingreso a las islas, por lo tanto, pueden ser retenidos si están en mal estado o por presencia de plagas como insectos, roedores y reptiles dentro de la carga.

La conservación del ecosistema de Galápagos se ve amenazado por plagas y especies introducidas por el transporte de carga, razón por la cual ABG reglamentó el ingreso de productos a la isla. Las frutas y hortalizas que se han identificado que poseen mayor riesgo de introducción de especies foráneas son: col china, guineo, limón, maíz, melón, papaya, pepino, pera, piña, plátano verde, sandía, zapallo. (Palacios, 2012)

Tradicionalmente, la producción de Galápagos se había concentrado en los siguientes productos: café, maíz, yuca, naranja, papa y carne de res, estos productos que resultaban aptos para cultivar y mantener se siguen produciendo, pero además se han incluido más productos entre los que se incluyen vegetales diversos, más variedad de frutas y la crianza de gallinas y cerdos. (Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca & Ministerio Ambiente, 2012)

Debido a la fuerte demanda interna que existe por el incremento poblacional y el constante ingreso de turistas a las islas, así como el limitado ingreso de productos, la población recibe apoyo para producir más productos en las fincas agrícolas locales, así como en la producción agropecuaria. (Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca & Ministerio Ambiente, 2012) No existen datos de la cantidad de producción que se genera para cada producto, pero se estima que la producción agrícola contribuye con el 9% del consumo local. (Salcedo, 2008)

La isla que recibe la mayor cantidad de mercadería es Santa Cruz, con un promedio de 60% de toda la carga, San Cristóbal recibe entre el 29%, Isabela 8 % y Floreana 1%. (Wildaid, 2012)

La dependencia que existe con el transporte y la importación de alimentos muchas veces genera desabastecimiento de productos, en esos casos, la población debe buscar otro tipo de alimentos o pagar un precio alto por los que se encuentran disponibles en el mercado. (Agencia de Regulación y Control de la Bioseguridad y Cuarentena para Galápagos) Los alimentos importados no siempre se encuentran en las mejores condiciones, pero en vista de que es lo único que se oferta, los consumidores no tienen muchas opciones para elegir o

preferir alimentos de mejor calidad. El consumo de hortalizas, vegetales, frutas frescas, cárnicas y lácteas, en Galápagos, se ha determinado que anualmente esta población consume 23,024.96 toneladas de estos productos que se catalogan como orgánicos entre la población residente y turistas. (Berube, 2015)

Los desabastecimientos de alimentos en Galápagos también se generan cuando los buques de carga sufren algún accidente. (Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca & Ministerio Ambiente, 2012)

En el 2015; 25,244 personas residen en Galápagos. Más de la mitad de la población se concentra en el cantón de Santa Cruz, la misma que está representada con el 62,2% de los habitantes; en el cantón San Cristóbal, se ubica el 29% de la población y en Isabela, el 9%. La tasa anual de crecimiento entre los pobladores permanentes de las islas es de 1,8% . (INEC, 2015)

En el 2015, 224,755 turistas llegaron a Galápagos, 31% corresponde a turistas nacionales y el 69% a turistas extranjeros. La estadía de los turistas en Galápagos es de 7 días en promedio y 5 en mediana. (Dirección del Parque Nacional Galápagos \$ Observatorio de Turismo de Galápagos) En consecuencia se puede decir que:  $224,755 \cdot 355 / 5 = 3,210$  turistas permanecen en Galápagos cada día.

## **5. FORMULACIÓN MATEMÁTICA**

$Z(t)$  es la carga orgánica mínima en Kg que se necesita transportar a Galápagos desde el Ecuador continental para cubrir la demanda de los habitantes con el fin de que no se produzca desabastecimiento, está dada por la ecuación:

$$Z(t) - R(t) = X(t) - Y(t) \quad (5)$$

Donde  $X(t)$  es la carga orgánica en Kg que necesita la población,  $Y(t)$  es la carga orgánica en Kg que se produce en las islas y  $R(t)$  es la carga orgánica que se retiene por llegar a Galápagos en mal estado.

La tasa de carga orgánica mínima está dada por:

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{dX}{dt} - \frac{dY}{dt} + \frac{dR}{dt} \quad (6)$$

La demanda orgánica en Kg que necesita la isla está dada por:

$$X(t) = X_o(t) \left(1 + \frac{dC}{dt}\right) \quad (7)$$

Donde  $X_o(t)$  es la demanda inicial de carga orgánica en Kg y  $\frac{dC}{dt}$  es la tasa de crecimiento anual de residentes y turistas.

La tasa de crecimiento anual está dada por:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{dCP}{dt} + \frac{dCT}{dt} \quad (8)$$

Donde  $\frac{dCP}{dt}$  es la tasa de crecimiento poblacional anual y  $\frac{dCT}{dt}$  es la tasa de crecimiento de turistas (población itinerante) anual.

La tasa de crecimiento promedio anual es el incremento anual por cada 100 habitantes y se calcula con la fórmula: (INEC, 2015)

$$\frac{dCP}{dt} = \ln \left( \frac{N_t}{N_0} \right) * \frac{1}{t} (100) \quad (9)$$

Donde:  $N_t$  es la población en el año  $t$ ;  $N_0$  es la población en el año base y  $t$  es el tiempo en años.

Los turistas presentan una tasa anual de crecimiento compuesto dado por la fórmula: (Dirección del Parque Nacional Galápagos \$ Observatorio de Turismo de Galápagos)

$$\frac{dCT}{dt} = \left( \frac{V_t}{V_0} \right)^{\frac{1}{t}} - 1 \quad (10)$$

Donde:  $V_t$  es la población itinerante final;  $V_0$  es la población itinerante inicial y  $t$  es tiempo en años.

Para que no se produzca desabastecimiento de producto:

$$Z(t) \geq X_o(t) \quad (11)$$

La cantidad de carga orgánica mínima en kilogramo que se requiere transportar desde el Ecuador Continental a cada isla (Santa Cruz, San Cristóbal, Isabela, Floreana) está dada por:

$$Z_i(t) = Z(t) * \frac{dC_i}{dt} \quad (12)$$

Para:  $i = \left\{ \begin{array}{l} \text{Santa Cruz, San Cristóbal,} \\ \text{Isabela, Floreana} \end{array} \right\}$

Donde:  $Z_i(t)$  es la carga orgánica mínima que se envía a una isla y  $\frac{dC_i}{dt}$  es la tasa de carga promedio que necesitan los habitantes de la isla.

Por lo tanto, de (5) con (7), se tiene:

$$Z(t) - R(t) = X_o(t) \left(1 + \frac{dC}{dt}\right) - Y(t) \quad (13)$$

Por lo tanto, de (8) con (13), se tiene:

$$Z(t) = X_o(t) \left(1 + \frac{dCP}{dt} + \frac{dCT}{dt}\right) - Y(t) + R(t) \quad (14)$$

Por lo tanto, de (9) y (10) con (14) se tiene el modelo que optimiza la carga orgánica queda definido por:

$$Z(t) = X_o(t) \left( \ln \left( \frac{N_t}{N_0} \right) * \frac{1}{t} + \left( \frac{V_t}{V_0} \right)^{\frac{1}{t}} \right) - Y(t) + R(t) \quad (15)$$

Un modelo de Dinámica Industrial contiene variables de nivel y variables de tasa. Las variables de nivel son las acumulaciones a lo largo del sistema. Las tasas definen los flujos entre los niveles y son resultantes de un proceso de toma de decisión.

## 6. RESULTADOS

El cursograma del modelo propuesto se muestra en la Figura 10. Donde los rectángulos representan los niveles; las válvulas representan las tasas; las tasas pueden depender de

niveles, de otras tasas o de constantes (representadas por círculos); las líneas rojas representan el flujo de información.

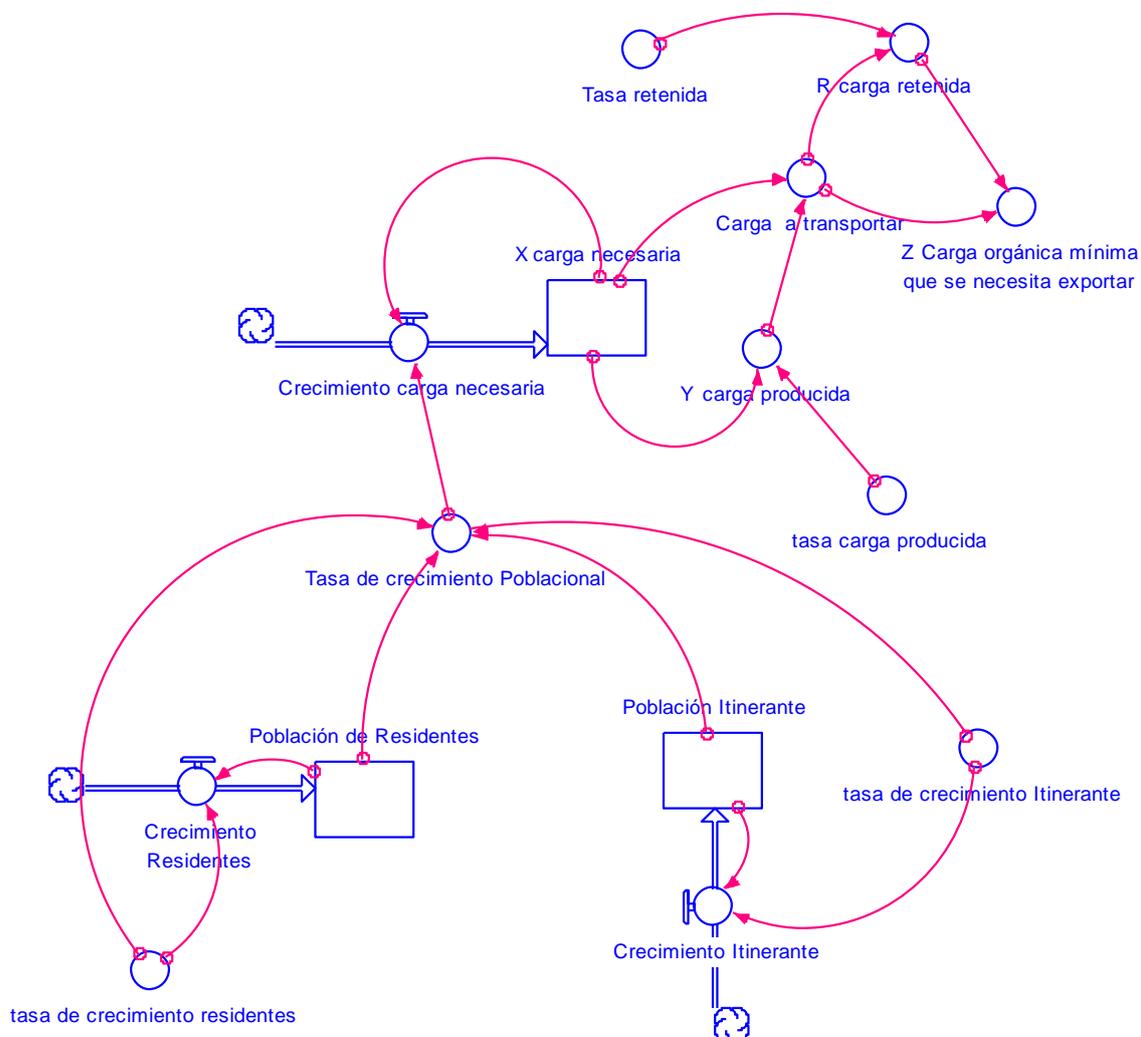


Figura 10: Cursograma del modelo propuesto.

Los valores iniciales de las variables: población de residentes, población itinerante y la carga necesaria para cubrir la demanda se elige en base a las estadísticas antes mencionadas (para el 2015), así como las tasas de cambio.

En la Figura 11 se tiene la simulación de la carga orgánica proyectada necesaria para cubrir la demanda.



Figura 11: Carga orgánica proyectada necesaria para cubrir la demanda.

21:57 sáb, 6 de may de 2017 Table 1 (Untitled Table)

Years	Y carga producida	Carga a transportar	R carga retenida	Z Carga orgánica m
2015	1.761.832.98	17.814.088.99	30.105.81	17.844.194.80
2016	1.799.347.09	18.193.398.40	30.746.84	18.224.145.24
2017	1.837.788.02	18.582.078.91	31.403.71	18.613.482.62
2018	1.877.183.80	18.980.413.96	32.076.90	19.012.490.86
2019	1.917.563.49	19.388.697.53	32.766.90	19.421.464.43
2020	1.958.957.27	19.807.234.66	33.474.23	19.840.708.89
2021	2.001.396.45	20.236.341.88	34.199.42	20.270.541.30
2022	2.044.913.52	20.676.347.80	34.943.03	20.711.290.83
2023	2.089.542.22	21.127.593.59	35.705.63	21.163.299.22
2024	2.135.317.61	21.590.433.58	36.487.83	21.626.921.42
2025	2.182.276.08	22.065.235.89	37.290.25	22.102.526.14
2026	2.230.455.46	22.552.383.00	38.113.53	22.590.496.53
2027	2.279.895.08	23.052.272.47	38.958.34	23.091.230.81
2028	2.330.635.81	23.565.317.63	39.825.39	23.605.143.02
2029	2.382.720.16	24.091.948.30	40.715.39	24.132.663.70
Final	2.436.192.36	24.632.611.59	41.629.11	24.674.240.71

Tabla 3: Carga orgánica mínima requerida para cubrir la demanda de Galápagos

En la Tabla 3 se presenta la carga mínima  $Z(t)$  que se necesita para cubrir la demanda de productos orgánicos y  $R(t)$  la carga retenida proyectada en Kilogramo. Al comparar los valores proyectados que se muestran en la tabla 3 para el año 2015 con los datos históricos presentados en la tabla 2, se puede observar que los valores son muy similares razón por la cual el modelo se ajusta a la realidad.

En la Figura 12 se tiene un análisis de sensibilidad si varía la tasa de crecimiento de la población:

$\frac{dCP}{dt}$  va a tomar valores de  $\{0.018; 0.036; 0.054; 0.072\}$

Los valores de  $\frac{dCP}{dt}$  escogidos son valores referenciales de como a cambiado la población históricamente. (INEC, 2015)

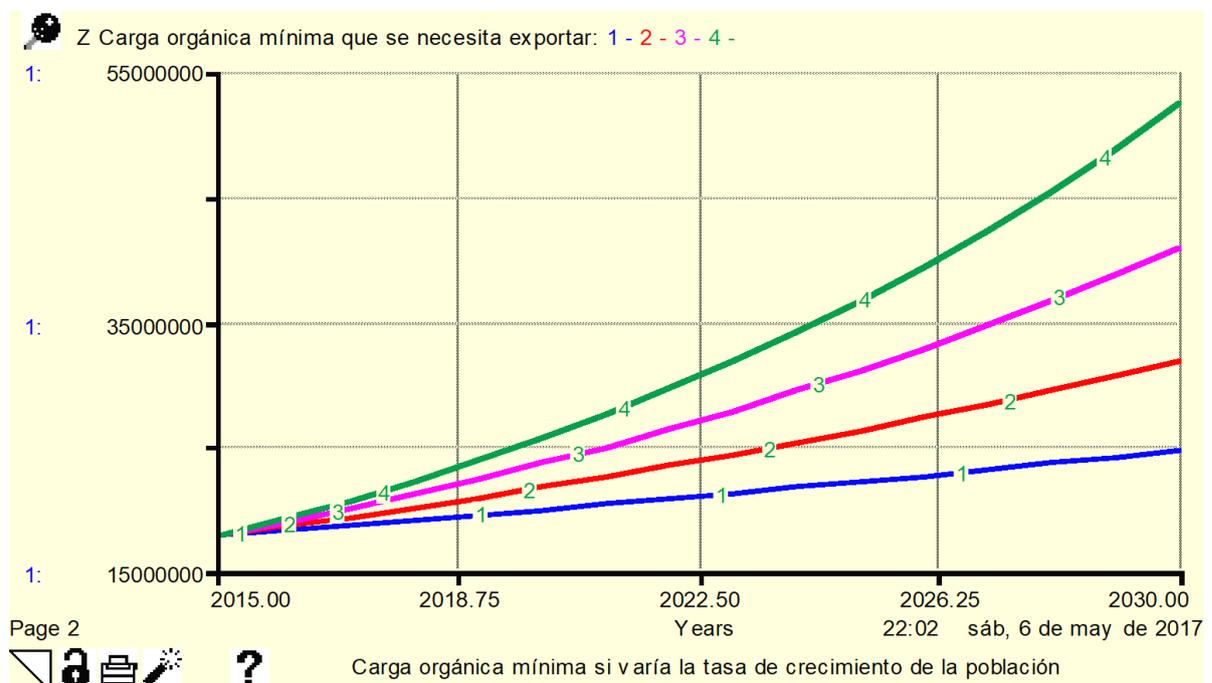


Figura 12: Análisis de sensibilidad para diferentes valores de la tasa de crecimiento de la población (residentes).

En la figura 13 se tiene un análisis de sensibilidad si varía la tasa de crecimiento itinerante  $\frac{dCT}{dt}$  va a tomar valores de {0.04; 0.08; 0.12; 0.16}. Los valores de  $\frac{dCT}{dt}$  escogidos son valores referenciales de como a aumentado los turistas en Galápagos históricamente. (INEC, 2015)

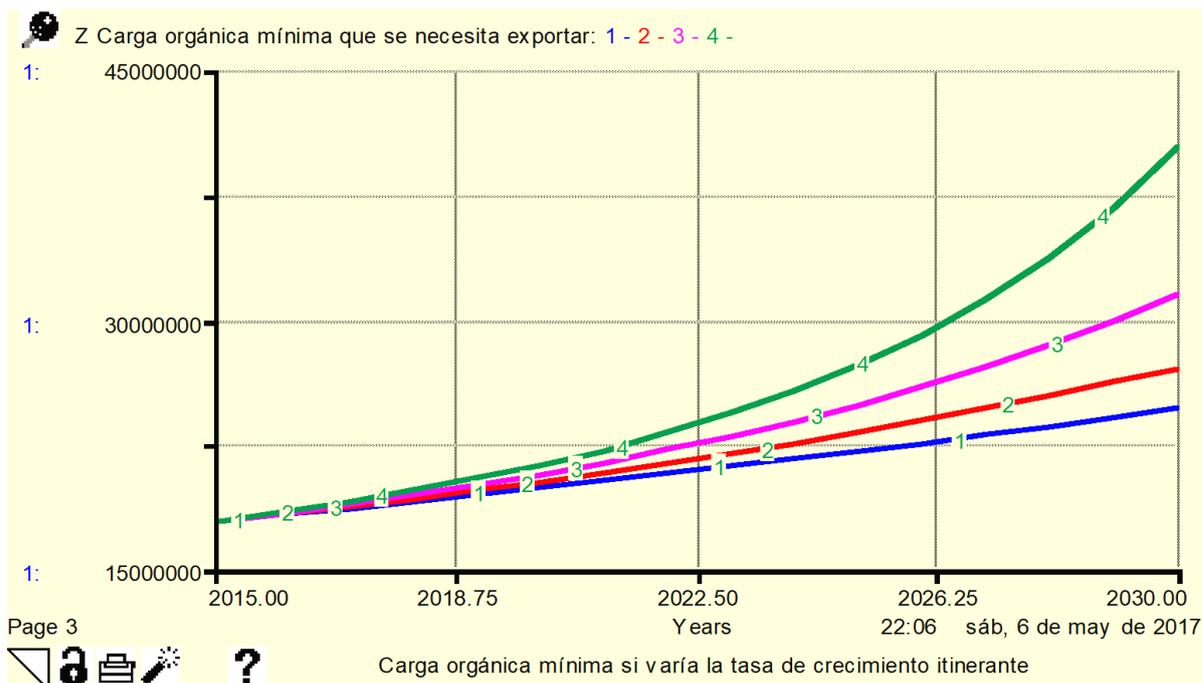


Figura 13: Análisis de sensibilidad para diferentes valores de la tasa de crecimiento itinerante.

En la Figura 14 se tiene un análisis de sensibilidad si varía la tasa de crecimiento de la población y la tasa de crecimiento itinerante al mismo tiempo.



Figura 14: Análisis de sensibilidad para diferentes valores de la tasa de crecimiento de la población (residentes) y de la tasa de crecimiento itinerante (turistas).

Si en los próximos 15 años el crecimiento de la población de Galápagos y el crecimiento de turistas no es significativa, la carga necesaria mínima será aproximadamente 24,674,240.71 Kg (Tabla 3), los buques de carga que actualmente operan podrían transportar la carga, y no se generaría desabastecimiento en Galápagos porque actualmente los buques transportan 19.985.629 Kg (Agencia de Regulación y Control de la Bioseguridad y Cuarentena para Galápagos) y es aproximadamente el 30% de la carga total (Wildaid, 2012)

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis de sensibilidad nos permite prever la carga orgánica mínima necesaria que se necesita exportar desde el Ecuador continental a Galápagos. Cuando se considera un incremento de la población de Galápagos o de los turistas por las figuras 12, 13 y 14 se

puede observar que la carga necesaria mínima aumenta, con los buques que actualmente operan no se podrían transportar esta carga, ya que la capacidad de los buques actualmente es aproximadamente 66,000 toneladas al año (Wildaid, 2012) para que no se produzca desabastecimiento será necesario poner en operación otro buque en los próximos años.

Uno de los problemas críticos ocurre cuando un buque de carga sufre algún accidente y la carga no llega a Galápagos (un caos en sistemas dinámicos), históricamente cuando ocurre este suceso se produce desabastecimiento de productos, obligando a que se transporte carga vía aérea pero el costo de los productos aumenta drásticamente.

El modelo matemático propuesto permitió proyectar la carga orgánica mínima necesaria en los próximos 15 años para cubrir la demanda de Galápagos y así prevenir desabastecimiento de productos.

En el análisis de sensibilidad las tasas de crecimiento de la población, y la tasa de crecimiento de turistas se consideraron valores diferentes para ver la influencia en la demanda de los productos orgánicos.

Los incrementos de la tasa de crecimiento de la población, así como de la tasa de crecimiento de turistas aumentan la demanda de productos drásticamente, para cubrir esta demanda se recomienda poner en operación un nuevo buque de carga o incentivar a los habitantes de Galápagos a producir más productos orgánicos en sus fincas agrícolas.

El modelo matemático propuesto es útil experimentalmente, ya que permite analizar diferentes escenarios sobre el comportamiento de la cadena de suministro de transporte de carga desde el Ecuador continental hacia Galápagos.

## **8. REFERENCIAS**

Agarwal, A. y Shankar, R. (2005): "Modeling supply chain performance variables". *Asian Academy of Management Journal*, Vol.10, No.2, pp. 47-68, India.

Agencia de Regulación y Control de la Bioseguridad y Cuarentena para Galápagos (ABG)

Andres, B.; Sanchis, R.; Poler, R. (2016). A Cloud Platform to support Collaboration in Supply Networks. *International Journal of Production Management and Engineering*.

Angerhofer, B. y Angelides, M. (2000): "System dynamics modelling in supply chain management". *Winter Simulation Conference*.

Aracil, J. (1995): *Sistemas Dinámicos*, Publicaciones de Ingeniería en Sistemas, Madrid.

Berube, P. (2015): "La demanda y oferta de productos frescos Galápagos". *Conservation International*. Galápagos.

Betria, M. y Lara, L. (2011): "Simulación de una cadena de abastecimiento". *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*. Florianópolis, SC, Brasil, v. 3, n. 2, p. 173-188

Campuzano, F., Martínez, E. & Ros, L. (2010). Traditional and collaborative supply chains: Analysis of its influence on the demand variability management. *Dyna*, 85(1), 33-40.

- Chalupsky, H. & MacGregor, R.M. (2006): STELLA - a Lisp-like language for symbolic programming with delivery in Common Lisp, C++ and Java. University of Southern California.
- Chopra, S. y Meindl, P. (2013): “Supply Chain Management”. Prentice Hall, New Jersey.
- Dirección del Parque Nacional Galápagos y Observatorio de Turismo de Galápagos. Informe de visitantes a las áreas protegidas de Galápagos: 2015, Puerto Ayora, Galápagos, Ecuador.
- Dirección del Parque Nacional Galápagos y Observatorio de Turismo de Galápagos. Informe de visitantes a las áreas protegidas de Galápagos: 2016, Puerto Ayora, Galápagos, Ecuador.
- Espíritu Navarro, C. (2013): “Cadenas de suministro de ciclo cerrado. Diseño de una red logística de ciclo cerrado de recuperación en el ejército de tierra español”. Tesis Doctoral. Universidad Rey Juan Carlos. Madrid.
- Forrester, Jay W. (1961): Industrial dynamics. Cambridge, Mass.: MIT Press (trad. en Buenos Aires: El Ateneo, 1972).
- GoldSim Technology Group LLC (2007): “ Dynamic Simulation and Supply Chain Management”. United States.
- Guide, D. y Van Wassenhove, L. (2009): “The evolution of Closed-Loop Supply Chain research”. Operations Research. Vol. 57, No.1, pp. 10–18
- INEC (2015); Censo de Población y Vivienda de Galápagos 2015 (CPVG).
- Mbang, A. y James, J. (2012): “A New Introduction to Supply Chains and Supply Chain Management: Definitions and Theories Perspective”. International Business Research. Vol. 5, No. 1.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca y Ministerio del Ambiente. Informe 2012

Ministerio de transporte y obras públicas. Informe 2011

Mula, J.; Campuzano, F. Díaz, M. y Carpio, K. (2013): “A system dynamics model for the supply chain procurement transport problem: comparing spreadsheets, fuzzy programming and simulation approaches”. *International Journal of Production Research*.

Oliva, F. y Revetria, R. (2008): “A System Dynamic Model to Support Cold Chain Management in Food Supply Chain”, 12th WSEAS International Conference on SYSTEMS, Italia.

Palacios, Pablo (2012). “Proyecto encadenamientos locales Galápagos.” Fundación Charles Darwin. Galápagos.

Riddalls, C.E., Bennett, S y Tipi, Nicoleta S. (2000): “Modelling the dynamics of supply chains. *International Journal of Systems Science*, 31 (8). pp. 969-976.

Rodríguez, A.; Morales, A. y Sánchez, A. (2008): “Dynamic Analysis and Control of Supply Chain Systems”. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados Depto. Ing. Electrica, Unidad Saltillo & Unidad Guadalajara. México.

Salcedo, A. (2008): “Galápagos conflictos en el paraiso”. Serie Magíster. Vol. 83. Quito.

Sterman, J.D. 2000. *Business dynamics – systems thinking and modeling for a complex world*. Boston: Irwin McGraw-Hill

Van der Heyden, D. y Camacho, P., 2006. *Guía metodológica para el análisis de cadenas productivas*. Quito: Plataforma Ruralter.

Wang, H.F. y Hsu, H.W. (2010): “A closed-loop logistic model with a spanningtree based genetic algorithm”. *Computers & Operations Research*. Vol. 37, pp. 376-389.

Wildaid (2012). “The Quarantine Chain: Establishing an effective biosecurity system to prevent the introduction of invasive species into the Galapagos islands.” Galápagos.