

UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN ESTOCÁSTICA PARA DETERMINAR EL TAMAÑO DE LA FLOTA DE VEHÍCULOS DE TRANSPORTE TERRESTRE PARA LAS ISLAS GALÁPAGOS

Sandoya Sánchez Fernando, Ph.D.¹

Resumen En ecosistemas frágiles, como las Islas Galápagos, el aumento del tráfico y la demanda de transporte por parte de la población y los sectores productivos pueden ocasionar consecuencias indeseables, principalmente congestión y contaminación ambiental bastante mayores que lo que puede considerarse aceptable para una zona que es santuario de la vida silvestre y Patrimonio de la humanidad. En esta investigación, básicamente se realiza un análisis de la oferta actual de transporte motorizado en Galápagos, se estima el estado actual de la demanda de transporte terrestre motorizado en las islas, y se desarrolla un modelo de optimización estocástica que establece límites para el tamaño del parque automotor, en el cual se plantea un objetivo social: maximizar el nivel de servicio a la población y cuyas restricciones son: la capacidad de la infraestructura, las emisiones indeseables al medio ambiente, capacidad adquisitiva de la población, y una cobertura limitada a los viajes motorizados "cortos", que podrían cubrirse a pie o con bicicleta.

Palabras Claves: Optimización estocástica, modelización del transporte.

Abstract. In fragile ecosystems such as the Galapagos Islands, the increase in traffic and transport demand by the population and the productive sectors can lead to undesirable consequences, notably congestion and pollution far greater than what can be considered acceptable for an area considered as Wildlife Sanctuary and a World Heritage Site by the United Nations Organization for its natural importance to the common heritage of humanity. In this research, basically, an analysis of the current supply of motorized transport in Galapagos is developed, the current state of demand for motorized road transport is estimated on the islands and a stochastic optimization model is designed. The model sets limits for the fleet size, in which arises a social objective: to maximize the level of service to the population and whose restrictions are: the capacity of the infrastructure, environmentally undesirable emissions, the population purchasing power and a constraint that indicate that "short trips" are only made walk or bike.

Keywords: Stochastic optimization, transport modeling.

Recibido: Mayo 2015

Aceptado: Agosto 2015

1. INTRODUCCIÓN

El Ecuador tiene un territorio que está constituido por una parte continental y una región insular. Las Islas Galápagos corresponden a esta región insular, y políticamente conforman la Provincia de Galápagos. De todas las Islas sólo 5 están parcialmente colonizadas: Baltra, Floreana, Isabela, San Cristóbal y Santa Cruz. La superficie terrestre que ocupan es de 7,880 km², de los cuales solo 288.7 km² corresponden a territorio colonizado; es decir un 3.3% de la superficie total de las Islas, el resto corresponde a las áreas protegidas del Parque Nacional.

Esta Provincia es reconocida por ser el área geográfica que es el centro de mayor atracción y visitas turísticas del Ecuador, pero también una de las reservas ecológicas más grandes e importantes del planeta, por lo que se la reconoce como Patrimonio Natural de la Humanidad. Para garantizar su conservación, se ha desarrollado toda una legislación, y su carácter de región especial es reconocido incluso a nivel constitucional; así, el artículo

258 de la Constitución Política de la República del Ecuador, señala que "... su planificación y desarrollo se organizará en función de un estricto apego a los principios de conservación del patrimonio natural del Estado y del Buen Vivir... ". Sin embargo, es la provincia del Ecuador donde más ha aumentado la población en términos relativos, como se presenta de manera resumida en la Figura 1. El gráfico indica un sostenido incremento de la tasa de crecimiento anual de su población, que llegó a ser de más del doble de la tasa de crecimiento anual observada en el Ecuador continental.

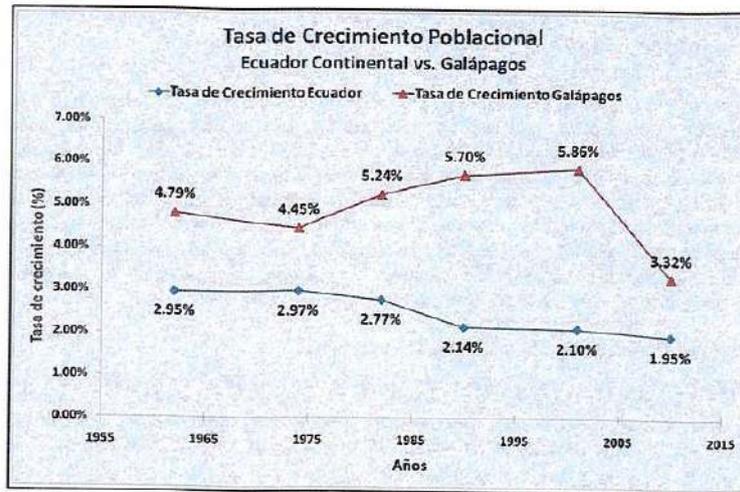
Esta tendencia al crecimiento poblacional incide de manera directa en mayores necesidades de movilización de la población, y por tanto presiona por la introducción de más vehículos motorizados terrestres. La pregunta que surge es ¿cuáles son las necesidades reales de transportación por medio de vehículos motorizados de esta población?; es decir que oferta de transporte debería existir para atender con buen nivel de servicio sus necesidades de viaje.

¹Sandoya Sánchez Fernando, Ph.D., Profesor Departamento Matemáticas, Facultad Ciencias Naturales y Matemáticas ESPOL (e-mail: fsandoya@espol.edu.ec), Guayaquil.

FIGURA 2-1.

Incremento relativo de la población de Galápagos vs. el Ecuador continental

Fuente: INEC. Censos de Población y Vivienda. Años 1950-2010, Elaboración: Propia



Debido a las características especiales de Galápagos, se encuentran limitados los derechos de migración interna, trabajo o cualquier otra actividad pública o privada que pueda afectar al medio ambiente, en este marco también existen restricciones legales sobre los vehículos que pueden ingresar o permanecer en Galápagos.

En el literal b) del numeral cuarto del artículo 6 de la "Ley Orgánica de Régimen Especial para la Conservación y Desarrollo Sustentable de la Provincia de Galápagos", se señala que las autoridades deben aprobar los lineamientos generales para la planificación regional de determinación del número y tipo de vehículos motorizados y maquinarias que puedan entrar a la provincia de Galápagos; y, la fijación de los niveles máximos permisibles de contaminación ambientales aplicables en la provincia de Galápagos. Así, se vuelve necesario establecer el tamaño de la flota vehicular terrestre a partir de un modelo matemático que incluya la

satisfacción de la demanda de movilidad, la capacidad económica de la población, la capacidad de la infraestructura vial instalada, y la contaminación generada por esos vehículos.

2. PARQUE AUTOMOTOR ACTUAL DE GALÁPAGOS

Para conocer como está conformado el parque automotor de las islas, se realizó un inventario a través de la depuración de los registros físicos de matriculación de los vehículos, y de solicitudes de ingreso a las islas. De esta manera se determinó, que a octubre de 2012, en Galápagos existen en total 2,572 vehículos motorizados terrestres, distribuidos de acuerdo al sector económico al que pertenecen y tipo de vehículo, como se muestra en la Tabla 2 1. En la Tabla 2 2, Tabla 2 3 y la Tabla 2 4 se reportan los datos desagregados a nivel cantonal.

TABLA 2-1.
Vehículos que se encuentran registrados en Galápagos a octubre de 2012

Fuente: Inventario vehicular Octubre 2012

CLASE	SECTOR											SUMA
	Por Cuenta Propia					Comercial				Público	Particular	
	Agropecuario	Artisanal	Comercial	construcción	Pesca	Carga	Institucional	Taxi	Turístico	Masivo		
Automóvil/ Jeep	15	0	18	1	3	0	21	0	4	1	98	161
Camión	26	1	29	6	2	19	33	0	2	0	30	148
Camioneta	45	0	35	4	17	25	126	375	45	7	170	849
Especial	4	0	5	0	0	3	33	0	1	0	10	56
Furgoneta	1	0	0	0	0	0	8	0	8	6	12	35
Motocicleta/ Cuadrón	2	0	8	0	3	0	97	0	2	0	1,149	1,261
Ómnibus/ Bus	0	0	0	0	0	0	3	2	23	23	11	62
TOTAL	93	1	95	11	25	47	321	377	85	37	1,480	2,572

TABLA 2-2.
Vehículos que se encuentran registrados en el Cantón San Cristóbal a octubre de 2012
Fuente: Inventario vehicular Octubre 2012

CLASE	SECTOR											SUMA	
	Por Cuenta Propia					Comercial				Público			Particular
	Agropecuario	Artesanal	Comercial	Construcción	Pesca	Carga	Institucional	Taxi	Turístico	Masivo			
Automóvil/ Jeep	5	0	12	0	3	0	14	0	3	0	44	81	
Camión	13	0	0	0	0	2	22	0	2	0	8	47	
Camioneta	0	0	15	1	10	1	58	104	9	0	74	272	
Especial	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0	2	16	
Furgoneta	0	0	0	0	0	0	3	0	2	2	1	8	
Motocicleta/ Cuadrón	2	0	2	0	1	0	52	0	0	0	446	503	
Ómnibus/ Bus	0	0	0	0	0	0	1	0	9	0	1	11	
TOTAL	20	0	29	1	14	3	164	104	25	2	576	938	

TABLA 2-3.
Vehículos que se encuentran registrados en el cantón Santa Cruz a octubre de 2012
Fuente: Inventario vehicular Octubre 2012

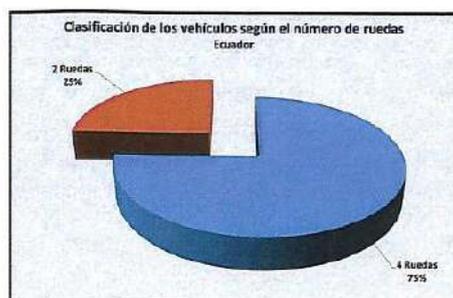
CLASE	SECTOR											SUMA	
	Por Cuenta Propia					Comercial				Público			Particular
	Agropecuario	Artesanal	Comercial	Construcción	Pesca	Carga	Institucional	Taxi	Turístico	Masivo			
Automóvil/ Jeep	8	0	5	1	0	0	7	0	1	0	51	73	
Camión	10	0	26	6	2	12	6	0	0	0	19	81	
Camioneta	26	0	17	3	4	1	53	256	23	0	87	470	
Especial	3	0	4	0	0	2	12	0	1	0	8	30	
Furgoneta	1	0	0	0	0	0	5	0	4	1	10	21	
Motocicleta/ Cuadrón	0	0	1	0	0	0	38	0	1	0	628	668	
Ómnibus/ Bus	0	0	0	0	0	0	1	2	12	23	10	48	
TOTAL	48	0	53	10	6	15	122	258	42	24	813	1,391	

TABLA 2-4.
Vehículos que se encuentran registrados en el Cantón Isabela a octubre de 2012
Fuente: Inventario vehicular Octubre 2012

CLASE	SECTOR											SUMA	
	Por Cuenta Propia					Comercial				Público			Particular
	Agropecuario	Artesanal	Comercial	Construcción	Pesca	Carga	Institucional	Taxi	Turístico	Masivo			
Automóvil/ Jeep	2	0	1	0	0	0	0	0	0	1	3	7	
Camión	3	1	3	0	0	5	5	0	0	0	3	20	
Camioneta	19	0	3	0	3	23	15	15	13	7	9	107	
Especial	1	0	1	0	0	1	7	0	0	0	0	10	
Furgoneta	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	1	6	
Motocicleta/ Cuadrón	0	0	5	0	2	0	7	0	1	0	75	90	
Ómnibus/ Bus	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	3	
TOTAL	25	1	13	0	5	29	35	15	18	11	91	243	

En cuanto a vehículos de dos ruedas: motonetas Y motocicletas, se encontró que corresponden a una alta proporción del total de vehículos presentes en Galápagos, constituyendo más del 50%, lo cual contrasta con la situación en el resto del territorio ecuatoriano, en el que son aproximadamente El 25%. En la FIGURA2-1 se puede apreciar esto.

FIGURA2-1.
Clasificación de los vehículos según el número de ruedas en Ecuador y Galápagos, 2012
Fuente: Inventario vehicular Octubre 2012, Elaboración: Propia

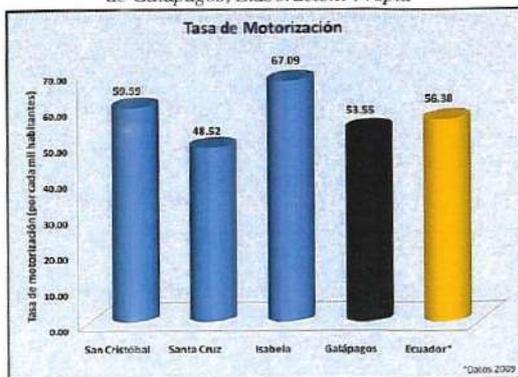


2.1 TASAS DE MOTORIZACIÓN:

La tasa de motorización es un indicador de la posesión (y por tanto, indirectamente, de uso) de vehículos motorizados terrestres por parte de una población. Se calcula como la cantidad de vehículos motorizados por cada mil habitantes en un lugar y período dado. A octubre del 2012, la tasa de motorización en Galápagos, por cantones, es la mostrada en la Figura 2.2.

FIGURA 2-2.

Tasas de motorización en Galápagos a octubre 2012 (no incluye vehículos de dos ruedas)
Fuente: Parque Nacional Galápagos y Consejo de Gobierno de Galápagos, Elaboración: Propia



De la Figura 2-2 se puede concluir que la tasa de motorización de Galápagos a octubre de 2012 es similar a la del Ecuador continental del 2009, el hecho es de por sí sorprendente desde el hecho de que las distancias a recorrer en las Islas son inferiores a las que se recorren en la zona continental. Como un caso extremo de comparación se presentan los datos de índices de motorización históricos de las Islas Maldivas, un pequeño país insular situado en el océano Índico, al sur de Asia, constituido por muchas islas, de las cuales alrededor del 10% están habitadas, este archipiélago está conformado principalmente por arrecifes de coral vivos y barras, sin embargo sus tasas de motorización son relativamente bajas respecto a Galápagos, como se observa en la Figura 2-3.

Cabe anotar que el modelo de gestión de las Maldivas determina que sólo se pueda admitir un número limitado de turistas al año, privilegiando el turismo de lujo que les deja cuantiosos ingresos; y obliga a mantener el entorno natural en las mismas condiciones destinando gran parte de los ingresos por turismo a la conservación. Este país tiene algunas similitudes con las Islas Galápagos, lo cual nos lleva a realizar ciertas comparaciones, ambas regiones se caracterizan por la limpieza y claridad de sus aguas y la abundancia de vida subacuática, en cuanto a su superficie habitable, las Maldivas tienen una superficie terrestre menor a la de Galápagos, pero en cuanto a la

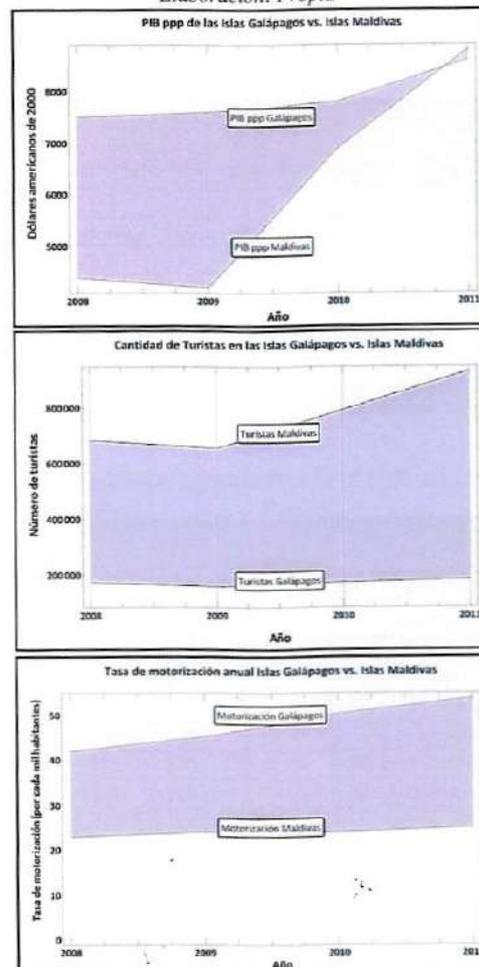
superficie colonizada las cifras son parecidas, 298 km² y 264 km² respectivamente. Para el año 2011 el PIB per cápita (PPP) de las Maldivas y el Ecuador fue muy similar: 8,600 dólares por persona por año para el caso ecuatoriano y 8,800 dólares por persona por año para las Maldivas.

FIGURA 2-3.

Análisis comparativo entre las Islas Galápagos y las Islas Maldivas

Fuente: Banco Mundial, Banco Central del Ecuador y Consejo de Gobierno de Galápagos.

Elaboración: Propia



3. IMPACTO AMBIENTAL DEL PARQUE AUTOMOTOR TERRESTRE ACTUAL

Aquí se desarrolla el análisis de impacto ambiental de las actividades de transporte derivadas de la utilización de vehículos motorizados terrestres. Vale destacar que los resultados del estudio podrían, indirectamente, dar indicios de la contaminación y afectación al medio ambiente que se puede generar en las calles debido a una elevada tasa del parque automotriz. Una limitación del parque automotor ayuda a disminuir esta tasa, propendiendo así a descontaminar el ambiente

de emisiones de gases contaminantes, ruidos y congestión vehicular. El impacto de otras externalidades como la generación de llantas, repuestos usados y aceite quemado de motor es atenuado por disposiciones legales, que obligan a que éstos desperdicios deben ser retornados hacia el continente. De esta manera, el análisis de la generación de estas externalidades se realizará desde el punto de vista económico, estimando el costo que representa la logística inversa involucrada para sacar estos elementos de las Islas.

Las reacciones de combustión que ocurren en los motores de combustión interna generan como productos dióxido de carbono, y agua si las reacciones ocurren completamente, esto generalmente es así en motores nuevos. Conforme el motor se envejece, se producen las reacciones de combustión incompletas y esto genera monóxido de carbono adicionalmente, esto hace que las emisiones a la atmósfera estén constituidas por estos compuestos, los cuales sin duda deben ser monitoreados cuando se trata de investigar las condiciones del aire ambiente. Es por estas razones que al tratar de desarrollar el proyecto de estudio del parque automotor en las islas Galápagos, surgió la hipótesis de si el existente parque automotor está o no generando impactos sobre el aire ambiente de las islas. Como las gasolinas y el diesel tienen en su composición azufre, entonces se investiga por esas razones la presencia de dióxido de azufre en las emisiones. Además a la temperatura de funcionamiento de los motores de combustión interna, surgen reacciones entre el oxígeno del aire usado para la combustión y el nitrógeno del aire, lo que da como resultado los óxidos de nitrógeno (NOx). En todas las investigaciones de contaminación del aire ambiente se determinan estos compuestos para establecer parámetros de contaminación.

Siempre que se analiza la calidad del aire ambiente, se hace en términos de emisiones provenientes de combustión de combustibles fósiles (petróleo y derivados) no hay otros compuestos en estas emisiones de los motores de combustión interna que pudieran ejercer impactos negativos sobre la atmósfera, excepto aquellos que provienen de la salida por escapes de combustible no combustionado, lo que en los motores modernos no ocurre significativamente. La legislación europea y americana, recomienda la determinación de impactos sobre el aire ambiente en términos de concentraciones de los compuestos considerados en este estudio: NOx, SO2 y CO.

Respecto a cuáles son límites aceptables para estas emisiones en un medio ambiente frágil como Galápagos, los impactos sobre el ambiente de Galápagos provenientes de la

combustión de combustibles en motores del parque vehicular serán siempre de baja magnitud e importancia.

Una vez, revisada toda la información y efectuado el análisis comparativo entre islas, la tasa de emisión global se muestra en la Tabla 3-1 y en la Figura 3-1.

TABLA 2-5.
Resumen de la tasa de emisión promedio de los contaminantes atmosféricos

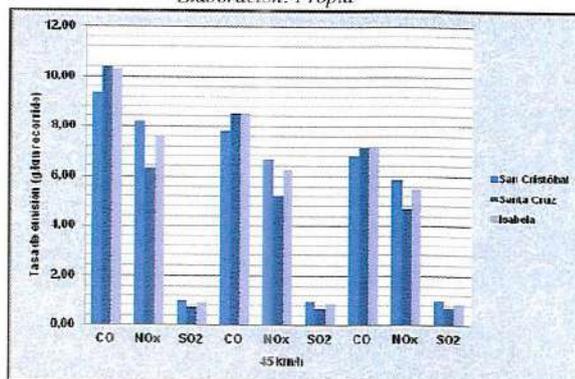
Fuente: Registro vehicular del Consejo de Gobierno del Régimen Especial de Galápagos y CORINAIR.
Elaboración: Propia

Emisiones	30 km/h			45 km/h			60 km/h		
	CO	NO _x	SO ₂	CO	NO _x	SO ₂	CO	NO _x	SO ₂
San Cristóbal	11.86	5.46	0.582	9.74	4.65	0.558	8.25	4.27	0.568
Santa Cruz	11.70	5.45	0.582	9.61	4.64	0.556	8.16	4.25	0.556
Isabela	13.14	5.54	0.582	10.68	4.72	0.556	8.94	4.33	0.556
PROMEDIO	12.23	5.48	0.582	10.01	4.67	0.557	8.45	4.28	0.560

FIGURA 2-4.

Tasa de emisión vehicular promedio de las Islas Galápagos

Fuente: Registro vehicular del Consejo de Gobierno del Régimen Especial de Galápagos y CORINAIR.
Elaboración: Propia



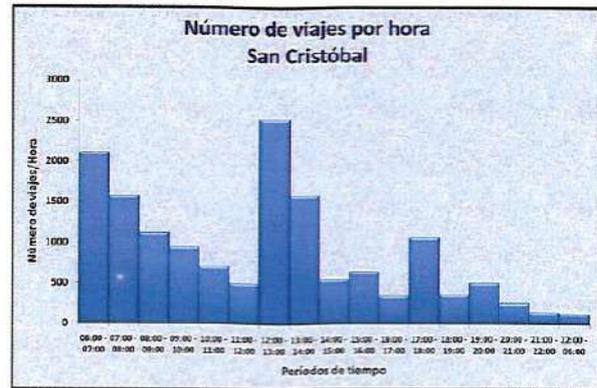
Estas emisiones están dentro de los rangos aceptables para un buen nivel de vida, sin embargo en un medio ambiente frágil como Galápagos, pueden considerarse como cotas que no deben ser superadas en el futuro. Así, estas fueron incluidas dentro del modelo matemático de optimización como restricciones.

4. DETERMINACIÓN DE LA NECESIDAD DE VIAJES MOTORIZADOS A TRAVÉS DE MATRICES ORIGEN – DESTINO

Esta estimación de las necesidades de viajes de la población se realizó a partir de la encuesta a hogares, en la cual se registran los desplazamientos efectuados por miembros de la familia (hogar) en todos los modos de transporte, durante el periodo temporal de

referencia. La información recopilada se refiere a modos de movilización, preferencias de medios de transporte, horarios de los viajes, motivos de los viajes, lugar de destino, recorrido en tiempo o distancia, gastos relacionados a la movilización.

En la Figura 4-1 se presenta de manera resumida los resultados de la encuesta en cuanto a número de viajes por día y medio de transporte utilizado. El análisis individualizado por cada isla habitada permitió determinar las matrices de demanda origen destino, horas pico, etc. A modo de ejemplo, en la Figura 4-2 se presenta el gráfico de los viajes generados según zonas atractoras o generadoras de viajes en la capital de la Provincia, San Cristóbal. En la referencia, se observa el gráfico de la movilidad pero según la hora en que se generan los viajes, de esta manera se puede establecer la hora pico.



4.1 ESTABILIDAD DE LAS MATRICES DE VIAJES

Este tema es complejo, a pesar que rara vez se discute la estabilidad en el tiempo de las matrices origen – destino. De acuerdo a Juan de Dios Ortúzar (1), se sabe por experiencia que la realidad no es estática sino más bien dinámica. El nivel de los flujos de tráfico sobre cualquier arco de la red varía diariamente de modo significativo. Generalmente esto representa un 10% de variación de los niveles de flujo en días parecidos y lo mismo para el mismo día de la semana y en semanas parecidas (es decir, se excluyen las variaciones estacionales). Estas variaciones en los flujos de tráfico generalmente son debidas a dos causas: variaciones en las matrices de los viajes que originan tales flujos y variaciones diarias en las elecciones del recorrido.

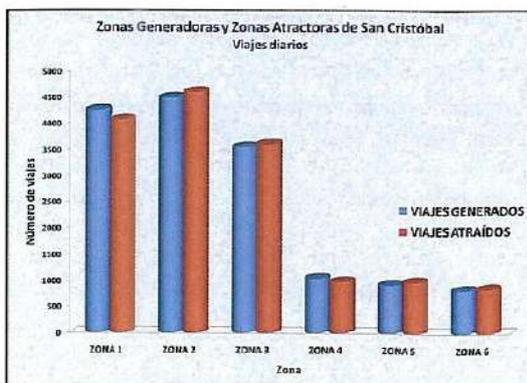
Fuente: Encuesta a hogares para determinar las necesidades de movilización de la población Galápagos
Elaboración: Propia

Clase de Vehículo	San Cristóbal	Santa Cruz	Isabela
Automóvil	740	144	0
Camioneta	8,536	18,414	3,356
Furgoneta	646	58	0
Omnibus	647	565	454
Motocicleta	2,136	2,045	55
Caminar	1,635	4,723	1,157
Bicicleta	1,229	1,580	489
Total de viajes	15,069	27,529	5,511

FIGURA 2-5.

Comparativos por Zonas Generadoras y Atractoras de San Cristóbal

Fuente: Encuesta a hogares para determinar las necesidades de movilización de la población.
Elaboración: Propia



Fuente: Encuesta a hogares para determinar las necesidades de movilización de la población.
Elaboración: Propia

4.2 DISTRIBUCIÓN DE VIAJES

La distribución de viajes es un proceso mediante el cual los viajes generados en una zona se asignan a otras zonas en el área de estudio. Por ejemplo, si el análisis de generación de viajes conduce a una estimación de 200 viajes en la zona 3, entonces el análisis de distribución de viajes determinará cuántos de esos viajes se realizan entre la zona 3 y todas las demás zonas. Dentro de la literatura se encuentran varios métodos para la distribución de viajes. Entre los más usados se encuentran el modelo gravitacional, el cual emplea los atributos del sistema de transporte, este modelo ha sido calibrado para muchas áreas urbanas, además ha alcanzado un uso casi universal debido a su simplicidad, exactitud. Entre los otros métodos se encuentra el método de crecimiento, el cual considera la situación en donde se conoce la matriz de viajes obtenida de algún estudio anterior o estimada a partir de una encuesta reciente, y se pretende estimar la matriz

Correspondiente al año de diseño (p. ej., dentro Los métodos que se encuentran en la literatura del estudio de la demanda, dependen de la información que se encuentra disponible, incluyendo el área de estudio, por ejemplo, estudiar la demanda de la ciudad de Guayaquil o Quito, es muy distinto a lo que se presenta en las Islas Galápagos, por ser un Régimen Especial y estar bajo regulaciones respecto a cualquier actividad humana. Es por ello que la demanda esperada está más asociada al crecimiento de la población en cada zona. El método de factor de crecimiento uniforme consiste en determinar el factor de crecimiento de la población con respecto al año base, en el cual se consideran los registros del último censo poblacional realizado en el año 2010. La población objetivo que es considerada, son los habitantes mayores a 5 años de edad, que para el año 2010 representaban el 89.89% de la población de Galápagos; es decir, 22,989 habitantes.

de 10 años).

Los resultados esperados de la población mayor a 5 años, se muestra un resumen de estos cálculos en la Tabla 4-1 a cinco, diez, quince y veinte años:

4.3. MODELO DE FACTOR DE CRECIMIENTO UNIFORME VS. MODELO GRAVITACIONAL

PRIMER ESCENARIO. Demanda actual con crecimiento uniforme (Moderado).

Este escenario está bajo el supuesto de que la demanda de viajes observada crece el 10, 20, 30 y 40% después de 5, 10, 15 y 20 años respectivamente, respecto a la demanda observada en la base 2012 en cada uno de los cantones. (Véase la Tabla 4-2).

TABLA 2-6.
Predicción de la Demanda de Viajes de las Islas Galápagos (Moderado)
Fuente: Encuesta a hogares para determinar las necesidades de movilización de la población.
Elaboración: Propia

Año	San Cristóbal		Santa Cruz		Isabela	
	Factor de crecimiento	Observada	Factor de crecimiento	Observada	Factor de crecimiento	Observada
2012	-	1,977.00	-	3,311.00	-	458.00
2016	10.00%	2,174.70	10%	3,642.10	10%	503.80
2021	20.00%	2,372.40	20%	3,973.20	20%	549.60
2026	30.00%	2,570.10	40%	4,635.40	30%	595.40

En la Tabla 2-7 a continuación, presenta un resumen de la predicción de los viajes totales esperados durante la hora pico de cada uno de los cantones, los cuales fueron obtenidos por medio del modelo gravitacional.

Tabla 2-7.
Predicción de la Demanda de Viajes de las Islas Galápagos
Fuente: Encuesta a hogares para determinar las necesidades de movilización de la población de Galápagos, Elaboración: Propia

Año	San Cristóbal		Santa Cruz		Isabela	
	Tasa de Crecimiento	Observada	Tasa de Crecimiento	Observada	Tasa de Crecimiento	Observada
2012	-	1,977.00	-	3,311.00	-	458.00
2013	5%	2,078.36	5%	3,480.81	5%	482.64
2014	7%	2,115.53	7%	3,536.22	8%	493.60
2015	8%	2,139.77	8%	3,582.93	9%	500.59
2016	10%	2,169.99	10%	3,632.27	11%	508.00

2017	11%	2,200.46	11%	3,682.12	13%	515.49
2018	13%	2,231.24	13%	3,732.46	14%	523.12
2019	14%	2,262.23	14%	3,782.58	16%	530.83
2020	16%	2,293.43	16%	3,833.18	18%	538.58
2021	18%	2,324.93	17%	3,883.78	19%	546.42
2022	19%	2,356.56	19%	3,934.81	21%	554.30
2023	21%	2388.50	20%	3,985.82	23%	562.30
2024	22%	2,420.36	22%	4,037.17	25%	570.31
2025	24%	2,452.45	23%	4,088.88	26%	578.45

5. OPTIMIZACIÓN DE LA FLOTA VEHICULAR PARA SATISFACER LAS NECESIDADES DE MOVILIZACIÓN DE LA POBLACIÓN

Dado un problema que involucra parámetros conocidos (datos o información que se puede observar o medir) y variables desconocidas (cuyos valores quieren determinarse), denominadas variables de decisión, los modelos matemáticos de optimización son objetos matemáticos que involucran:

- Una función objetivo y,
- Una o varias relaciones (de tipo igualdad o desigualdad) entre las variables.

La función objetivo es la meta que se quiere alcanzar, por ejemplo: maximizar la utilidad, minimizar el costo, minimizar la distancia recorrida, etc., mientras que las restricciones representan las limitaciones, obligaciones, necesidades a cubrir, cotas o disponibilidad de recursos para alcanzar el objetivo, en el caso del problema que analizamos las restricciones consideradas son: la capacidad de la infraestructura de la red vial, el consumo de combustible y la limitación de viajes muy cortos (los intrazonales). Las restricciones pueden ser duras o suaves, en el primer caso el modelo de optimización respetará los límites o metas establecidas estrictamente, en el segundo caso el modelo de optimización tratará en lo posible de respetarlos, pero si existe una buena ganancia en

la función objetivo puede irrespeter “moderadamente” una restricción.

6.1. MODELO MATEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN

El modelo matemático de optimización está conformado por restricciones y función objetivo, que son las siguientes:

Restricciones consideradas en el modelo de transporte

En este estudio se consideraron las siguientes restricciones para la construcción del modelo de optimización:

- ✓ La principal restricción está constituida por las necesidades de viajes que tiene la población y que tiene que ser satisfecha con transporte motorizado. De esta manera constituye una restricción natural del modelo de optimización.
- ✓ La cantidad de emisiones de monóxido de carbono (CO), óxido de nitrógeno (NOx) y dióxido de azufre (SO₂) al medio ambiente, el cual no puede superar ciertos límites permitidos, o metas que se proponga a partir de las autoridades.
- ✓ La capacidad de la infraestructura, principalmente de la red vial. Conforme aumenta el parque automotor los niveles de servicio de la infraestructura se van deteriorando, existen límites aceptables para estos niveles de servicio, si éstos bajan de estas cotas ya no se tienen

condiciones aceptables para la normal movilización de la población.

- ✓ La capacidad de compra de la población es un elemento importante a considerar dentro del modelo, niveles bajos de poder adquisitivo pueden presionar por un aumento del parque automotor de dos ruedas, particularmente motocicletas, que son baratas y fáciles de adquirir. Se involucra una restricción que relaciona la proporción de motos que se requiere tener en las islas, respecto al parque automotor total.
- ✓ Consumo total de combustible de la flota de vehículos motorizados durante la hora pico.
- ✓ La capacidad de la infraestructura resultó ser una restricción inactiva. Es importante medir el nivel de servicio de la infraestructura para identificar si su alta demanda vehicular y una escasez de oferta de vías generan la congestión vehicular afectando al medio ambiente siendo esta una externalidad negativa que afecta directamente a la población de las islas.

Función Objetivo

- El objetivo es la satisfacción de la demanda de movilización de la población; y más específicamente la maximización del nivel de servicio de la matriz de viajes origen - destino.
- El modelo matemático de optimización para determinar el número óptimo de vehículos necesarios para satisfacer la demanda generada por la población de cada cantón presenta los siguientes parámetros y variables, los cuales se detallan a continuación:

Índices

- Sean los índices i, j las zonas geográficas, que representan a cualquier punto de origen o destino de los viajes.
- El índice k identifica el tipo de vehículo motorizado, el cual puede ser vehículo liviano de 4 ruedas o de 2 ruedas.

Datos de entrada (Parámetros):

TCO, la tolerancia permitida de emisión de Monóxido de Carbono (CO).

- TNOx, la tolerancia permitida de emisión de Óxido de Nitrógeno (NOx).
- TSO2, la tolerancia permitida de emisión de Dióxido de Azufre (SO2).
- D_{ij} el número de viajes promedios observados desde la zona i hacia la zona j .
- $dist_{ij}$ La distancia entre los centroides de las zonas i, j .

- $Desv_{ij}$ Desviación típica del número de viajes promedio observados desde la zona i hacia la zona j .
- CD_i Porcentaje de la demanda que será cubierta para los viajes intrazonales i .
- DG_{ij} Demanda esperada de viajes generados bajo una distribución normal desde la zona i hacia la zona j .
- a y b representan la proporción mínima y máxima que existe del número de vehículos de 2 ruedas respecto al total de vehículos livianos existentes.
- O_k Pasajeros promedio transportados en un vehículo motorizado tipo k .
- $meta_comb$ Meta de combustibles que se espera consuman los vehículos durante la hora pico.
- V^k Número de viajes promedio que realiza un vehículo de tipo k en la hora pico.

Variables de decisión:

- X_{ij}^k Número de vehículos de tipo k requeridos para cubrir la demanda de viajes generados desde zona i atraídos por la zona j .

Variables de estado:

- CO_{ij} Emisión de monóxido de carbono generado por los viajes desde la zona i hacia la zona j (el cálculo de esta variable se realiza considerando la emisión promedio por km recorrido por la distancia $dist_{ij}$ entre los centroides de las regiones generadas).
- NOx_{ij} Emisión de óxido de nitrógeno generado por los viajes desde la zona i hacia la zona j (ídem lo anterior).
- $SO2_{ij}$ Emisión de dióxido de azufre generado por los viajes desde la zona i hacia la zona j (ídem lo anterior).
- DC_{ij} Demanda de viajes cubiertos de manera efectiva desde la zona i hacia la zona j .
- Com_{ij} Combustible promedio (en galones) consumido desde para realizar un viaje desde la zona i hacia la zona j . (el cálculo de esta variable se realiza considerando el consumo promedio de combustible por km recorrido por la distancia $dist_{ij}$ entre los centroides de las regiones generadas).

El objetivo es maximizar el **nivel de servicio**, es decir la cobertura de los viajes.

Modelo de optimización

El modelo de optimización propuesto para cumplir con el objetivo de estudio es un modelo de programación estocástica (por la consideración aleatoria en las variables de demanda de viajes), y puede ser formulado de la siguiente manera:

$$Max z = \sum_{ij/DG_{ij}>0} DC_{ij} / DG_{ij}$$

Sujeto a las siguientes restricciones

- [1]. Satisfacción de la demanda de viajes promedios (cobertura).

$$\sum_{ij} DC_{ij} \leq \sum_{ij} D_{ij}$$

- [2]. Relación de los vehículos de 4 ruedas con los de 2 ruedas.

$$a \left[\sum_{i,j} (X_{ij}^{2\text{ruedas}} + X_{ij}^{4\text{ruedas}}) \right] \leq \sum_{i,j} X_{ij}^{2\text{ruedas}}$$

$$\sum_{i,j} X_{ij}^{2\text{ruedas}} \leq b \left[\sum_{i,j} (X_{ij}^{2\text{ruedas}} + X_{ij}^{4\text{ruedas}}) \right]$$

- [3]. Cobertura de los viajes intrazonales.

$$DC_{ii} \leq CD_i * D_{ii}; \quad \forall i$$

- [4]. La cantidad de emisión de monóxido de carbono CO generado para satisfacer la demanda de viajes no puede superar la tolerancia permitida.

$$\sum_{i,j,k} CO_{ij} * X_{ij}^k \leq TCO$$

- [5]. La cantidad de emisión de monóxido de carbono CO generado para satisfacer la demanda de viajes no puede superar la tolerancia permitida.

$$\sum_{i,j,k} NOx_{ij} * X_{ij}^k \leq TNOx$$

- [6]. La cantidad de emisión de monóxido de carbono CO generado para satisfacer la demanda de viajes no puede superar la tolerancia permitida.

$$\sum_{i,j,k} SO2_{ij} * X_{ij}^k \leq TSO2$$

- [7]. Número de vehículos requeridos para satisfacer la demanda de cada uno de los viajes realizados.

$$X_{ij}^k = \frac{DC_{ij}}{O_k}; \quad \forall i, j, k$$

- [8]. La cantidad de combustible consumido por los vehículos que se requieren para satisfacer la demanda de viajes. No puede superar una meta establecida.

$$\sum_{i,j,k} Com_{ij} * V^k * X_{ij}^k \leq \text{meta_comb}$$

- [9]. Restricción lógica (No negatividad de las variables de decisión).

$$X_{ij}^k \geq 0, CO_{ij} \geq 0, DC_{ij} \geq 0; \quad \forall i, j, k$$

Para la inclusión de la restricción [8] que limita la cantidad total de combustible consumido durante la hora pico, se debe considerar que el consumo de combustible depende de la velocidad de circulación, por lo cual se consideraron velocidades promedio dentro de las zonas urbanas y hacia las zonas rurales.

6.2. CALIBRACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO

Según la literatura científica, el consumo de combustible varía de acuerdo a la velocidad promedio del vehículo. Para el cálculo de la meta de combustible a imponer en las restricciones, fue considerado el combustible que se consume a 30 Km/h durante la hora pico; respecto a lo que se consume en los trayectos dentro de la zona urbana es con una velocidad promedio de 45km/h y para los recorridos desde la zona urbana a la rurales es de 60km/h.

Los cálculos para determinar la relación del número de vehículos de 4 ruedas respecto al número de vehículos de 2 ruedas, está relacionado a las condiciones actuales del parque automotor de Galápagos. En la Tabla 5-1, se detalla el número de vehículos motorizados, en la cual constan solo las motos, automóviles y camionetas, excluyendo los vehículos institucionales.

Tomando en cuenta los datos arriba descritos, los parámetros **a** y **b** representan la relación entre los vehículos motorizados de 2 ruedas respecto al total de vehículos como un intervalo; el valor de **a** para San Cristóbal es 0.45 y **b** igual a 0.65, lo cual significa que el número de motos debe de estar entre el 45% y el 65% del total de los vehículos motorizados; de manera similar, para Santa Cruz los valores de **a** y **b** son 0.5 y 0.6 respectivamente; por último para Isabela serian 0.40 y 0.50. Estas cotas pueden calibrarse de diferente manera, de acuerdo a las políticas públicas que se manejen o se quiera implementar respecto a esta relación dentro de la provincia.

Tabla 5-1.
Vehículos Motorizados de 4 y 2 ruedas en los cantones Fuente: Registros físicos de vehículos del Consejo de Gobierno del Régimen Especial de Galápagos.
 Elaboración: Propia

CANTONES	Vehículos Motorizados de 4 ruedas		Vehículos Motorizados de 2 ruedas		Total de Vehículos Motorizados
	TOTAL	% Representativo	TOTAL	% Representativo	TOTAL
San Cristóbal	483	43.40%	630	56.60%	1113
Santa Cruz	281	38.39%	451	61.61%	732
Isabela	99	54.40%	83	45.60%	182

En relación al parámetro CD_i , respecto a los viajes intrazonales estos varían de acuerdo a las condiciones que existen en cada una de las islas, por ejemplo para el Isla San Cristóbal, debido a que presentan pendientes con gradientes medianas se determinó que para distancias menores o iguales a 500 metros para viajes intrazonales se cubrirá el 60% de los viajes efectuados, mientras que para distancias intrazonales mayores a 500 metros se cubrirá el 75% de los viajes; en el caso de la Isla Santa Cruz, esto cambia debido a que presenta un sistema geográfico, con cierto grado de elevación en las pendientes. Así, para distancias menores o iguales a 300 metros será cubierto el 50% de los viajes efectuados, para distancias entre 300 y 400 metros incluido será el 60%, por lo tanto para distancias mayores a 400 corresponde al 75%; para el caso de Isabela, la

demanda generada para viajes intrazonales, menores o iguales a 650 metros, será cubierto el 60% de su demanda, por lo contrario, para distancias mayores a los 650 será cubierto el 75%.

Para el cálculo del número de vehículos de acuerdo al tipo, se considera que los vehículos de 4 ruedas durante una hora pico realizan 3.5 viajes en promedio, durante la hora pico, este valor corresponde a que los taxistas realizan 6 viajes en promedio, mientras que los vehículos particulares efectúan un solo viaje, dando así 3.5 viajes para cualquier tipo de vehículos de 4 ruedas. Teniendo una tasa de ocupación promedio de 1.6 pasajeros transportados en un vehículo de este tipo; mientras que las motos de 1.2 pasajeros en promedio, el cual representa el parámetro O_k .

Tabla 5-2.

Matriz de distancias y de tiempos de San Cristóbal entre zonas

Fuente: Encuesta a hogares para determinar las necesidades de movilización de la población.

Elaboración: Propia

Distancias (km)	Destino					
Origen	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Z1	450	1,000	900	1,600	1,700	7,650
Z2	1,000	550	650	700	1,100	7,150
Z3	900	700	500	600	1,800	8,150
Z4	700	1,600	600	550	1,800	7,850
Z5	1,700	1,100	1,800	1,800	700	6,100
Z6	7,650	7,150	8,150	7,850	6,100	600

Tiempo(min)	Destino					
Origen	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Z1	1.00	4.00	3.00	4.50	2.50	10.00
Z2	2.00	1.00	1.00	3.00	1.50	8.00
Z3	3.00	2.00	2.00	2.00	2.50	10.00
Z4	3.00	4.50	2.00	1.50	4.00	12.00
Z5	2.50	1.50	2.50	4.00	0.60	7.00
Z6	10.00	8.00	10.00	12.00	7.00	2.00

En la Tabla 5-2, Tabla 5-3 y Tabla 5-4 se pueden observar las estimaciones de distancias y tiempos de viaje entre los centroides de las zonas consideradas. Los centroides son los centros geográficos de una región específica, y constituyen un punto representativo de cada

zona. Los puntos geográficos que representan los centroides se consideraron, en el presente estudio, para la medición de las distancias y tiempos de viaje en vehículos motorizados entre zonas.

Tabla 5-3.

Matriz de distancias y de tiempos de Santa Cruz entre zonas

Fuente: Encuesta a hogares para determinar las necesidades de movilización de la población.

Elaboración: Propia

Distancias (km)	Destino									
Origen	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10
Z1	400	500	600	1,400	800	1,000	1,500	18,58	7,800	42,160
Z2	500	300	750	1,300	450	850	1,300	18,48	7,700	42,060
Z3	600	750	450	800	900	750	1,200	17,98	7,200	41,560
Z4	1,400	1,300	900	400	950	500	850	17,19	6,410	40,770
Z5	800	450	900	950	300	400	900	18,08	7,300	41,660
Z6	1,000	850	1,000	500	400	250	500	17,73	6,950	41,310
Z7	1500	1,300	1,200	850	900	500	350	18,08	7,300	41,660
Z8	18,58	18,4	17,98	17,19	18,08	17,73	18,08	500	11,000	24,000
Z9	7,800	7,70	7,200	6,410	7,300	6,950	7,300	11,00	400	35,00
Z10	42,16	42,06	41,56	40,77	41,66	41,3	41,6	24,0	35,00	100

Tiempo(min)	Destino vehículo									
Origen	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10
Z1	1.00	2.00	2.00	3.00	3.00	4.00	5.00	19.00	8.00	43.00
Z2	2.00	0.82	2.00	4.00	2.00	3.00	4.00	19.00	8.00	43.00
Z3	2.00	2.00	1.00	2.00	3.00	3.00	4.00	18.00	8.00	42.00
Z4	3.00	4.00	2.00	1.00	3.00	2.00	2.00	18.00	7.00	41.00
Z5	3.00	2.00	3.00	3.00	1.00	0.82	2.00	19.00	8.00	42.00
Z6	4.00	3.00	3.00	2.00	0.82	0.38	0.77	18.00	7.00	42.00
Z7	5.00	4.00	4.00	2.00	2.00	0.77	1.00	19.00	8.00	42.00
Z8	19.00	19.00	18.00	18.00	19.00	18.00	19.00	1.00	11.00	24.00
Z9	8.00	8.00	8.00	7.00	8.00	7.00	8.00	11.00	1.00	35.00
Z10	43.00	43.00	42.00	41.00	42.00	42.00	42.00	24.00	35.00	1.00

Tabla 5-4.

Matriz de distancias y de tiempos de Isabela entre zonas

Fuente: Encuesta a hogares para determinar las necesidades de movilización de la población.

Elaboración: Propia

Distancias (m)	Destino				
Origen	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
Z1	950	1,800	2,100	20,000	22,000
Z2	1,800	500	650	21,800	23,800
Z3	2,100	650	650	22,100	24,100
Z4	20,000	21,800	22,100	450	7,800
Z5	22,000	23,800	24,100	7,800	1,000

Tiempo(min)	Destino				
Origen	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
Z1	1.00	3.00	4.00	20.00	22.00
Z2	3.00	1.00	2.00	23.00	25.00
Z3	4.00	2.00	0.88	25.00	30.00
Z4	20.00	23.00	25.00	0.78	12.00
Z5	22.00	25.00	30.00	10.00	100.00

Las corridas del modelo de optimización con restricciones duras determinan que los vehículos requeridos para el año 2012 respecto al número de vehículos registrados por el Consejo de Gobierno, son los detallados a continuación.

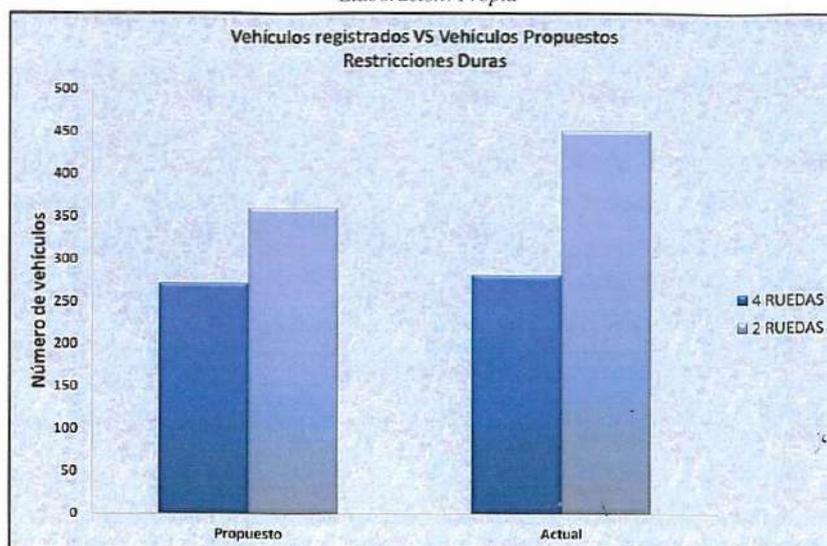
6.3. EJECUCION DEL MODELO BAJO RESTRICCIONES DURAS

Las corridas del modelo de optimización con restricciones duras determinan que los vehículos requeridos para el año 2012 respecto al número de vehículos registrados por el Consejo de Gobierno, son los detallados en la Tabla 5-5.

Tabla 5-5.
Vehículos propuestos con restricciones duras vs. Vehículos registrados
Elaboración: Propia

San Cristóbal	Propuesto	Actual	Diferencia	% Actual	% Propuesto	%
NÚMERO TOTAL DE VEHÍCULOS 4 RUEDAS	272	281	-9	38.4%	43.0%	-3.2%
NÚMERO TOTAL DE VEHÍCULOS 2 RUEDAS	360	451	-91	61.6%	57.0%	-20.2%
NÚMERO TOTAL DE VEHÍCULOS	632	732	-100	100.0%	100.0%	-13.7%
Santa Cruz	Propuesto	Actual	Diferencia	% Actual	% Propuesto	%
NÚMERO TOTAL DE VEHÍCULOS 4 RUEDAS	504	483	21	43.4%	44.7%	4.3%
NÚMERO TOTAL DE VEHÍCULOS 2 RUEDAS	624	630	-6	56.6%	55.3%	-1.0%
NÚMERO TOTAL DE VEHÍCULOS	1128	1113	15	100.0%	100.0%	1.3%
Isabela	Propuesto	Actual	Diferencia	% Actual	% Propuesto	%
NÚMERO TOTAL DE VEHÍCULOS 4 RUEDAS	72	99	-27	54.4%	59.5%	-27.3%
NÚMERO TOTAL DE VEHÍCULOS 2 RUEDAS	49	83	-34	45.6%	40.5%	-41.0%
NÚMERO TOTAL DE VEHÍCULOS	121	182	-61	100.0%	100.0%	-33.5%

Figura 5-1.
Vehículos registrados vs Vehículos Propuestos
Elaboración: Propia



En las siguientes tablas y gráficos se observan los resultados de las corridas del

modelo de optimización para los escenarios considerados.

Tabla 5-6.
Predicción del número de vehículos motorizados de acuerdo a su tipo.
San Cristóbal, restricciones duras, 5% anual de disminución del consumo de combustible
Elaboración: Propia

Año	2 Ruedas Propuesto	4 Ruedas Propuesto	TOTAL Propuesto	Nivel de Servicio
2012	360	272	632	93.95%
2013	381	282	663	93.80%
2014	399	287	686	93.92%
2015	403	290	693	93.91%
2016	405	292	697	93.82%

FIGURA 5-2.
Predicción del número de vehículos - Hasta el 2016 – San Cristóbal
Elaboración: Propia

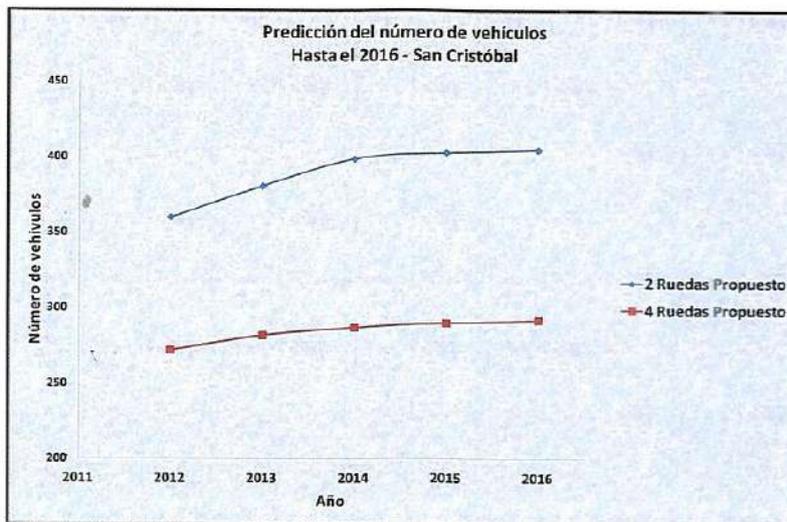


TABLA 5-7.
Predicción del número de vehículos motorizados de acuerdo a su tipo. Santa Cruz, restricciones duras,
5% anual de disminución del consumo de combustible.
Elaboración: Propia

Año	2 Ruedas Propuesto	4 Ruedas Propuesto	TOTAL Propuesto	Nivel de Servicio
2012	624	504	1128	97.48%
2013	658	524	1182	97.30%
2014	671	529	1200	97.20%
2015	679	533	1212	97.35%
2016	683	535	1218	97.16%

FIGURA 5-3.
Predicción del número de vehículos -Restricciones Duras - Hasta el 2016 – Santa Cruz
Elaboración: Propia

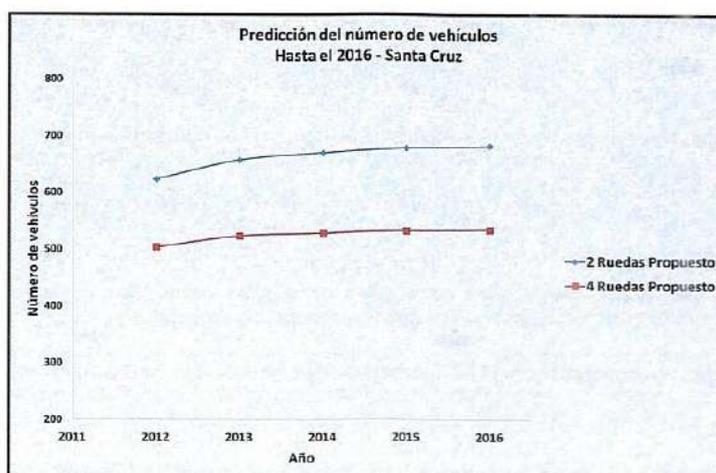


TABLA 5-8.

Predicción del número de vehículos motorizados de acuerdo a su tipo. Isabela, Restricciones duras. 5% anual de disminución del consumo de combustible. Elaboración: Propia

Año	2 Ruedas Propuesto	4 Ruedas Propuesto	TOTAL Propuesto	Nivel de Servicio
2012	49	72	121	99.13%
2013	52	75	127	97.94%
2014	52	76	128	97.34%
2015	53	76	129	97.09%
2016	55	76	131	95.94%

Figura 5-4.

Predicción del número de vehículos Restricciones Duras- Hasta el 2016 – Isabela Elaboración: Propia

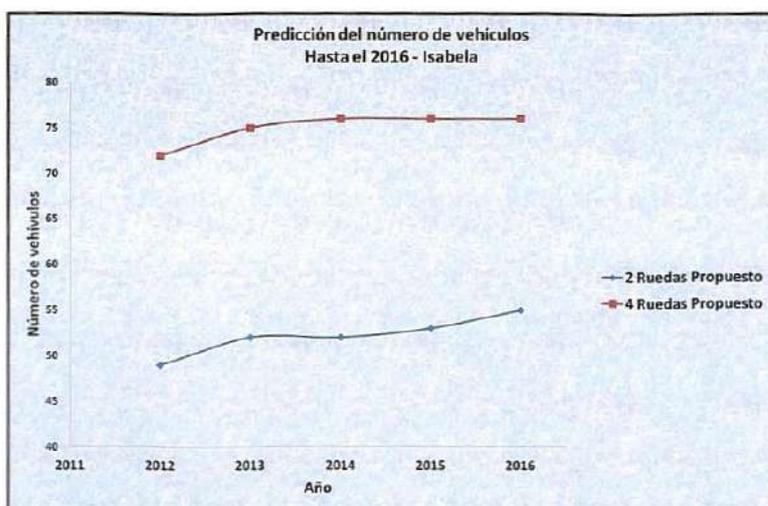


Tabla 5-9.

Predicción del número de vehículos motorizados de acuerdo a su tipo. GALÁPAGOS, Restricciones duras. 5% anual de disminución del consumo de combustible. Elaboración: Propia

Año	2 Ruedas Propuesto	4 Ruedas Propuesto	TOTAL Propuesto
2012	1,033	848	1,881
2013	1,091	881	1,972
2014	1,122	892	2,014
2015	1,135	899	2,034
2016	1,143	903	2,046

FIGURA 5-5.
Predicción del número de vehículos

Restricciones Duras - Hasta el 2016 – Galápagos Elaboración: Propia

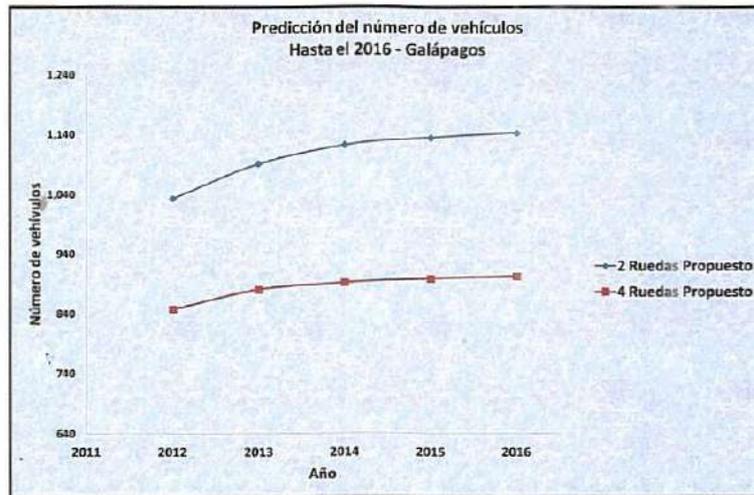


TABLA 5-10.

Predicción del número de vehículos motorizados de acuerdo a su tipo. San Cristóbal,

Restricciones duras. 5% anual de disminución del consumo de combustible para los próximos 20 años. Elaboración: Propia

Año	2 Ruedas Propuesto	4 Ruedas Propuesto	TOTAL Propuesto	Nivel de Servicio
2012	360	272	632	93.95%
2016	405	292	697	93.82%
2021	405	292	697	91.13%
2026	405	292	697	87.67%
2031	405	292	697	81.76%

TABLA 5-11.

Predicción del número de vehículos motorizados de acuerdo a su tipo.

Santa Cruz, restricciones duras. 5% anual de disminución del consumo de combustible para los próximos 20 años. Elaboración: Propia

Año	2 Ruedas Propuesto	4 Ruedas Propuesto	TOTAL Propuesto	Nivel de Servicio
2012	624	504	1128	97.48%
2016	658	524	1182	97.30%
2021	658	524	1182	92.78%
2026	658	524	1182	85.48%
2031	658	524	1182	79.93%

TABLA 5-12.

Predicción del número de vehículos motorizados de acuerdo a su tipo. Isabela,

Restricciones duras. 5% anual de disminución del consumo de combustible para los próximos 20 años. Elaboración: Propia

Año	2 Ruedas Propuesto	4 Ruedas Propuesto	TOTAL Propuesto	Nivel de Servicio
2012	49	72	121	99.13%
2016	55	76	131	95.94%
2021	55	76	131	89.19%
2026	55	76	131	83.10%
2031	55	76	131	77.65%

6.4. RESTRICCIONES SUAVES

Desde otro punto de vista, la imposición de la nueva restricción al consumo de combustible puede resultar muy limitante del parque automotor, la alternativa es considerar a esta restricción como “suave”, es decir, tratar de respetarla en lo posible, pero permitir violar de manera “tenue” sus límites con tal de mejorar el valor objetivo, es decir el nivel de servicio. De esta manera el número de vehículos óptimo que conformarían el parque automotor sería un poco mayor.

Para el cálculo del total de vehículos con restricciones suaves (Restricciones de emisiones de contaminación y consumo de combustible) fue utilizado como penalización la siguiente función para cada cantón:

$$\text{penalización} = 0.01 (e^{\text{Deviation}/100} - 1)$$

Con restricciones suaves, en las emisiones de vehículos y en el consumo de combustible, los resultados son los siguientes:

TABLA 5-13.
Predicción del número de vehículos motorizados de acuerdo a su tipo. San Cristóbal, Restricciones suaves, 5% anual de disminución del consumo de combustible. Elaboración: Propia

Año	2 Ruedas Propuesto	4 Ruedas Propuesto	TOTAL Propuesto	Nivel de Servicio
2012	360	272	632	93.95%
2016	405	292	697	93.82%
2021	544	293	837	93.98%
2026	571	310	881	93.67%
2031	612	331	943	93.16%

FIGURA 5-6.
Predicción del número de vehículos
Restricciones Duras - Hasta el 2031 – San Cristóbal Elaboración: Propia

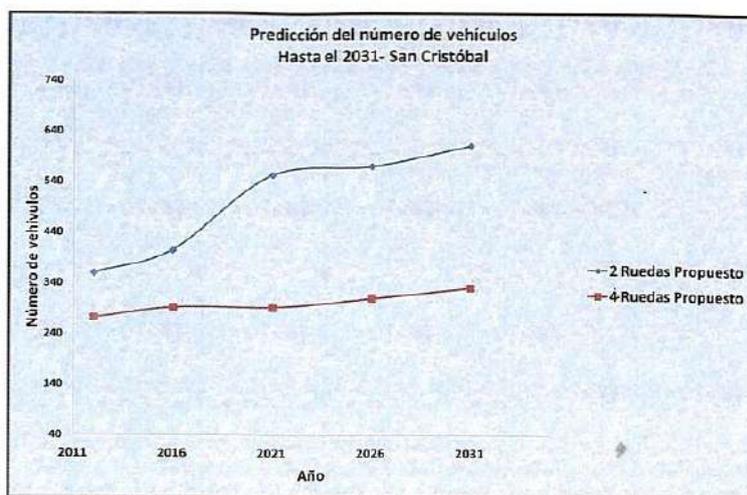


Tabla 5-14.
Predicción del número de vehículos motorizados de acuerdo a su tipo. Santa Cruz, restricciones suaves, 5% anual de disminución del consumo de combustible. Elaboración: Propia

Año	2 Ruedas Propuesto	4 Ruedas Propuesto	TOTAL Propuesto	Nivel de Servicio
2012	624	504	1128	97.48%
2016	658	524	1182	97.30%
2021	825	550	1375	95.13%
2026	866	579	1445	93.95%
2031	891	594	1485	91.25%

Figura 5-7.
Predicción del número de vehículos
Restricciones Duras - Hasta el 2016 - Santa Cruz Elaboración: Propia

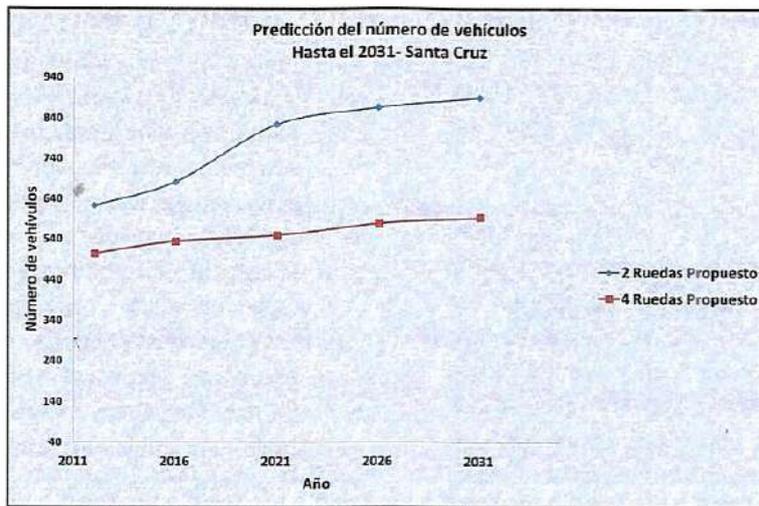
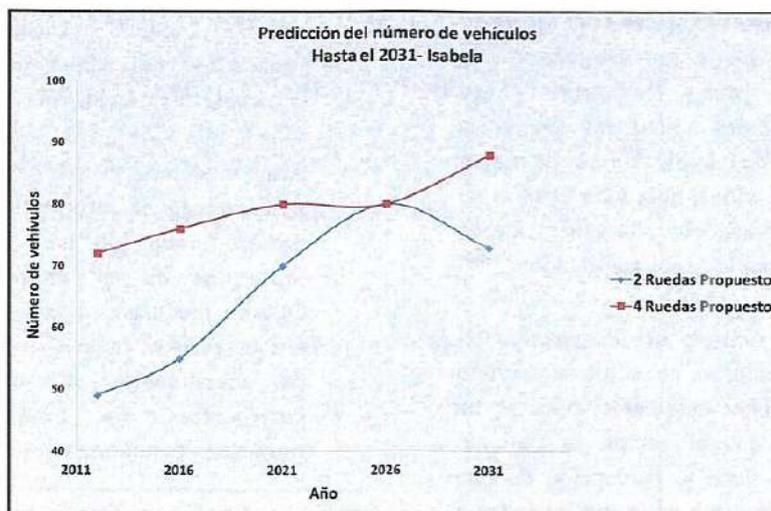


Tabla 5-15.
Predicción del número de vehículos motorizados de acuerdo a su tipo. Isabela,
Restricciones suaves, 5% anual de disminución del consumo de combustible

Año	2 Ruedas Propuesto	4 Ruedas Propuesto	TOTAL Propuesto	Nivel de Servicio
2012	49	72	121	99.13%
2016	55	76	131	95.94%
2021	70	80	150	96.04%
2026	80	80	160	92.43%
2031	73	88	161	91.05%

Elaboración: Propia

Figura 5-8.
Predicción del número de vehículos
Restricciones Duras - Hasta el 2031 - Isabela Elaboración: Propia



7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este capítulo presenta las conclusiones y recomendaciones más relevantes del estudio, a la vez que se proponen algunas estrategias dirigidas a mejorar el funcionamiento del sistema de transporte en general.

- En Galápagos ha habido un gran crecimiento del parque automotor a partir de 1998, con tasas de crecimiento del parque automotor que han elevado la tasa de motorización de Puerto Ayora y Puerto Baquerizo Moreno a los niveles de las ciudades del Ecuador continental, pero en general con menores distancias a recorrer. En todo este período la tasa de crecimiento del parque automotor, con un promedio de 8% anual, ha sido históricamente superior a la tasa en que se incrementa la población de Galápagos, que es del 3.09% según el censo de población y vivienda del 2010. Pero cuando hay una tendencia de motorización es muy difícil ésta se revierta, o al menos resulta bastante complicado disminuir el parque automotor en valores absolutos, sin embargo si se puede impedir que el parque automotor siga creciendo, pues el marco legal establecido en el *Reglamento especial de control de ingreso de vehículos motorizados y maquinaria a la provincia de Galápagos* está adecuado para restringir la introducción de nuevos vehículos a los niveles que sean adecuados para satisfacer las necesidades de movilización de la población, pero evitando una hipermotorización. Esto favorecería la calidad ambiental de los sectores de mayor densidad poblacional al reducir el nivel de emisiones atmosféricas y la generación de ruido por la acción de los automotores.
- El sector más sensible a la disminución del parque automotor es el sector de servicio de transporte por camioneta, pues se ha observado que este sector es bastante organizado y tiene la percepción de que estudios de este tipo están encaminadas a perjudicarlos a ellos.
- El sector más propenso a la disminución del parque vehicular es el sector institucional. Es más fácil desarrollar estrategias a mediano y largo plazo para limitar y aún disminuir el número de vehículos que están siendo usados en este sector. Del inventario del parque automotor efectuado se puede observar que el porcentaje de vehículos institucionales respecto al parque automotor total de Galápagos es demasiado alto, más específicamente, la proporción de vehículos institucionales, en relación con el total del parque automotor, es del 12.48 % en Galápagos, frente a una tasa de 1.56%¹ de vehículos institucionales en el Ecuador continental.
- Bajo las corridas del modelo de optimización, el número óptimo de vehículos livianos de 4 ruedas está subestimado o sobreestimado en un rango del -6% al 6% respecto a la situación actual, esto quiere decir que en ciertos casos hay un margen para el crecimiento de este tipo de vehículos y en otros hay un exceso de este tipo de vehículos. En cambio el número de vehículos motorizados de dos ruedas está sobrestimado, es decir en todas las islas existen más motocicletas que las que deberían existir para satisfacer las necesidades de movilización de la población según el modelo de optimización. Esto quiere decir que en la situación actual prácticamente se ha llegado a la cota máxima de vehículos que deberían existir en las islas.
- Estos modelos son más precisos mientras se alimentan de información actualizada, debido a que son muy sensibles a la estimación de las matrices Origen – Destino, efectuadas a través de la encuesta a hogares. Así, junto al modelo de factor de crecimiento utilizado para las proyecciones, sus resultados resultan razonables para horizontes de planeación a

¹ Según los registros de vehículos matriculados de la Comisión de Transito del Ecuador correspondientes a vehículos municipales y del estado

corto plazo, en el cual no se esperan grandes cambios, ya sean estos socioeconómicos, políticos, de uso de suelo, tiempos, población, etc.

RECOMENDACIONES

- Todo modelo matemático, requiere de información actualizada al menos con 3 a 5 años de diferencia, de acuerdo con las recomendaciones que se encuentran en la literatura que involucra modelos de demanda (referenciar el libro Modelos de transporte, Juan de Dios Ortúzar), por lo cual se recomienda que se realice un plan de mantenimiento de los modelos, y actualizarlos con la elaboración de nuevas encuestas para desarrollar nuevas matrices origen - destino, actualizando los datos en el programa optimizador que se ha desarrollado.
- Potenciación de los desplazamientos peatonales, ciclistas y en transportes colectivos, a través de la adecuación de Ciclovías, ensanchamiento de veredas, siembra de árboles que aporten con sombra, etc. Las bicicletas, a diferencia de las motos, no generan gases de combustión, son silenciosas, económicas, fáciles de usar y beneficiosas para la salud, la economía y la mejora de la calidad ambiental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y ELECTRÓNICAS

- [1]. Urtúzar, J. Modelos de Demanda de Transporte. México D.F. : Alfaomega, 2000.
- [2]. Sustainable tourism or sustainable mobility? The Norwegian case. Høyer. 2, 2000, Journal of Sustainable Tourism, Vol. 8, págs. 147 - 159.
- [3]. Global environmental consequences of tourism. Gössling, S. 2002, Vol. 12, págs. 283 - 302.
- [4]. Transport and climate change: a review. Chapman, L. 2007, Journal of Transport Geography, Vol. 15, págs. 354 - 367.
- [5]. Key factors for successful leisure and tourism public transport provision. Gronau, W., Kagermeier, A. 2007, Journal of Transport Geography, Vol. 15, págs. 127 - 135.
- [6]. Mundial, Banco. International tourism, number of arrivals. [En línea] [Citado el: 15 de 11 de 2012.] <http://data.worldbank.org/indicador/ST.INT.ARVL>.
- [7]. Toll, I. Modelización de la Contaminación Atmosférica Fotoquímica en el área de Barcelona. s.l.: Universidad Politécnica de Cataluña, 1999.
- [8]. Consultores, A&V. Plan de Movilidad Sustentable Bimodal de Galápagos. Consejo de Gobierno. Puerto Baquerizo Moreno : s.n., 2011.
- [9]. Sandoya, F. Matemáticas Actuariales y Operaciones de Seguros. Segunda. Guayaquil : ESPOL, 2007.
- [10]. Eggleston, H., Gorissen, N., Jourmard, R. Rijkeboer, R., Samaras, Z., Zierock, K. Methodology and Emission Factors. v.1 Group CORINAIR. Luxemburgo : s.n., 1989.
- [11]. Villa, A. El crecimiento del parque automotor en Galápagos. Puerto Ayora, Galápagos, Ecuador : Informe Galápagos 2006-2007, 2007.
- [12]. LAN. [En línea] [Citado el: 11 de diciembre de 2012.] www.lan.com.
- [13]. [En línea] [Citado el: 11 de diciembre de 2012.] www.tame.com.ec.
- [14]. [En línea] [Citado el: 11 de diciembre de 2012.] Aerogal.com.ec.
- [15]. [En línea] [Citado el: 11 de diciembre de 2012.] www.emetebe.com.ec.
- [16]. [En línea] [Citado el: 11 de diciembre de 2012.] www.saereo.com.
- [17]. Motocicleta i contaminació. 49, Barcelona : Barcino solucions, 2009, Mobilitat sostenible i segura, págs. 24-26.
- [18]. Cléder E., Grenier, C. Los taxis de Santa Cruz: una loca movilidad. Informe galápagos 2009-2010. Puerto Ayora : s.n., 2010, págs. 29 - 39.