

**JUEGOS DE ESTRATEGIA MIXTA: UNA APROXIMACION DESDE LA DINÁMICA DE  
SISTEMAS Y LA TEORIA ACUMULATIVA DE PROSPECTOS**

**DIANA ARIBEL GUZMÁN GRANOBLES  
CRISTHIAN CAMILO GÓMEZ MAYOR**

**UNIVERSIDAD ICESI  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
CALI  
2016**

**JUEGOS DE ESTRATEGIA MIXTA: UNA APROXIMACION DESDE LA DINÁMICA DE  
SISTEMAS Y LA TEORÍA ACUMULATIVA DE PROSPECTOS**

**DIANA ARIBEL GUZMÁN GRANOBLES  
CRISTHIAN CAMILO GÓMEZ MAYOR**

**Proyecto de Grado para optar por  
el título de Ingeniero Industrial**

**Director proyecto  
FERNANDO ANTONIO ARENAS GUERRERO  
Candidato a Doctor en Dirección de Empresas**

**UNIVERSIDAD ICESI  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
CALI**

<b>Contenido</b>	<b>pág.</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>8</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO I. Definición del Problema</b> .....	<b>10</b>
1.1 Contexto del Problema.....	10
1.2 Análisis y Justificación.....	11
1.3 Formulación del Problema .....	11
<b>CAPITULO II. Objetivos</b> .....	<b>12</b>
2.1 Objetivo General.....	12
2.2 Objetivo del Proyecto .....	12
2.3 Objetivos Específicos .....	12
2.4 Entregables.....	12
<b>CAPÍTULO III. Marco de Referencia</b> .....	<b>13</b>
3.1 Antecedentes o Estudios Previos.....	13
3.2 Marco Teórico.....	15
3.2.1 Dinámica de Sistemas.....	15
3.2.2 Teoría acumulativa de prospectos.....	16
3.2.3 Teoría de juegos.....	17
3.3 Aporte Intelectual .....	18

<b>CAPÍTULO IV. Metodología.....</b>	<b>19</b>
4.1 Modelamiento cualitativo de variables clave en un diagrama causal.....	19
4.2 Adaptación del modelo de simulación de Kim & Kim (1997) a Vensim PLE..	19
4.3 Aplicación de Teoría de Prospectos para explicar la percepción de probabilidades de los agentes.....	20
4.4 Redacción del artículo académico para presentar al Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas .....	20
<b>CAPITULO V. DESARROLLO DE OBJETIVOS .....</b>	<b>21</b>
5.1 Elaborar un modelo cualitativo de la relación entre variables clave por medio de un diagrama causal para el modelo presente en el artículo de los autores Kim & Kim, (1997).....	21
5.2 Adaptar el modelo de simulación descrito por Kim & Kim, (1997) a un modelo de simulación en Vensim PLE.....	23
5.3 Aplicar teoría evolutiva de prospectos para explicar la percepción de probabilidades de los agentes.....	27
5.3.1 Teoría de acumulativa de prospectos: .....	27
5.3.2 Función TREND:.....	28
5.3.3 Regla de decisión:.....	30
5.4 Redactar un artículo académico:.....	31
<b>CAPITULO VI. RESULTADOS.....</b>	<b>32</b>
6.1 Teoría de acumulativa de prospectos: .....	32
6.2 Función TREND: .....	33
6.3 Regla de Decisión: “Comportamiento de Conductores y Policías en eventos de pérdidas” .....	34
<b>CAPITULO VII. CONCLUSIONES .....</b>	<b>39</b>
<b>CAPITULO VIII. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>40</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>41</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>43</b>

## Lista de Figuras

Figura 1. Causa – Efecto. Arenas (2004). Pág. 6.....	15
Figura 2. Diagrama Causal de las variables clave del modelo. Fuente: Autores.....	22
Figura 3. Modelo de simulación adaptado en Vensim PLE. Fuente: Adaptado por los Autores de Kim & Kim (1997) .....	24
Figura 4. Grafica de comportamiento de probabilidades de agentes en Stella. Fuente: Kim & Kim, (1997) .....	26
Figura 5. Grafica de comportamiento de probabilidades de agentes en Vensim PLE Fuente: Adaptación de los autores del modelo de Kim & Kim, (1997).....	26
Figura 6. Variables de Teoría de Prospectos para probabilidad P. Fuente: Adaptada de Gonzalez & Sawicka (2003).....	28
Figura 7. Función TREND. Fuente: Adaptada de Sterman (2000).....	29
Figura 8. Regla de Decisión. Fuente: Autores. ....	30
Figura 9. Probabilidad de patrullar vs probabilidad percibida de patrullar con Teoría de Prospectos. Fuente: Autores.....	32
Figura 10. Probabilidad de infringir vs probabilidad percibida de infringir con Teoría de Prospectos. Fuente: Autores.....	33
Figura 11. Tendencia Percibida por los policías del comportamiento de los Conductores (TEND). Fuente: Autores.....	34
Figura 12. Probabilidad de patrullar vs probabilidad percibida de patrullar con Teoría de Prospectos, Función TREND y Regla de Decisión. Fuente: Autores.....	35
Figura 13. Probabilidad de infringir vs probabilidad percibida de infringir con Teoría de Prospectos, Función TREND y Regla de Decisión. Fuente: Autores.....	36
Figura 14. Comportamiento en eventos de pérdidas de conductores. Fuente: Autores. ....	37
Figura 15. Comportamiento típico observado en ambientes de riesgo. Fuente: González & Sawicka (2003, Pág. 2).....	38

**Lista de Tablas**

Tabla 1. Ecuaciones de teoría de prospectos. Fuente: González & Sawicka (2003). .... 27

Tabla 2. Valores de constantes. Fuentes: González & Sawicka (2003) y Prelec (2000).  
..... 28

**Lista de Anexos**

Anexo 1. Artículo.....43

## RESUMEN

En el presente documento se evidenció una oportunidad para aplicar teorías conductuales de toma de decisiones, como la teoría acumulativa de prospectos, que complementan la teoría evolutiva de juegos. El documento muestra un modelo de simulación de dinámica de sistemas para un juego de estrategia de mixta, en el cual el comportamiento de los conductores ha sido redefinido desde la teoría acumulativa de prospectos. Se identificaron las variables clave del modelo de simulación base que explican el comportamiento entre policías y conductores, relacionándolas a través de un diagrama causal. Posteriormente, se adaptó dicho modelo a un software llamado Vensim PLE y se aplicó teoría evolutiva de prospectos para explicar la percepción de probabilidades de uso de las estrategias de cada uno de los agentes. Se concluye que bajo situaciones de eventos de riesgo, como un evento de multa, el conductor disminuye la probabilidad de infringir la norma, sin embargo, con el tiempo se va volviendo progresivamente más laxo y al relajarse, vuelve a arriesgarse, hasta que ocurre nuevamente un evento. En el largo plazo, los policías logran percibir de forma casi exacta el comportamiento del conductor, lo cual logra que en el modelo, las medidas restrictivas tomadas, puedan llegar a ser bastante efectivas. Mientras que la percepción de probabilidad de patrullar percibida por los conductores, generalmente es subestimada por los mismos, lo cual genera que estos se encuentren muy confiados en el momento de un evento de control de los organismos de control policíacos.

**Palabras claves:** Dinámica de sistemas, Teoría evolutiva de juegos, Teoría de prospectos, políticas de control.

## INTRODUCCIÓN

Constantemente las personas se ven involucradas en procesos de toma de decisiones y retroalimentación. En la toma de decisiones los individuos se enfrentan con la necesidad de escoger entre varias alternativas, con información limitada y en ambientes de mucha incertidumbre. En los procesos de retroalimentación, en cambio, las personas toman decisiones con base en los movimientos de sus semejantes y estímulos del ambiente que lo hagan modificar su elección.

La dinámica de sistemas está enfocada en el modelamiento y simulación de estos procesos mencionados. Además en este campo de estudio, también se encuentra la teoría de juegos que está más relacionada con los procesos de retroalimentación, ya que se enfoca en el estudio del comportamiento de los individuos en situaciones de juego donde las decisiones tomadas cambian en respuesta a las acciones de otros jugadores.

El propósito de este proyecto de grado es aplicar teoría acumulativa de prospectos a un modelo de dinámica de sistemas planteado en el artículo: "A system dynamics model for a mixed-strategy game between police and driver" por Dong-Hwan Kim y Doa Hoon Kim. Con dicho aporte al modelo se busca comprender el comportamiento entre los conductores y el organismo de tránsito encargado de formular políticas o sanciones, desde la perspectiva de la teoría evolutiva de juegos, la teoría acumulativa de prospectos y la dinámica de sistemas.

En el futuro, este proyecto puede llegar a ser una herramienta útil para el organismo de tránsito de la ciudad dado que puede permitirle analizar el comportamiento entre estos agentes y, formular mejores políticas para disminuir la cantidad de accidentes y comportamientos inadecuados por parte de los conductores.

## **CAPÍTULO I. Definición del Problema**

El presente proyecto de investigación busca generar nuevas perspectivas en torno a la dinámica de la interacción entre policías y conductores, cuando se explica la percepción de probabilidades de uso de las estrategias de cada uno de los agentes, desde la teoría acumulativa de prospectos, en conjunto con la teoría evolutiva de juegos y la dinámica de sistemas.

### **1.1 Contexto del Problema**

De acuerdo con Tsebelis (1989), la política de incremento en las multas no es una herramienta viable para decrecer las tendientes violaciones a la ley de los conductores. Tsebelis afirma que las interacciones entre los policías y los conductores pueden ser mejor representadas como un juego de estrategia mixta, en el cual los jugadores escogen sus decisiones alternativas basados en una probabilidad, sin embargo, esa probabilidad de infringir la ley, no puede decrecer por el incremento de la multa, en palabras de éste autor: "(...) Modificar el tamaño de la multa no afecta la frecuencia de crimen cometido en equilibrio, sino que incrementa la frecuencia de aplicación de la ley (...)" (Tsebelis, 1989, p. 2.)

Por otra parte, Kim & Kim (1997), sostienen que toma mucho tiempo para que un equilibrio teórico de juegos de estrategia mixta aparezca, por lo cual, los jugadores no pueden o no deben depender del equilibrio para escoger sus decisiones. Más aún, su modelo de dinámica de sistemas para un juego de estrategia mixta muestra que un incremento en la multa puede inducir al conductor a obedecer la norma, contrario a una solución de teoría de juegos como la describe Tsebelis, pero consistente con el comportamiento de los conductores en el mundo real. (Kim & Kim, 1997, p. 1.)

Ahora bien, en el presente proyecto, se evidenció una oportunidad para aplicar otras teorías conductuales de toma de decisiones, como la teoría acumulativa de prospectos, que complementan la teoría evolutiva de juegos utilizada por los autores (Kim & Kim, 1997), lo cual permitió darle una nueva perspectiva al modelo y confirmar o refutar las afirmaciones que hacen los autores mencionados.

## **1.2 Análisis y Justificación**

Teorías conductuales como la teoría de juegos y la teoría de prospectos plantean que si bien, parte de nuestro comportamiento es racional, no lo es la mayor parte del tiempo; por el contrario, en la mayoría de las ocasiones éste es irracional y se basa en probabilidades subjetivas del mismo agente que toma la decisión.

Al aportar teoría evolutiva de prospectos al modelo, se vislumbró la percepción de probabilidad que tiene cada uno de los agentes en la toma de decisiones y su impacto en el comportamiento de los mismos. Lo dicho con anterioridad, podría explicar, la relación entre el aumento de una política sancionatoria planteada por los organismos de control de tránsito y la efectividad de las mismas, dado que si realmente éstos cambios en las políticas no afectan las probabilidades que rigen el comportamiento de los conductores, su efectividad va a ser muy pobre.

Por ésta razón, surge la necesidad de plantear nuevas perspectivas que hagan un mejor acercamiento a la problemática y que permitan formular políticas más acertadas que permitan mejorar el comportamiento de los conductores y su respuesta ante las políticas impuestas.

### **¿Qué herramientas pueden ser utilizadas para el análisis del problema?**

La principal herramienta a usar para desarrollar este proyecto de investigación es el modelamiento desde la dinámica de sistemas por medio de Vensim PLE y su posterior simulación.

## **1.3 Formulación del Problema**

¿Cuál es la dinámica de la interacción entre agentes de tránsito y conductores cuando se explica la percepción de probabilidades de uso de las estrategias de los agentes desde la teoría de prospectos?

## **CAPITULO II. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Contribuir al mejoramiento en el análisis, diseño y aplicación de políticas orientadas hacia la disminución del incumplimiento de la normatividad de tránsito.

### **2.2 Objetivo del Proyecto**

Elaborar un modelo de simulación de un juego de estrategia mixta entre agentes de tránsito y conductores que explique la percepción de probabilidad de decisiones de los agentes desde la teoría de prospectos.

### **2.3 Objetivos Específicos**

- Elaborar un modelo cualitativo de la relación entre variables clave, por medio de un diagrama causal, para el modelo de simulación presente en el artículo de los autores Kim & Kim, (1997)
- Adaptar el modelo de simulación descrito por Kim & Kim, (1997) a un modelo de simulación en Vensim PLE.
- Aplicar teoría de prospectos para explicar la percepción de probabilidades de los agentes.
- Redactar un artículo académico para presentar al Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas.

### **2.4 Entregables**

- Modelo cualitativo de la relación entre variables clave por medio de diagramas causales elaborado.
- Modelo de simulación por Vensim PLE adaptado.
- Teoría de prospectos para explicar la percepción de probabilidades de los agentes aplicada.
- Artículo académico para presentar al Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas redactado

## CAPÍTULO III. Marco de Referencia

### 3.1 Antecedentes o Estudios Previos

Mientras que algunos autores se han limitado al estudio de modelos de dinámica de sistemas o de teoría evolutiva de juegos por separado, el presente proyecto de investigación está planteado desde una visión conjunta de ambos conceptos. Dentro de los estudios realizados donde se integran ambos conceptos se tiene, de acuerdo con Kim & Kim (1997), que la dinámica de sistemas y la teoría evolutiva de juegos puede ser aplicada en conjunto en un juego de estrategia mixta entre agentes de tránsito y conductores, dado que el concepto de estrategia de equilibrio puede ser usado para analizar las consecuencias dinámicas de las diferentes opciones de políticas sancionatorias aplicadas. En éste artículo, se aplica la teoría propuesta por Tsebelis (1989), quien plantea que el incremento de las sanciones no es una herramienta viable para decrecer la tendencia a la violación de las normas de tránsito de los conductores. Lo anterior ocurre porque las interacciones entre agentes de tránsito y conductores puede ser mejor representada por un juego de estrategia mixta en el cual los jugadores o agentes que intervienen escogen sus acciones basados en una probabilidad, la cual no es afectada por el incremento de la sanción. Los resultados que los autores exponen muestran que toma mucho tiempo para que el equilibrio predicho por la teoría aparezca en la realidad, por lo cual, las acciones de los jugadores no pueden y no deben depender del equilibrio para tomar sus decisiones; además, muestran que el incremento de una sanción, en contraposición a la solución de la teoría de juegos, puede inducir, de manera consistente con el comportamiento del mundo real, al acatamiento de la norma. Los autores concluyen que la escasa capacidad descriptiva del modelo basado en teoría de juegos, proviene de la falta de análisis del comportamiento dinámico y transitorio de las decisiones.

De forma similar, Tian, Y., Govindan, K., & Zhu, Q. (2014), plantean un modelo de dinámica de sistemas basado en la teoría evolutiva de juegos para guiar las políticas de subsidio que promueven las cadenas de suministro “verdes” (*green supply chain*). En este artículo, las relaciones entre los interesados como el gobierno, las empresas y los consumidores, son analizadas a través de la teoría evolutiva de juegos. Finalmente, el proceso de difusión de la cadena de suministro sostenible es simulado por medio de un modelo basado en un caso de estudio de la industria de manufactura automotriz China. Los resultados muestran que los subsidios para las industrias son más efectivos que los subsidios a los consumidores para promover la difusión de la cadena de abastecimiento sostenible, y que la conciencia ambiental, en términos de un

incremento de clientes con preferencias sostenibles o por productos ecológicos, es otro factor clave influyente, porque tendrá efectos promocionales sobre la difusión de las cadenas de suministro sostenible.

Nunes, Godoy & Gini (2014) modelan la interacción entre dos agentes, agentes de tránsito y conductores, por medio de un juego de estrategias mixtas. Para expresar las pérdidas y ganancias entre los dos agentes, el juego de suma cero es adecuado. Además, la probabilidad de que los agentes tomen alguna de las alternativas lo convierte en un problema de tipo estocástico. Este modelo les permitió a los autores elaborar algoritmos dinámicos EWA (Experiences-Weighted Attraction) para que cada uno de los agentes pudiera evaluar la probabilidad tanto de ser atrapado en el caso de los conductores, como de atrapar en el caso de los agentes de tránsito. Específicamente desarrollaron algoritmos para determinar la ubicación de los agentes de tránsito y llegaron a la conclusión de que al utilizar el algoritmo, aumentan las probabilidades de atrapar a un conductor que sobrepasa el límite de velocidad, respecto a la ubicación de agentes de manera aleatoria. Un punto fuerte del artículo es la validación del modelo con información sintética e información real que da como resultado que el comportamiento de los dos agentes tiende a llegar a un equilibrio cuando siguen el algoritmo EWA. Esto indica que si ambos adoptan ciertas estrategias y cada uno conoce las estrategias de su “oponente”, la dinámica de sus interacciones los conduce a un equilibrio en el cual ambos agentes obtienen “ganancias”.

Wang, Cai & Zeng (2011) estudian, por medio de un modelo de dinámica de sistemas, la estrategia mixta entre el gobierno, encargado de administrar la contaminación en el medio ambiente, y las empresas que generan esta contaminación por medio de sus procesos productivos. Los autores analizan el modelo dinámico cuando la penalización que impone el gobierno es estática y dinámica. Los resultados obtenidos muestran que utilizando una penalización estática no se llega a un equilibrio entre el gobierno y las empresas (probabilidad de elección 50%). Cuando se utiliza una penalización dinámica el modelo dinámico converge al equilibrio de Nash descrito por los autores. El comportamiento de las empresas con una penalización dinámica, permite reducir notablemente la contaminación ambiental.

Por último, González & Sawicka (2003), desarrollaron un modelo de dinámica de sistemas que simula el comportamiento y las decisiones del ser humano a través de la teoría de prospectos acumulativa, la cual es una teoría que describe la toma de decisiones bajo condiciones de riesgo (Kahneman & Tversky, 1979), aplicándola específicamente para los sistemas de seguridad en las tecnologías de la información (TI). El modelo desarrollado simula las decisiones de un ser humano el cual tiene que

ingresar información a una base de datos y tiene que decidir la frecuencia con la cual hace “backup” de los datos. Si realiza “backup” con mucha frecuencia, la actividad toma más tiempo debido a la espera generada por la copia de seguridad. Por otro lado, si la frecuencia con la que hace “backup” es muy baja, existe una probabilidad más alta de que ocurra un evento de pérdida de datos y se tenga que ingresar nuevamente toda la información a la base de datos.

## 3.2 Marco Teórico

### 3.2.1 Dinámica de Sistemas

La dinámica de sistemas ha sido definida por Sterman (2000) como: *“Una perspectiva y un conjunto de herramientas conceptuales, que nos permiten entender la estructura y la dinámica de sistemas complejos”*, de lo cual se infiere que es un método que permite modelar y simular comportamientos de sistemas complejos donde interactúan elementos como el tiempo (representado en demoras), acciones (representado en decisiones), flujos de información y retroalimentaciones del sistema representado.

De acuerdo con Arenas (2004), la dinámica de sistemas ha sido ampliamente utilizada para representar relaciones de tipo causa-efecto entre diferentes variables, como se puede observar en la Figura 1. A gran escala, se puede



Figura 1. Causa - Efecto. Arenas (2004).  
Pág. 6.

crear un conjunto de relaciones de dependencia del tipo causa-efecto entre muchas variables y generar lo que se conoce como diagramas causales, que no son más que una forma más compleja de la figura presentada inicialmente, pero que representan de forma cualitativa el sistema estudiado. Estos diagramas causales sirven de base para la elaboración de los modelos de simulación, los cuales harán uso de distintos tipos variables y funciones para generar estados o interpretaciones cuantitativas del sistema.

#### 3.2.1.1 Variables de nivel y flujo

En la aplicación de la dinámica de sistemas existen las variables de nivel y flujo. Las variables de nivel son aquellas en las cuales se acumulan los valores, en otras palabras, funcionan como “tanque”. Las variables de nivel caracterizan el estado del sistema y por tanto son muy utilizadas como indicadores de resultados que sirven de soporte en la toma de decisiones. Las variables de flujo son aquellas que constituyen las entradas y salidas de las variables de nivel, son variables que se expresan en

unidades por unidad de tiempo. La dinámica de sistemas también hace uso de variables auxiliares que explican el comportamiento de las variables de flujo. Estas variables contienen funciones de las variables de nivel, de constantes o de variables exógenas (Arenas, 2004).

### **3.2.1.2 Retroalimentación negativa y positiva**

Los bucles de retroalimentación negativa son llamados también bucles reguladores o compensadores. Se tiene una retroalimentación ya que la información “circula” por el sistema, pasa por una serie de variables y vuelve al punto de inicio y esta retroalimentación es negativa debido a la relación inversa entre las variables (o debido a un número impar de estas relaciones inversas). Por otro lado, los bucles de retroalimentación positiva son conocidos como bucles reforzadores. Su retroalimentación es positiva debido a que aceleran el crecimiento o el declive de alguna variable (Aracil & Gordillo, 2005).

### **3.2.2 Teoría acumulativa de prospectos**

Según Kahneman & Tversky (1979), la teoría de prospectos es un modelo descriptivo para la toma de decisiones bajo condiciones de riesgo. Teoría de prospectos distingue dos fases en el proceso de selección: una primera fase de *framing* y una segunda fase de evaluación. En la fase de *framing* los resultados se expresan en términos de ganancias y pérdidas desde un punto de referencia. En la fase de evaluación, los prospectos son evaluados por medio de una función de valor y una función de ponderación y se selecciona el prospecto de más alto valor. La función de valor utilizada en la teoría de prospectos es la siguiente:

$$v(x) = \begin{cases} x^\alpha, & x \geq 0 \\ -\lambda(-x)^\beta, & x < 0 \end{cases}$$

$x$  denota las ganancias o las pérdidas;  $x > 0$  representa las ganancias y  $x < 0$  representa las pérdidas.  $\alpha$  y  $\beta$  parámetros relacionados con las ganancias y las pérdidas respectivamente,  $0 \leq \alpha, \beta \leq 1$ .  $\lambda$  es parámetro de la aversión al riesgo, que representa una característica más pronunciada para las pérdidas que para las ganancias. La inclusión de esta teoría al modelo de dinámica de sistemas permite que la simulación de las decisiones entre los agentes de tránsito y los conductores tenga en cuenta más características del proceso de toma de decisiones. Adicional a la ecuación de Kahneman & Tversky (1979), se tiene otra ecuación proporcionada por Prelec (1998) la cual no hace la diferenciación entre pérdidas y ganancias sino que incluye estos dos posibles resultados en la siguiente ecuación:

$$\omega(p) = e^{(-(-\ln(p))^\eta)} \quad (\text{Prelec, 1998})$$

Donde  $\omega$  es la probabilidad percibida (la probabilidad que observa o percibe un agente decisor sobre algún evento) de  $p$  y  $\eta$  representa el parámetro de percepción de probabilidad.

### **3.2.3 Teoría de juegos**

Según Maschler (2013) “Teoría de juegos es el nombre que se le da a la metodología en la que se utilizan herramientas matemáticas para modelar y analizar situaciones de toma de decisiones interactiva (...) en estas situaciones interactúan varios tomadores de decisiones con diferentes objetivos”. Según esta definición, si solo hay un tomador de decisión se trata de un problema de análisis de decisiones en el cual las personas cuentan con herramientas para facilitar ese proceso. En algunos casos las situaciones de juego o competencia son difíciles de procesar, comprender y la teoría de juegos pretende ayudarnos con esta tarea.

#### ***3.2.3.1 Equilibrio de Nash***

Según Monsalve (2003, pág. 140): “un equilibrio de Nash de un juego es un acuerdo que ninguna de las partes puede romper a discreción sin perder. Es decir, si alguien quiere romper el pacto y lo hace unilateralmente, se arriesga a ganar por debajo de lo que hubiese ganado dentro del pacto. Sin embargo, como queda claro en el juego del dilema del prisionero, esto puede no ser lo mejor socialmente para los jugadores”. Esta definición escrita por Nash en su tesis doctoral, se resume en que este equilibrio es un punto en el cual ninguno de los jugadores tiene incentivos para cambiar de estrategia porque en ese punto es donde se tienen las mayores utilidades, tanto utilidad propia como utilidad conjunta.

En cuanto al dilema del prisionero, este es un modelo de conflictos que es estudiado por la teoría evolutiva de juegos. Son estudiados los estímulos que tienen dos presos para delatar al otro con las autoridades y así, acceder a algunos beneficios de reducción de pena, teniendo siempre en cuenta la decisión que podría tomar el otro preso.

#### ***3.2.3.2 Estrategias puras***

Según Maschler, Solan, & Zamir (2013): “Es un concepto por el cual se puede analizar un juego entre dos o más jugadores y en los cuales se presentan estrategias

dominantes, es decir, hay seguridad de que un jugador va a adoptar cierta estrategia dependiendo de las utilidades y de la elección del oponente.”

### ***3.2.3.3 Estrategias mixtas***

Por último, el concepto de estrategia mixta que está conectado con la teoría evolutiva de juegos de manera que los agentes (jugadores) que están en el juego asigna probabilidades de las estrategias puras. Como cada agente tiene sus alternativas o elecciones, y los juegos son entre 2 o más agentes, la estrategia mixta viene siendo una distribución de probabilidad de cada alternativa posible (Maschler, Solan, & Zamir, 2013).

## **3.3 Aporte Intelectual**

El presente proyecto de investigación aporta nuevos elementos conceptuales, al evidenciar una oportunidad para aplicar teorías conductuales de toma de decisiones, como la teoría acumulativa de prospectos, que complementa la teoría evolutiva de juegos.

Se busca generar nuevas perspectivas en torno a la dinámica de la interacción entre policías y conductores, cuando se explica la percepción de probabilidades de uso de las estrategias de cada uno de los agentes, desde la teoría acumulativa de prospectos, en conjunto con la teoría evolutiva de juegos y la dinámica de sistemas.

En el futuro, este proyecto puede llegar a ser una herramienta útil para el organismo de tránsito de la ciudad dado que puede permitirle analizar el comportamiento entre estos agentes y, formular mejores políticas para disminuir la cantidad de accidentes y comportamientos inadecuados por parte de los conductores.

## **CAPÍTULO IV. Metodología**

### **4.1 Modelamiento cualitativo de variables clave en un diagrama causal**

Para la elaboración del diagrama causal de dinámica de sistemas que explicara el comportamiento de conductores y policías, se identificaron y definieron las variables claves que intervenían en tal comportamiento. Dado que ya existía un modelo que antecede al presente proyecto (Kim & Kim, 1997), éste modelo proporcionó las variables clave que explican la dinámica del comportamiento entre conductores y agentes de tránsito.

Estas variables definidas son de tipo endógeno, es decir, que se han definido al interior del modelo para la construcción del mismo y no de tipo exógeno. Lo anterior, permite que el modelo toma sus propias decisiones, de acuerdo a unos parámetros y reglas establecidas.

Cabe resaltar, que un modelo es una representación formal de un sistema, es decir, es una representación simbólica de la realidad estudiada. El modelo cualitativo del sistema que forma la interacción entre agentes de tránsito y conductores, fue representado a través de un diagrama causal. Este diagrama busca representar las relaciones e interconexiones existentes entre las variables claves del modelo. El diagrama causal definido, explica la dinámica de fondo presente en el modelo de los autores (Kim & Kim, 1997).

### **4.2 Adaptación del modelo de simulación de Kim & Kim (1997) a Vensim PLE**

Cabe mencionar, que el modelo de los autores (Kim & Kim, 1997) se encontraba modelado en un programa llamado STELLA, por lo cual, al reconstruirlo y adaptarlo al programa Vensim PLE con los datos proporcionados en el mencionado artículo, se tuvo que encontrar equivalencias entre ciertas funciones de ambos programas que no eran evidentemente claras, como funciones *As Graph* y tablas de equivalencias de probabilidades, dada una utilidad esperada.

### **4.3 Aplicación de Teoría de Prospectos para explicar la percepción de probabilidades de los agentes**

Es claro que el comportamiento de un agente decisor puede ser explicado desde teorías conductuales como la teoría evolutiva de juegos y la teoría acumulativa de prospectos plantean algo diferente y es que si bien, parte de nuestro comportamiento es racional, no lo es la mayor parte del tiempo; por el contrario, en la mayoría de las ocasiones éste es irracional y se basa en probabilidades subjetivas del mismo agente que toma la decisión.

La teoría acumulativa de prospectos es un modelo descriptivo para la toma de decisiones bajo condiciones de riesgo, con lo cual, dicho aporte al modelo original, busca comprender la percepción de probabilidad que tiene cada uno de los agentes en la toma de decisiones, desde ésta perspectiva y no sólo desde las estrategias mixtas.

### **4.4 Redacción del artículo académico para presentar al Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas**

Finalmente, una vez se hubo analizado los resultados y formulado conclusiones y recomendaciones, se procedió a elaborar un artículo académico que será presentado al Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas, donde mostrará el aporte de los nuevos elementos conceptuales, desde la relación entre la dinámica de sistemas, la teoría de prospectos y la teoría evolutiva de juegos que posee el presente proyecto de grado.

## CAPITULO V. DESARROLLO DE OBJETIVOS

### 5.1 Elaborar un modelo cualitativo de la relación entre variables clave por medio de un diagrama causal para el modelo presente en el artículo de los autores Kim & Kim, (1997)

Las variables utilizadas en el modelo de Vensim PLE fueron elegidas con base en el modelo de dinámica de sistemas presentado por Kim & Kim (1997). Las variables son de tipo endógenas porque las formulas y ecuaciones están incluidas dentro de la estructura del modelo y existen algunas constantes que corresponden a:

- **Número de agentes de tránsito patrullando:** Cantidad de agentes de tránsito que están patrullando en un momento determinado.
- **Probabilidad de patrullar:** Posibilidad al azar existente de que un agente de tránsito pueda patrullar en un momento determinado.
- **Utilidad esperada de infringir la norma:** Es la suma de las utilidades de un conductor que va a infringir la norma, asociadas a los distintos resultados posibles, ponderadas por sus probabilidades de ocurrencia,
- **Número de conductores que infringen la norma:** Cantidad de conductores que están infringiendo la norma de tránsito en un momento determinado.
- **Probabilidad de infringir la norma:** Posibilidad al azar existente de que un conductor pueda infringir la norma en un momento determinado.
- **Utilidad esperada de patrullar:** Es la suma de las utilidades de un agente que va a patrullar, asociadas a los distintos resultados posibles, ponderadas por sus probabilidades de ocurrencia.

Las variables mencionadas, se relacionan en el diagrama causal mostrado en la Figura 2.

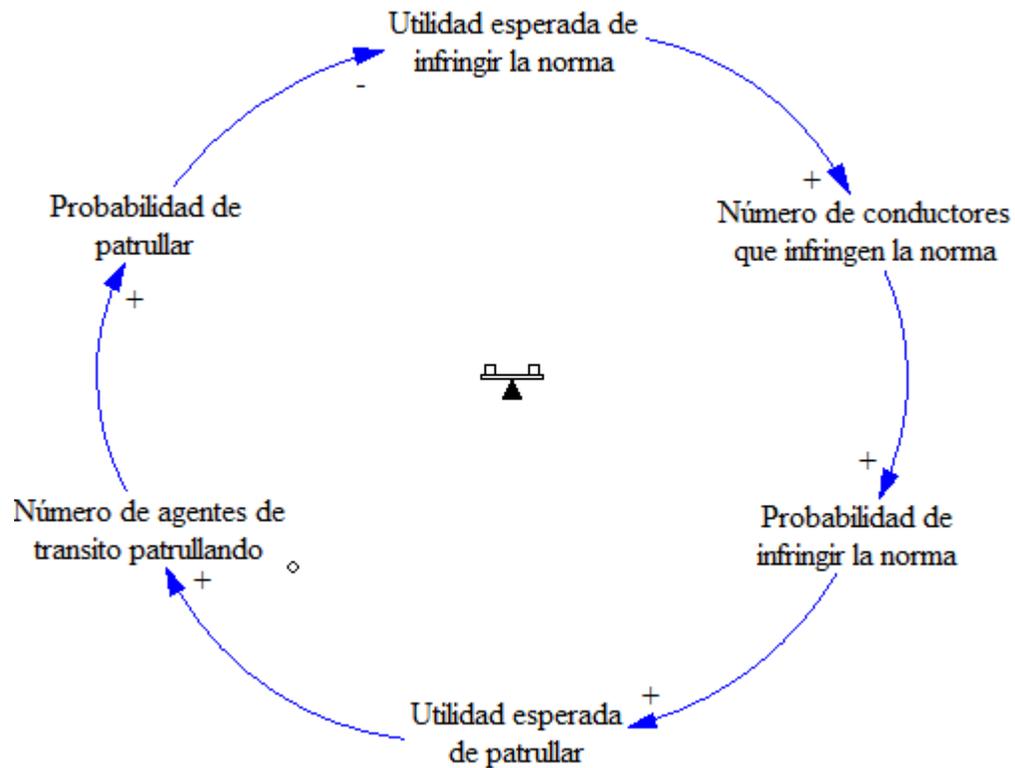


Figura 2. Diagrama Causal de las variables clave del modelo. Fuente: Los Autores.

La relación entre cada variable, va acompañada de la polaridad existente entre ellas. Esta polaridad ha sido definida como positiva (+) cuando la relación es proporcional, es decir, que si una aumenta, la otra también ha de hacerlo; o negativa (-) cuando la relación es inversa, es decir, que si una aumenta, la otra ha de disminuir. Lo anterior, ocasiona que el cambio de una variable impacte las variables consecuentes y por ende todo el sistema que ha de ser estudiado, de ahí la importancia de una buena representación.

Para el modelo en cuestión, se podría contar una historia, de acuerdo con la polaridad de cada variable, de la siguiente manera: Dado un número determinado de conductores que infringen la norma, si estos aumentan, la probabilidad de infringir la norma aumenta a su vez, lo cual provoca que la utilidad esperada de patrullar incremente y que en consecuencia, el número de policías patrullando también incremente. Si aumentan el número de policías patrullando, la probabilidad de patrullar también aumenta, lo cual causa que la utilidad esperada de infringir la norma de los conductores disminuya; si la utilidad esperada de infringir la norma disminuye, el número de conductores que infringen la norma disminuirá a su vez,

volviendo al punto de inicio de la historia, pero con una polaridad diferente, lo cual indica que el diagrama causal es del tipo compensador.

## **5.2 Adaptar el modelo de simulación descrito por Kim & Kim, (1997) a un modelo de simulación en Vensim PLE**

Cabe resaltar, con respecto al modelo de los autores Kim & Kim, (1997), que éste se encuentra modelado en un programa llamado STELLA, por lo cual al tratar de adaptarlo en un programa como Vensim PLE, se debía encontrar equivalencias entre ciertas funciones de ambos programas que no eran evidentemente claras, a modo de ejemplo se podrían mencionar las tablas de relación entre las utilidades esperadas y la probabilidad correspondiente a cada una de ellas, la cual fue posible adaptar en Vensim PLE a través de 4 variables de tipo *lookup* (tabla de patrullar a oficina, tabla de oficina a patrullar, tabla de infringir a cumplir y tabla de cumplir a infringir) y su respectiva función *As Graph*. Las ecuaciones que definen las variables utilizadas para dicho modelo, se encuentran resumidas en los anexos del artículo de Kim & Kim, (1997).

Lo anterior, permitió entender el comportamiento no sólo de la dinámica del sistema, la cual fue abordada por el modelo causal elaborado, sino también, la relación matemática que explica dicho comportamiento. En la Figura 3., se puede observar el modelo de simulación reconstruido y adaptado en Vensim PLE con valores y gráficas, resultado de simulación de escenarios específicos planteados por los autores Kim & Kim (1997) en su artículo.

Del modelo de simulación adaptado en Vensim PLE es posible destacar que hay una diferencia evidente en el color de ciertas variables, donde se pueden observar unas en color rojo y otras en color negro, lo anterior se debe a que se quería hacer énfasis y diferenciar a simple vista las variables de las constantes, por lo cual, las primeras (variables) permanecieron en el color negro que Vensim PLE tiene por defecto, y las segundas (constantes) se cambiaron a un color rojo, para caracterizarlas como constantes, de modo que si se deseaban cambiar en alguna corrida, éste proceso pudiera hacerse con mucha más facilidad.

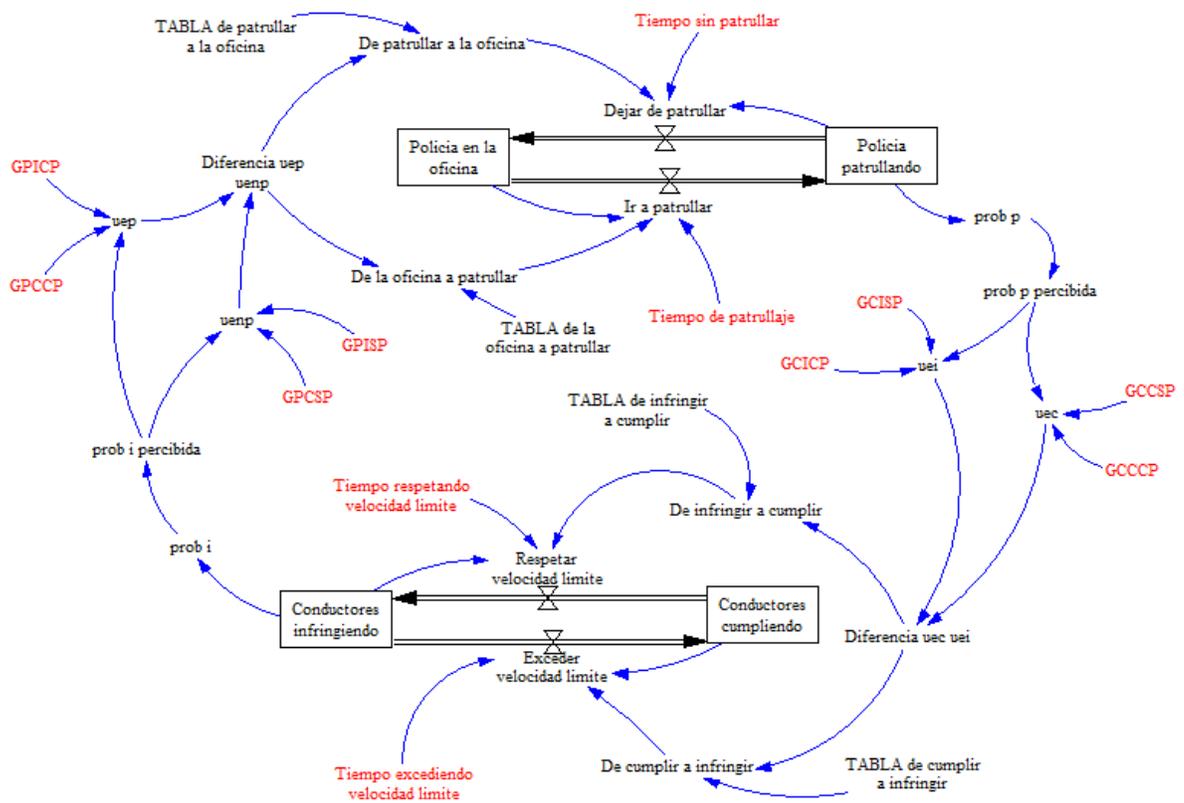


Figura 3. Modelo de simulación modelado en Vensim PLE. Fuente: Adaptado por los Autores de Kim & Kim (1997)

Ahora bien, dado que ya se han definido cada una de las variables y constantes presentes en el modelo de simulación adaptado en Vensim PLE en la **Tabla 2.**, se procederá entonces a explicar someramente el funcionamiento del modelo y la relación entre las variables y constantes, más no sus valores, dado que estos se explican a detalle en el artículo de los autores Kim & Kim, (1997).

Es posible observar que existen cuatro variables de nivel (aquellas llamadas “policías en la oficina” y “policías patrullando” en el caso de los policías y, “conductores cumpliendo” y “conductores infringiendo”, en el caso de los conductores), que se caracterizan por ser tanques de almacenamiento de las variables tipo flujo (aquellas llamadas “Ir a patrullar” y “Dejar de patrullar” en el caso de los policías y, “Exceder velocidad límite” y “Respetar velocidad límite”, en el caso de los conductores), que son aquellas que funcionan como tubería de transporte entre una variable de nivel y otra, haciendo que los flujos entre ambas se mantengan y sean dinámicos. Las variables de nivel llamadas “Policía en la oficina” y “Policía patrullando”, tienen por valor inicial 20 y 80 policías respectivamente, lo que suma un total de 100 policías en el sistema, de los cuales, determinado número puede estar patrullando o en la oficina en cada

instante de tiempo. Las variables de nivel de los policías, están en una relación 1:10 con los conductores, cuyas variables de nivel llamadas “Conductores infringiendo” y “Conductores cumpliendo” tienen valores iniciales de 500 conductores cada una, lo que hace un total de 1000 conductores en el sistema.

Las variables “uep” y “uenp” significan “utilidad esperada de patrullar” y “utilidad esperada por no patrullar” respectivamente y son las utilidades esperadas de patrullar o no patrullar de los policías, cuya ecuación se define como el producto de la probabilidad percibida de violar ( $prob\ v$  percibida) y la respectiva constante (GPCCP “ganancia del policía cuando el conductor cumple la norma con patrullaje” y GPICP “ganancia del policía cuando el conductor infringe la norma con patrullaje”). La diferencia entre “uep” y “uenp” (llamada “Diferencia uep uenp”) será la utilidad esperada que se buscará en las tablas “TABLA de patrullar a la oficina” y “TABLA de la oficina a patrullar”, lo cual, dará como resultado una probabilidad de patrullar o no, que multiplicado por el número de policías patrullando o en la oficina respectivamente, y dividido sobre el tiempo en la oficina o patrullando, determinará la cantidad de policías en cada variable tipo flujo de policías (“Ir a patrullar”, “Dejar de patrullar”). Finalmente, el número de policías que vayan a patrullar se divide sobre 100 en la variable “ $prob\ p$ ”, que es la probabilidad de salir a patrullar. Ésta misma dinámica explica la correspondiente sección en los conductores, con los valores respectivos de cada variable.

Finalmente, a fin de verificar si el modelo adaptado en Vensim PLE, era equivalente al modelo de los autores Kim & Kim, (1997) en STELLA, se contrastaron dos gráficas, la primera corresponde a la de los autores del artículo, mientras que la segunda, corresponde al modelo adaptado de los autores del presente proyecto de grado, de modo que sea posible verificar que la adaptación correspondiente del modelo es correcta, como se muestra a continuación:

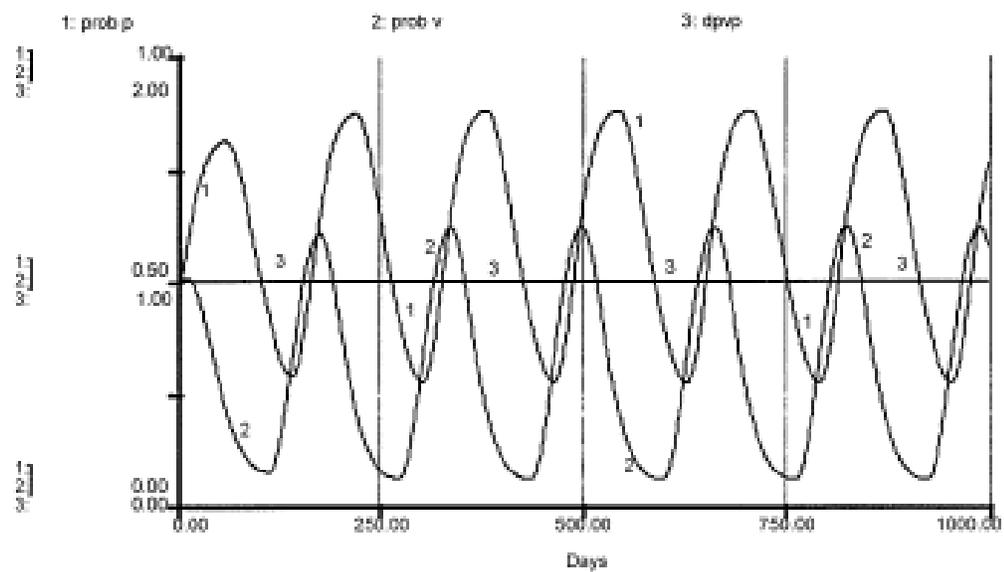


Figura 4. Grafica de comportamiento de probabilidades de agentes en Stella.  
Fuente: Kim & Kim, (1997)

### Probabilidad Patrullar Vs Probabilidad de Infringir Modelo Base

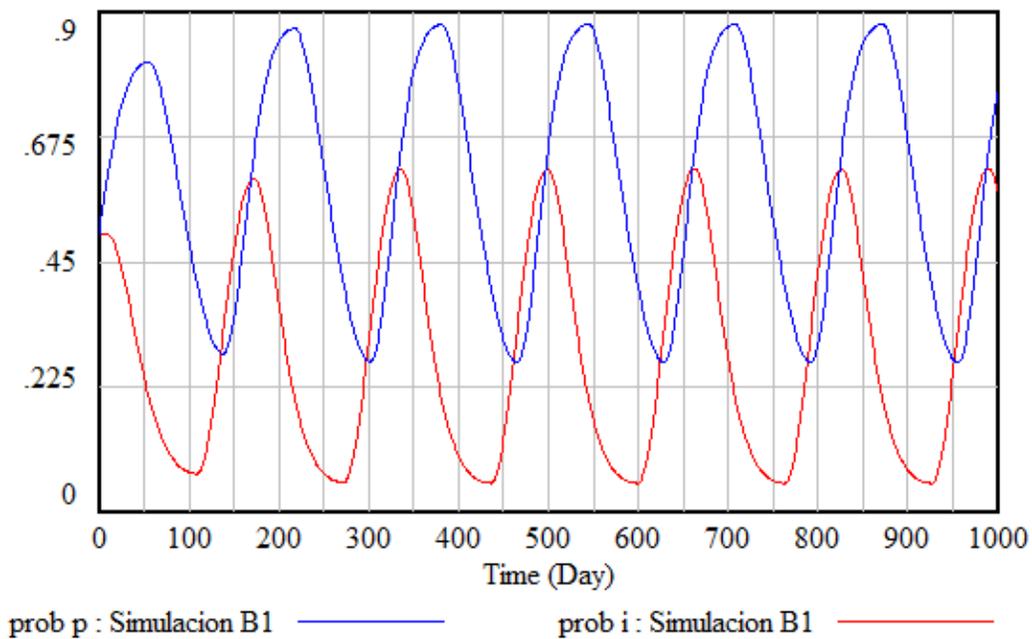


Figura 5. Grafica de comportamiento de probabilidades de agentes en Vensim PLE  
Fuente: Adaptación de los autores del modelo de Kim & Kim, (1997).

## 5.3 Aplicar teoría acumulativa de prospectos para explicar la percepción de probabilidades de los agentes

### 5.3.1 Teoría de acumulativa de prospectos

De acuerdo a la definición de teoría de prospectos que se utilizó como marco teórico, la inclusión de la teoría al modelo de simulación, viene dada por nuevas variables que contienen las ecuaciones que explican la toma de decisiones de los agentes en ambientes de riesgo.

En este modelo, el riesgo lo percibe el conductor cuando incumple las normas de tránsito al decidir si conduce a una velocidad superior a la permitida y el policía lo percibe cuando decide si no patrullar y dejar que los conductores incumplan la norma de tránsito. Por esta razón, se incluyeron una serie de variables adaptadas del modelo de González & Sawicka (2003), como se explica a continuación:

Primero, se incluyeron las variables que afectan la probabilidad de ser atrapado por un Policía. En la Figura 6., las 2 variables de mayor impacto son *Probabilidad percibida de prob p* y *Parámetro de Percepción de Probabilidad PPP prob p*. *Probabilidad percibida de prob p* contiene la ecuación que realiza el ajuste de probabilidad, es decir, la contiene la ecuación de teoría de prospectos según Prelec (1998). *Parámetro de Percepción de Probabilidad PPP prob p* contiene la ecuación para calcular el valor del parámetro. Este es dinámico y puede variar entre un rango determinado. Las variables como *PPP Max prob p* y *Tasa de ajuste PPP prob p* cuentan con las siguientes ecuaciones:

Variable	Ecuación o Regla de decisión	Fuente
<i>PPP Max prob p</i>	IF THEN ELSE((ABS(Dynamic PPP prob p) $\geq$ 0.5), 2, Initial PPP prob p )	González & Sawicka (2003)
<i>Tasas de ajuste PPP prob p</i>	(Max PPP prob p-Probability Perception Parameter PPP prob p)/PPP Adjustment Time prob p	González y Sawicka (2003)

Tabla 1. Ecuaciones de teoría de prospectos. Fuente: González & Sawicka (2003).

Las constantes *PPP Dinámico prob p*, *PPP Inicial prob p* y *Tiempo de ajuste PPP prob p* tienen los siguientes valores registrados por González & Sawicka(2003).

Constante	Valor	Fuente
<i>PPP Dinámico prob p</i>	0 o 1	González y Sawicka (2003)
<i>PPP Inicial prob p</i>	0.65	Prelec (2000)

<i>Tiempo de ajuste PPP prob p</i>	1000	González & Sawicka (2003)
------------------------------------	------	---------------------------

Tabla 2. Valores de constantes. Fuentes: González & Sawicka (2003) y Prelec (2000).

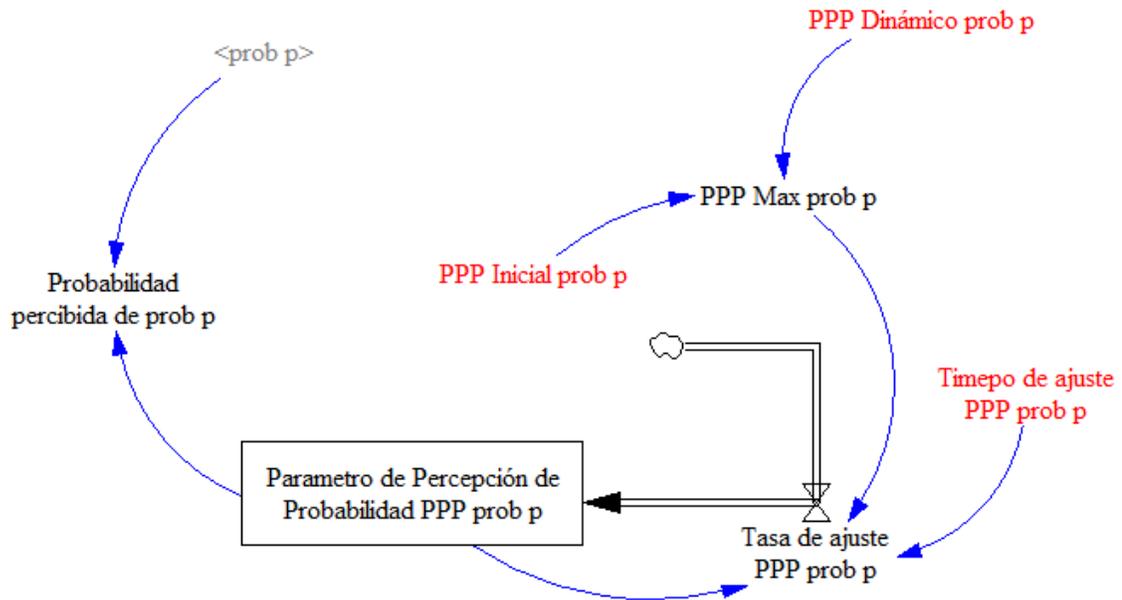


Figura 6. Variables de Teoría de Prospectos para probabilidad P. Fuente: Adaptada de Gonzalez & Sawicka (2003).

En el caso de la Figura 6., se trata de la parte del modelo que cambia la prob p de patrullar a una probabilidad percibida de prob p. Para la prob i (probabilidad de infringir), se desarrolló un modelo exactamente igual utilizando ese valor de entrada.

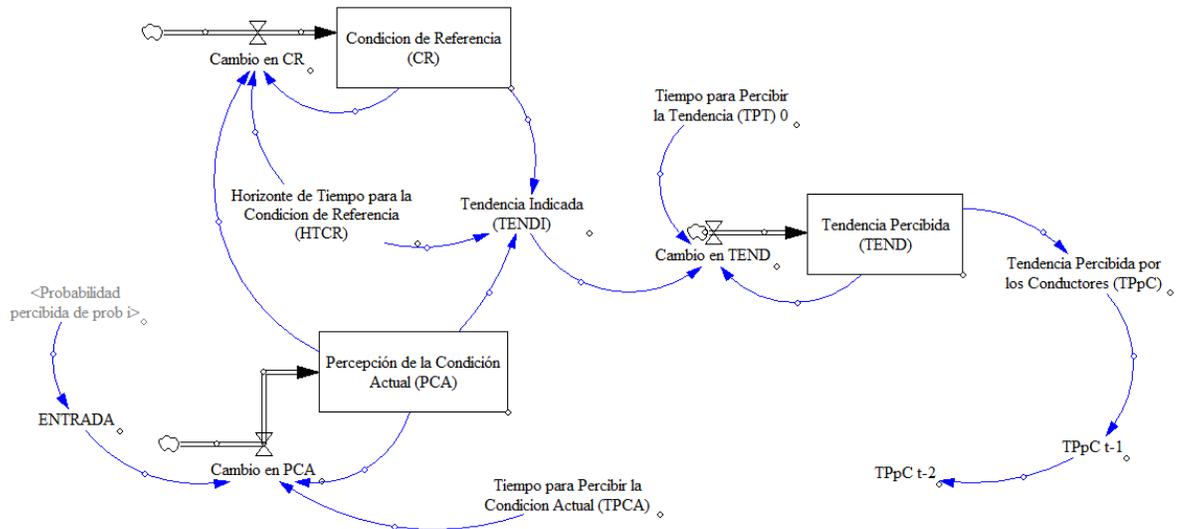
La ecuación de teoría de prospectos utilizada en la variable *Probabilidad percibida de prob p* para ajustar la *prob p* (Probabilidad de ser atrapado), tal como lo definen Kahneman & Tversky (1979), sin embargo, Prelec (1998) hizo una simplificación definiéndola de la siguiente manera:

$$\omega(p) = e^{(-(-\ln(prob\ p))Parametro\ percibida\ de\ prob\ p)}$$

Esta ecuación modifica la probabilidad real de ser atrapado y hace que se comporte como indican Kahneman & Tversky (1979). Cuando las probabilidades de ser atrapado es baja, el agente decisor sobrevalora esa probabilidad, pero cuando las probabilidades son más altas, el agente decisor tiende a subestimar la probabilidad real o el suceso real, que para el caso del conductor, es ser atrapado mientras incumple la normatividad.

### 5.3.2 Consideración de la tendencia

La adaptación de la teoría de prospectos al modelo de Kim & Kim (1997) con la inclusión de las variables del modelo de González & Sawicka, genera un comportamiento diferente en la percepción de probabilidades. Para hacer que los agentes decisores tuvieran un criterio de decisión más explícito, se incluyeron una serie de variables las cuales cumplen la función de detectar una tendencia en los datos. Cuando detecta que los datos están aumentando o disminuyendo progresivamente, la función TREND trata de mantener esta tendencia y tiene en consideración un tiempo en el cual se percibe la condición actual de los datos, un horizonte de tiempo para generar el valor resultante de la tendencia y por ultimo un tiempo para percibir dicha tendencia. La figura es función TREND en el modelo de simulación.



**Figura 7. Función TREND. Fuente: Adaptada de Sterman (2000).**

La función TREND (Figura 7.) se aplicó para la prob *i*, ya que los que detectan la probabilidad de infringir son los policías. Cuando existe una tendencia positiva en la dicha probabilidad, debería existir un aumento en los policías patrullando para de alguna manera contrarrestar la situación.

Se tiene entonces la entrada del valor de la prob *i* en un tiempo determinado. Este valor se le resta el valor inicial de PCA (0.5) y esta diferencia se divide entre el TPCA (4). El flujo *Cambio en PCA* ingresa nuevamente en la variable de nivel de PCA para alimentarla con un nuevo valor en cada corrida de la simulación. También se encuentra el flujo *Cambio en CR* al cual le llegan tres valores: PCA, HTCR y CR. En este flujo se calcula un nuevo valor con la diferencia entre el PCA y el valor inicial del CR (0.5) dividido entre el HTCR (4), el cual alimenta la variable de nivel CR. Con estos

primeros cálculos en las variables se determina si existe una tendencia positiva o negativa y ese valor es calculado en la variable *Tendencia Indicada*.

Por último se realiza el cálculo para determinar el valor de la tendencia percibida. Este valor es calculado en el flujo *Cambio en TEND* y es la diferencia entre la TENDI y el valor inicial de TEND (0) dividido entre el TPT (4) y ese es el valor final de tendencia que se observa en la probabilidad de infringir.

Las variables TPpC t-1 y TPpC t-2, guardan los valores de la TEND de la última y la penúltima simulación haciendo uso de la función DELAY FIXED de Vensim PLE. Para la TPpC t-1, DELAY FIXED (*Tendencia Percibida de los Conductores (TPC)*, 1, 0) y para TPpC t-2 es DELAY FIXED (*TPpC t-1*, 1, 0).

La función TREND permite que los policías puedan determinar en qué momento se debe aumentar la cantidad de unidades en patrullaje para disminuir la cantidad de conductores que sobrepasan el límite de velocidad, pero no aumenta dichas unidades. Para hacer esto, se agregó una regla de decisión que tiene en cuenta los valores de la función TREND.

### 5.3.3 Regla de decisión

La regla de decisión está incluida en el flujo *Aumento policías patrullando* que está conectado con la variable de nivel *Policía patrullando* como se puede observar en la Figura 8.

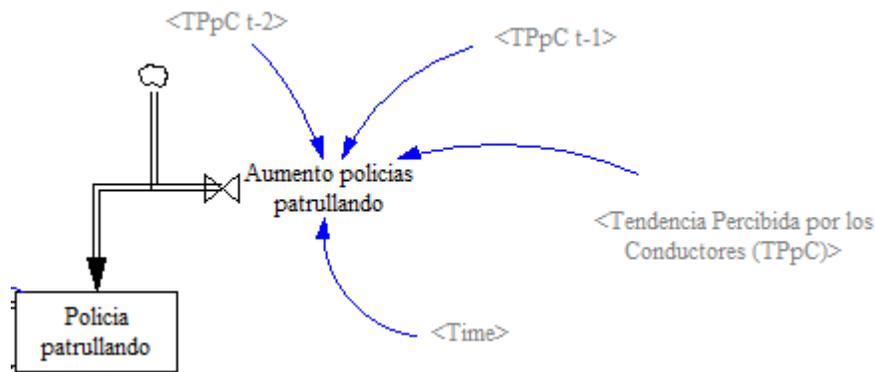


Figura 8. Regla de Decisión. Fuente: Los autores.

Aumento policías patrullando le ingresan 4 valores: Time, TPpC t-2, TPpC t-1 y la TPpC. Si la TPpC es  $>0$  (significa que la prob i va en aumento) y  $TPpC < TPpC t-1$  y  $TPpC t-1 < TPpC t-2$  (significa que el valor de la tendencia va en aumento) entonces se ingresan 50 policías a patrullaje por medio de la función PULSE de Vensim PLE para

aumentar la prob  $p$ , de lo contrario el valor es cero (no aumentan los policías en patrullaje). La variable Time, permite que la función PULSE ingrese los policías en el momento en que nota que la probabilidad de infringir está en aumento.

#### **5.4 Redactar un artículo académico**

Finalmente, cabe resaltar en éste punto, que una vez se desarrollaron los objetivos específicos, se analizaron los resultados y se formularon conclusiones y recomendaciones, se redactó el artículo que se encuentra en el Anexo 2., el cual será presentado al Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas, donde se pueda mostrar el aporte de los nuevos elementos conceptuales, desde la relación entre la dinámica de sistemas, la teoría de prospectos y la teoría evolutiva de juegos que posee el presente proyecto de grado.

## CAPITULO VI. RESULTADOS

### 6.1 Teoría de acumulativa de prospectos

Las ecuaciones de teoría evolutiva de prospectos de Kahneman & Tversky (1979), adaptada por Prelec (2000), introducidas en el modelo base, dieron como resultado, una leve suavización de la probabilidad real. Para el caso de los policías, su probabilidad de patrullar, es percibida por los conductores de una forma más suavizada, lo que quiere decir, que la probabilidad de patrullar percibida por los conductores de forma menos exacta, subestimándola con respecto a la probabilidad real, como se puede observar en la Figura 9.

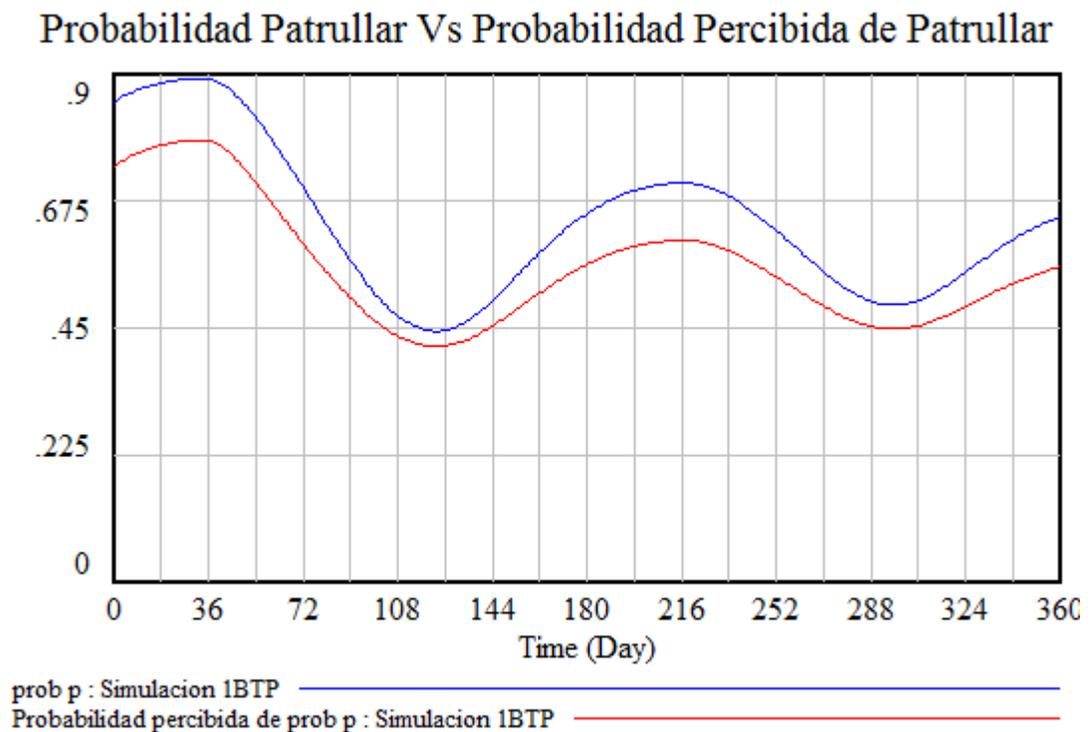


Figura 9. Probabilidad de patrullar vs probabilidad percibida de patrullar con Teoría de Prospectos.  
Fuente: Los autores.

Para el caso de los conductores, su probabilidad de infringir la ley, es percibida por los policías de una forma más suavizada. La probabilidad de infringir la ley percibida por los policías es sobre-estimada con respecto a la probabilidad real, al menos al principio, dado que luego de aproximadamente 162 días, estas se ajustan y son muy

parecidas, lo cual genera una buena percepción del comportamiento de los conductores en los policías, como se puede observar en la Figura 10.

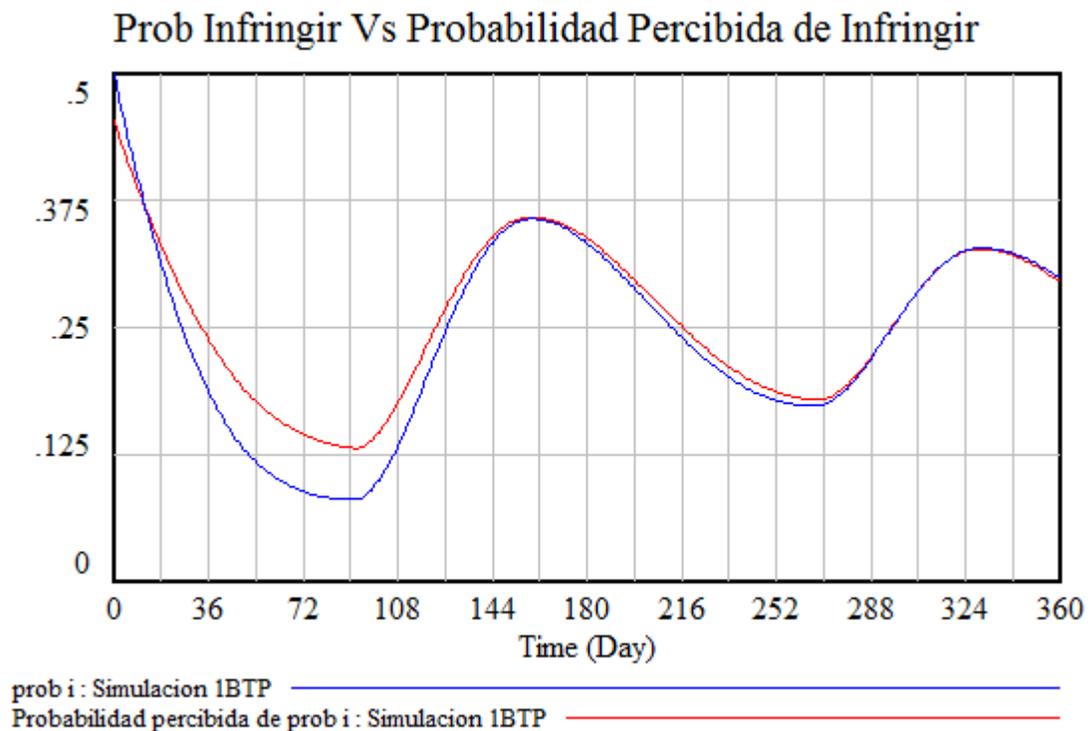


Figura 10. Probabilidad de infringir vs probabilidad percibida de infringir con Teoría de Prospectos.  
Fuente: Los autores.

## 6.2 Consideración de la tendencia

Con respecto a la función TREND de Sterman (2000), como se explicó con anterioridad, ésta sigue la tendencia percibida de las probabilidades, de forma que la Figura 11., muestra a los policías, cuál es la tendencia de comportamiento de los conductores, a partir de la probabilidad percibida de infringir de los mismos. En la gráfica, se observa cómo una disminución de la probabilidad percibida de infringir de los conductores, se torna en una tendencia negativa de la función TREND. De la misma manera, un aumento de la probabilidad percibida de infringir de los conductores, se torna en una tendencia positiva de la función. Estas tendencias, dan cuenta del patrón de comportamiento del conductor a lo largo del tiempo, lo cual puede ser utilizado para formular políticas, como el aumento del número de policías, que aumente la probabilidad de patrullar, que aumenta el riesgo de ser atrapado infringiendo la ley y condiciona el comportamiento riesgoso del conductor.

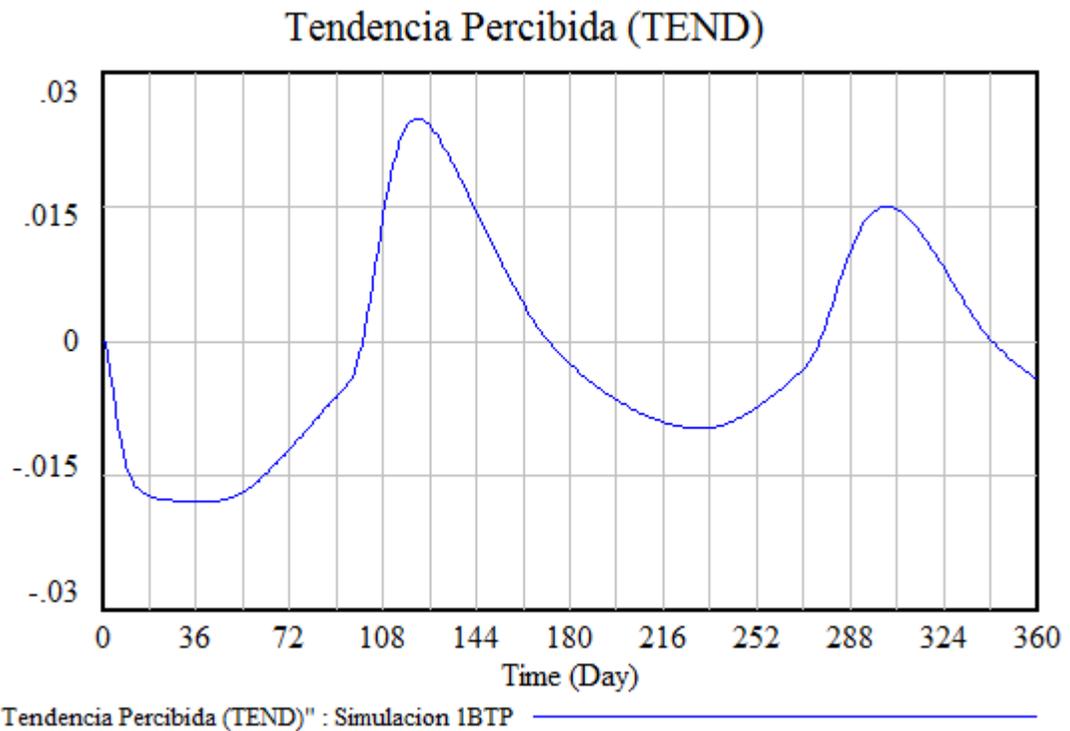


Figura 11. Tendencia Percibida por los policías del comportamiento de los Conductores (TEND). Fuente: Los autores.

### 6.3 Regla de Decisión: “Comportamiento de Conductores y Policías en eventos de pérdidas”

Una vez aplicada la función TREND y se observó el patrón de comportamiento del conductor, se procedió a utilizar una regla de decisión que aumentara el número de policías patrullando, en caso de observarse un aumento de la tendencia a infringir la ley. Por un lado, en la Figura 12., se puede observar como en contraste con la Figura 11., en el momento de observarse una tendencia positiva muy pronunciada, luego del día 108, se incrementa el número de policías patrullando y por ende la probabilidad de patrullar a través de la regla de decisión, mostrando un pulso en la gráfica de probabilidades de patrullar, tanto real como percibida. Lo anterior se hace de forma sucesiva.

## Probabilidad Patrullar Vs Probabilidad Percibida de Patrullar

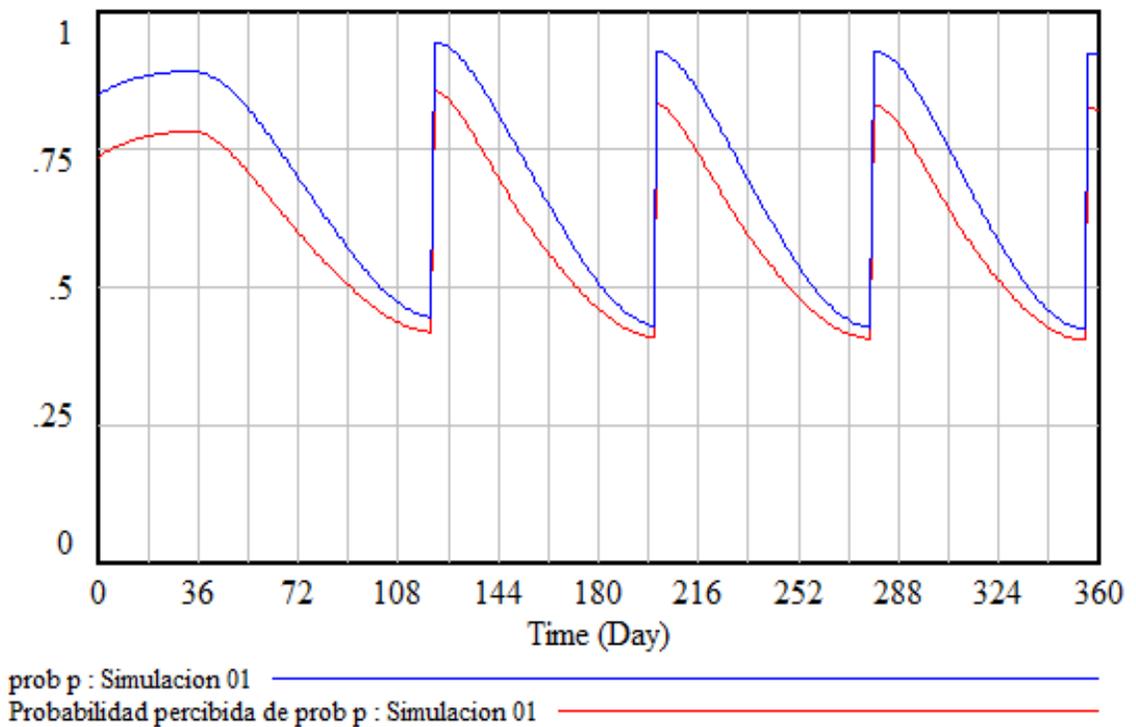


Figura 12. Probabilidad de patrullar vs probabilidad percibida de patrullar con Teoría de Prospectos, Función TREND y Regla de Decisión. Fuente: Los autores.

Por otro lado, en la Figura 13., se puede observar, siguiendo la explicación anterior, como en el momento de observarse una tendencia positiva muy pronunciada, luego del día 108, al incrementarse el número de policías patrullando y por ende la probabilidad de patrullar a través de la regla de decisión, se muestra un pulso en la gráfica de probabilidades de infringir, tanto real como percibida. Lo anterior se hace de forma sucesiva, haciendo que ésta disminuya inmediatamente después de que hay un aumento de la probabilidad patrullar, pero relajando el comportamiento con el tiempo, haciéndolos propensos a arriesgarse nuevamente.

### Prob Infringir Vs Probabilidad Percibida de Infringir

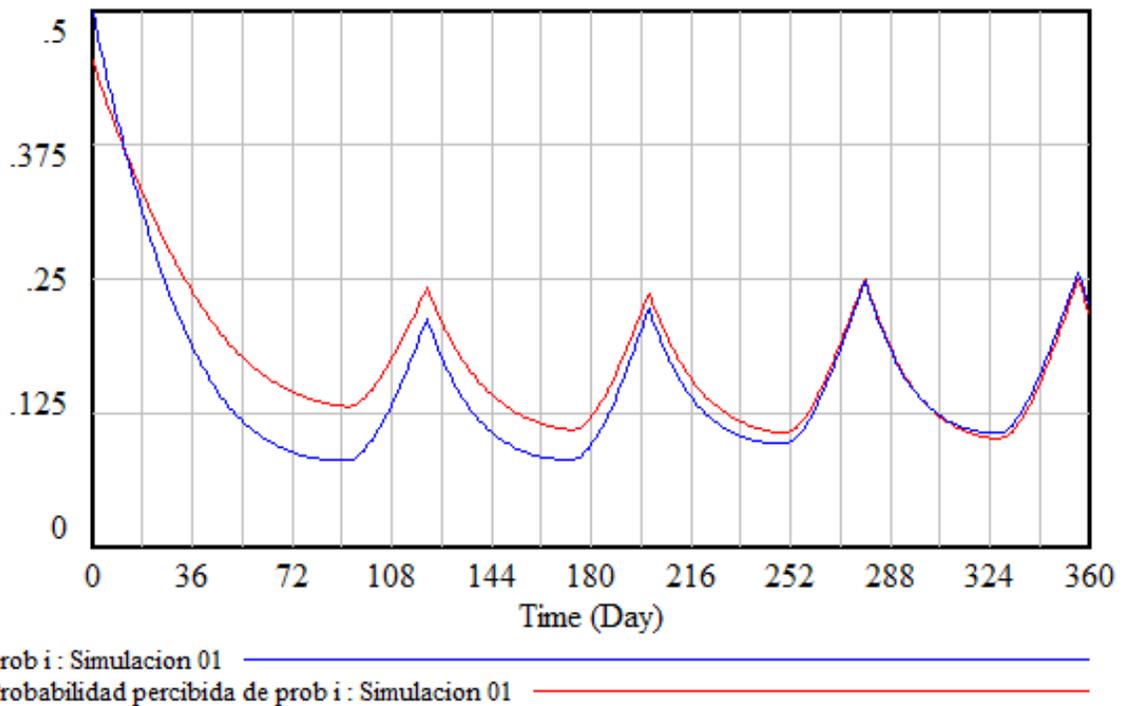


Figura 13. Probabilidad de infringir vs probabilidad percibida de infringir con Teoría de Prospectos, Función TREND y Regla de Decisión. Fuente: Los autores.

Finalmente, en la Figura 14., es posible observar el contraste de comportamiento tanto de policías como de conductores. Se podría decir que ambos comienzan en cierto equilibrio, pero en el momento en que los conductores aumentan la probabilidad de infringir la ley, inmediatamente, se envía un pulso, que indica a los policías dicho comportamiento, para aumentar a su vez el número de policías patrullando, lo que aumenta la probabilidad de patrullar inmediatamente y por ende, la posibilidad de un evento de pérdida como el hecho de ser atrapado infringiendo la ley, haciendo que los conductores disminuyan su propensión al riesgo y comiencen a aborrecerlo. Sin embargo, es claro, que ésta aversión al riesgo, sólo dura mientras la probabilidad de patrullar es relativamente alta, dado que luego de que ésta comienza a disminuir por debajo del 50% aproximadamente, los conductores comienzan a arriesgarse más.

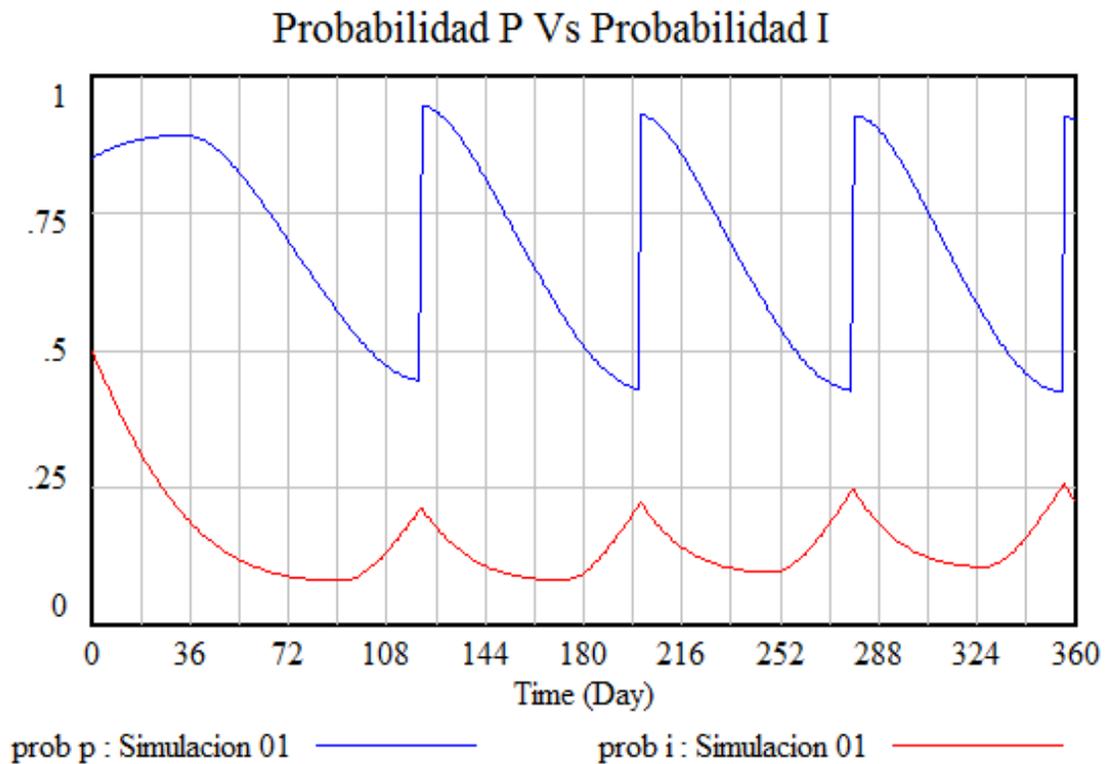


Figura 14. Comportamiento en eventos de pérdidas de conductores. Fuente: Los autores.

González & Sawicka (2003, Pág. 2), muestran que un comportamiento similar al mostrado en la Figura 14., ocurre en ambientes de riesgo, el cual puede observarse en la Figura 15., donde explican por qué las medidas restrictivas impuestas no se conservan en el tiempo, puesto que éstas van haciéndose más laxas a medida que éste avanza, por lo cual, los conductores se “relajan” y vuelven a su comportamiento arriesgado, hasta que ocurre nuevamente un evento riesgoso para ellos, como después de un evento de multa.

Más aún, varias investigaciones realizadas por éstos autores, sugieren que la probabilidad de eventos que se producen con frecuencia, tiende a sobreestimarse, por lo cual, inmediatamente después de la ocurrencia de un evento, la adherencia a la seguridad aumenta.

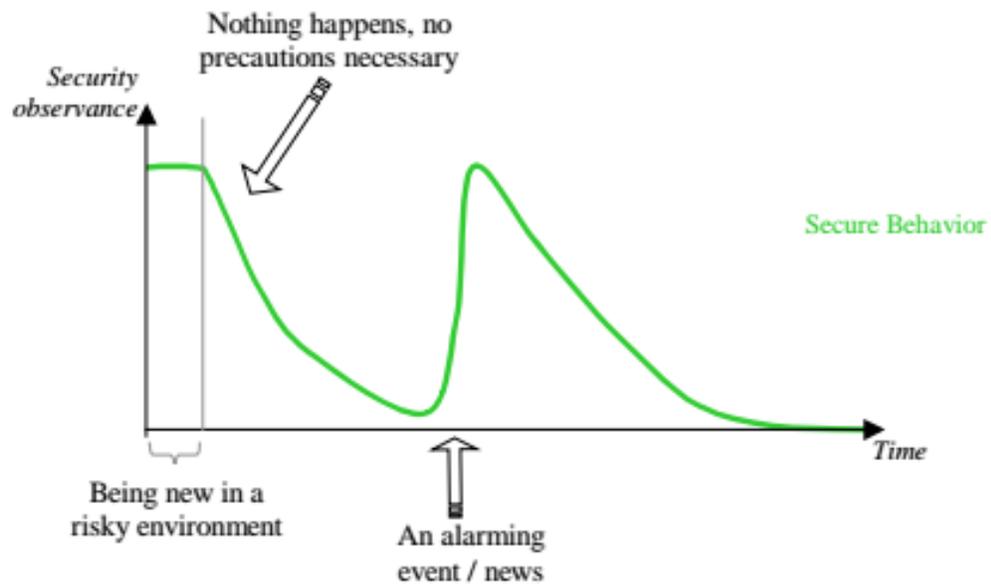


Figura 15. Comportamiento típico observado en ambientes de riesgo.  
Fuente: González & Sawicka (2003, Pág. 2)

Cabe resaltar, por un lado, que aun cuando González y Sawicka (2003) mencionan que éste es un típico comportamiento en ambientes de riesgo, sin embargo, estos autores no logran replicarlo en su modelo, argumentando que “la teoría utilizada no tenía en cuenta los cambios dinámicos en la percepción de probabilidades o los posibles cambios en las funciones de valor” González y Sawicka (2003, Pág. 25).

Por otro lado, en el presente modelo es observable que el comportamiento entre agentes decisores como policías y conductores, se ajusta al comportamiento típico observado en ambientes de riesgo, lo cual es un aporte importante no sólo en el campo de estudio de éste proyecto, sino también para el estudio del comportamiento entre estos agentes decisores y para la formulación de políticas de control, encaminadas a asegurar el cumplimiento de la normatividad de tránsito.

## CAPITULO VII. CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos, se puede concluir que la interpretación que Kim & Kim (1997) hacen de la teoría expuesta por Tsebelis (1989)<sup>1</sup> es poco profunda, dado que éste último no asegura que incrementar la multa no sea efectivo, sino que es contraproducente, desde el punto de vista que no afecta la frecuencia de cometer el crimen, sino que incrementa la frecuencia con la que se aplica la ley, resultados que se ven corroborados en el presente proyecto. Sin embargo, apoyando lo concluido por Kim & Kim (1997), esto puede llegar a ser una medida de control útil, es decir, la multa puede inducir al conductor a cumplir la norma, complementando a ambos autores.

El comportamiento de los conductores simulado desde la teoría evolutiva de juegos y teoría acumulativa de prospectos, a través de la dinámica de sistemas, se ajusta a lo descrito por González & Sawicka (2003, Pág. 2) bajo situaciones de eventos de riesgo, donde se puede observar, como después de un evento de multa, el conductor se va volviendo progresivamente más laxo y al relajarse, vuelve a arriesgarse, hasta que ocurre nuevamente un evento.

De acuerdo con el modelo, en el largo plazo, los policías logran percibir de forma casi exacta e comportamiento del conductor, lo cual logra que en el modelo, las medidas restrictivas tomadas, puedan ser bastante efectivas.

Según el modelo, la percepción de probabilidad de patrullar percibida por los conductores, generalmente es subestimada por los mismos, lo cual genera que estos se encuentren muy confiados en el momento de un evento de control de los organismos de control policíacos.

Las variables de teoría acumulativa de prospectos introducidas en el modelo, permitieron tener un mejor entendimiento acerca del comportamiento de los agentes decisores en condiciones de riesgo.

---

<sup>1</sup> Ver página 10 del presente documento.

## **CAPITULO VIII. RECOMENDACIONES**

### **Para proyectos futuros:**

- Una limitación del modelo simulado, es que es genérico, por lo cual si se desea seguir por la misma línea de estudio del proyecto actual, es necesario utilizar investigaciones empíricas y datos reales para ajustar parámetros de modelo, de forma que se pueda presentar, una mejor aproximación al mundo real.
- Una vez haya validado el modelo, se tiene:

### **Para la Universidad Icesi:**

- Podría ser útil el aporte relacionado con la comprensión del comportamiento del conductor como agente decisor, para la aplicación de políticas de control interno del parqueadero.

### **Para Organismos de Control y Alcaldías:**

- Sería interesante contactarlos, en el futuro, para contrastar el modelo con los datos generados por el comportamiento real entre conductores y policías, de modo que se pueda validar que tan alejado o no se encuentra el mismo, para su respectiva utilización en políticas de control reales.
- Se recomienda validar si las políticas de control orientadas hacia controles frecuentes, realmente generan una sobre estimación de los riesgos por parte de los conductores, de modo que se pueda generar una mayor observancia de cumplimiento de las medidas de seguridad.

## BIBLIOGRAFÍA

- Axelrod, R., & Hamilton, W. D. . (1981). The Evolution of Cooperation. *Science*.
- Maschler, M. S. (2013). *Game Theory (1st ed.)*. New York: Cambridge University Press.
- Nunes, E. G. (2014). Multiagent Decision Making on Transportation Networks. *Journal of Information Processing*, 307-318.
- Oechssler, J. (1994). An evolutionary interpretation of mixed-strategy equilibria. *Mimeo*, 1-24.
- Sterman, J. D. (2000). Systems Thinking and Modeling for a Complex World. *Management (Vol. 6)*.
- Tian, Y. G. (2014). A system dynamics model based on evolutionary game theory for green supply chain management diffusion among Chinese manufacturers. *Journal of Cleaner Production*, 96-105.
- Wang, H. C. (2011). Research on the evolutionary game of environmental pollution in system dynamics model. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence 23(1)*, 39-50.
- Hufbauer, G. S. (1985). *Economic Sanctions Reconsidered*. Washington D.C: Institute for International Economics.
- Tsebelis, G. (1989). The Abuse of Probability in Political Analysis: The Robinson Crusoe Fallacy. *American Political Science Review 83 (1)*, 77-91.
- Kim, D. H., & Kim, D. H. (1997). A system dynamics model for a mixed-strategy game between police and driver. *System Dynamics Review, 13(1)*, 33-52.
- Ricart, J. E. (1988). *Una introducción a la teoría de los juegos*. Barcelona: IESE Business School, Universidad de Navarra.
- Arenas, F. (2004). Una aproximación a los indicadores de gestión a través de la dinámica de sistemas. *Sistemas y Telemática, Universidad Icesi*, 69-81.
- Kahneman, D., & Tversky, A. (1979). Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk. *Econometrica*, 263-291.

Tversky, A., & Kahneman, D. (1992). Advances in Prospect Theory: Cumulative Representation of Uncertainty. *Journal of Risk and Uncertainty*, 297-323.

Prelec, D. (Mayo de 1998). The Probability Weighing Function. *Econometrica*, 66(3), 497-527.

Aracil, J., & Gordillo, F. (2005). *Dinámica de Sistemas*. Alianza Editorial.

## ANEXOS

### Anexo 1. Artículo:

#### **JUEGOS DE ESTRATEGIA MIXTA: UNA APROXIMACION DESDE LA DINÁMICA DE SISTEMAS Y LA TEORIA ACUMULATIVA DE PROSPECTOS**

#### **MIXED STRATEGY GAMES: AN APPROACH FROM SYSTEM DYNAMICS AND CUMULATIVE PROSPECT THEORY**

**Cristhian C. Gómez Mayor<sup>a</sup>, Diana A. Guzmán Granobles<sup>b</sup>**

*a Estudiante de Ingeniería Industrial de la Universidad Icesi. Cali, Colombia. Email: ccgm.594@gmail.com*

*b Estudiante de Ingeniería Industrial de la Universidad Icesi. Cali, Colombia. Email: aribelguzman@gmail.com*

---

### RESUMEN

En el presente documento se evidenció una oportunidad para aplicar teorías conductuales de toma de decisiones, como la teoría acumulativa de prospectos, que complementan la teoría evolutiva de juegos. El documento muestra un modelo de simulación de dinámica de sistemas para un juego de estrategia de mixta, en el cual el comportamiento de los conductores ha sido redefinido desde la teoría acumulativa de prospectos. Se identificaron las variables clave del modelo de simulación base que explican el comportamiento entre policías y conductores, relacionándolas a través de un diagrama causal. Posteriormente, se adaptó dicho modelo a un software llamado Vensim PLE y se aplicó teoría evolutiva de prospectos para explicar la percepción de probabilidades de uso de las estrategias de cada uno de los agentes. Se concluye que bajo situaciones de eventos de riesgo, como un evento de multa, el conductor disminuye la probabilidad de infringir la norma, sin embargo, con el tiempo se va volviendo progresivamente más laxo y al relajarse, vuelve a arriesgarse, hasta que ocurre nuevamente un evento. En el largo plazo, los policías logran percibir de forma casi exacta el comportamiento del conductor, lo cual logra que en el modelo, las medidas restrictivas tomadas, sean bastante efectivas. Mientras que la percepción de probabilidad de patrullar percibida por los conductores, generalmente es subestimada por los mismos, lo cual genera que estos se encuentren muy confiados en el momento de un evento de control de los organismos de control policíacos.

**Palabras Claves:** Dinámica de sistemas, Teoría de juegos, Teoría acumulativa de prospectos, políticas de control.

### ABSTRACT

This document presents a system dynamics model simulation for a mixed strategy game adapted from presenting authors Kim & Kim (1997), in which the behavior of drivers, has been redefined from the cumulative prospect theory, through systems dynamics described by Gonzalez & Sawicka (2003). Finally, concludes since under situations of risk events as an punish, the driver decreases the chance of breaking the rule, however, with the time becomes progressively more lax and relax, take risks again until an event occurs again. In the long run, the police to perceive almost exactly the driver behavior, which achieves that in the model, the restrictive measures taken are quite effective. While the perceived probability of patrolling perceived by drivers, it is usually underestimated by them, which generates that they are very confident in a police control.

**Key Words:** System dynamics, Game theory, cumulative prospect theory, control policies.

---

## 1. Introducción

Constantemente las personas se ven involucradas en procesos de toma de decisiones y retroalimentación. En la toma de decisiones los individuos se enfrentan con la necesidad de escoger entre varias alternativas, con información limitada y en ambientes de mucha incertidumbre. En los procesos de retroalimentación, en cambio, las personas toman decisiones con base en los movimientos de sus semejantes y estímulos del ambiente que lo hagan modificar su elección.

La dinámica de sistemas está enfocada en el modelamiento y simulación de estos procesos mencionados. Además en este campo de estudio, también se encuentra la teoría de juegos que está más relacionada con los procesos de retroalimentación, ya que se enfoca en el estudio del comportamiento de los individuos en situaciones de juego donde las decisiones tomadas cambian en respuesta a las acciones de otros jugadores.

El propósito de este artículo es aplicar teoría acumulativa de prospectos a un modelo de dinámica de sistemas planteado en el artículo: "A system dynamics model for a mixed-strategy game between police and driver" por Dong-Hwan Kim y Doa Hoon Kim. Con dicho aporte al modelo se busca comprender el comportamiento entre los conductores y el organismo de tránsito encargado de formular políticas o sanciones, desde la perspectiva de la teoría de juegos, la teoría acumulativa de prospectos y la dinámica de sistemas.

En el futuro, este artículo puede llegar a ser una herramienta útil para el organismo de tránsito de la ciudad dado que puede permitirle analizar el comportamiento entre estos agentes

y, formular mejores políticas para disminuir la cantidad de accidentes y comportamientos inadecuados por parte de los conductores.

---

## 2. Marco Teórico

De acuerdo con Kim & Kim (1996), la dinámica de sistemas y la teoría evolutiva de juegos puede ser aplicada en conjunto en un juego de estrategia mixta entre agentes de tránsito y conductores, dado que el concepto de estrategia de equilibrio puede ser usado para analizar las consecuencias dinámicas de las diferentes opciones de políticas sancionatorias aplicadas. En éste artículo, se aplica la teoría propuesta por Tsebelis (1989), quien plantea que el incremento de las sanciones no es una herramienta viable para decrecer la tendencia a la violación de las normas de tránsito de los conductores. Lo anterior ocurre porque las interacciones entre agentes de tránsito y conductores puede ser mejor representada por un juego de estrategia mixta en el cual los jugadores o agentes que intervienen escogen sus acciones basados en una probabilidad, la cual no es afectada por el incremento de la sanción. Los resultados que los autores exponen muestran que toma mucho tiempo para que el equilibrio predicho por la teoría aparezca en la realidad, por lo cual, las acciones de los jugadores no pueden y no deben depender del equilibrio para tomar sus decisiones; además, muestran que el incremento de una sanción, en contraposición a la solución de la teoría de juegos, puede inducir, de manera consistente con el comportamiento del mundo real, al acatamiento de la norma. Los autores concluyen que la escasa capacidad descriptiva del modelo basado en teoría de juegos, proviene de la falta de análisis del comportamiento dinámico y transitorio de las decisiones.

González & Sawicka (2003), desarrollaron un modelo de dinámica de sistemas que simula el comportamiento y las decisiones del ser humano a través de la teoría de prospectos acumulativa, la cual es una teoría que describe la toma de decisiones bajo condiciones de riesgo (Kanheman & Tversky 1979), aplicándola específicamente para los sistemas de seguridad en las tecnologías de la información (TI). El modelo desarrollado simula las decisiones de un ser humano el cual tiene que ingresar información a una base de datos y tiene que decidir la frecuencia con la cual hace “backup” de los datos. Si realiza “backup” con mucha frecuencia, la actividad toma más tiempo debido a la espera generada por la copia de seguridad. Por otro lado, si la frecuencia con la que hace “backup” es muy baja, existe una probabilidad más alta de que ocurra un evento de pérdida de datos y se tenga que ingresar nuevamente toda la información a la base de datos.

---

### 3. Metodología

#### 3.1. Modelamiento cualitativo de variables claves en un diagrama causal

Las variables utilizadas en el modelo de Vensim PLE fueron elegidas con base en el modelo de simulación de dinámica de sistemas presentado por Kim & Kim (1997). Las variables son de tipo endógenas porque ecuaciones están incluidas dentro de la estructura del modelo y no hay intervención externa en el mismo. Las variables claves corresponden a:

- **Número de agentes de tránsito patrullando:** Cantidad de agentes de tránsito que están patrullando en un momento determinado.
- **Probabilidad de patrullar:** Posibilidad al azar existente de que un agente de tránsito pueda patrullar en un momento determinado.
- **Utilidad esperada de infringir la norma:** Es la suma de las utilidades de un conductor que va a infringir la norma, asociadas a los distintos resultados posibles, ponderadas por sus probabilidades de ocurrencia,
- **Número de conductores que infringen la norma:** Cantidad de conductores que están infringiendo la norma de tránsito en un momento determinado.
- **Probabilidad de infringir la norma:** Posibilidad al azar existente de que un conductor pueda infringir la norma en un momento determinado.
- **Utilidad esperada de patrullar:** Es la suma de las utilidades de un agente que va a patrullar, asociadas a los distintos resultados posibles, ponderadas por sus probabilidades de ocurrencia.

Las variables mencionadas, se relacionan en el siguiente es el diagrama causal para el modelo estudiado:

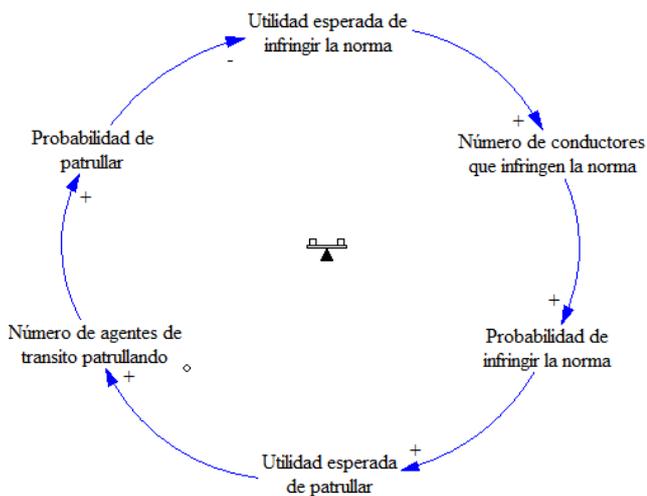


Figura 16. Diagrama Causal de las variables clave del modelo. Fuente: Autores.

La relación entre cada variable, va acompañada de la polaridad existente entre ellas. Esta polaridad ha sido definida como positiva (+) cuando la relación es directamente proporcional, es decir, que si una aumenta, la otra también ha de hacerlo; o negativa (-) cuando la relación es inversamente proporcional, es decir, que si una aumenta, la otra ha de disminuir. Lo anterior, ocasiona que el cambio de una variable impacte las variables consecuentes y por ende todo el sistema que ha de ser estudiado, de ahí la importancia de una buena representación.

Para el modelo en cuestión, se podría contar una historia, de acuerdo con la polaridad de cada variable, de la siguiente manera: Dado un número determinado de conductores que infringen la norma, si estos aumentan, la probabilidad de infringir la norma aumenta a su vez, lo cual provoca que la utilidad esperada de patrullar incremente y que en consecuencia, el

número de policías patrullando también incremente. Si aumentan el número de policías patrullando, la probabilidad de patrullar también aumenta, lo cual causa que la utilidad esperada de infringir la norma de los conductores disminuya; si la utilidad esperada de infringir la norma disminuye, el número de conductores que infringen la norma disminuirá a su vez, volviendo al punto de inicio de la historia, pero con una polaridad diferente, lo cual indica que el diagrama causal es del tipo compensador.

### 3.2. Adaptación del modelo de simulación de Kim & Kim (1997) a Vensim PLE

Cabe resaltar, con respecto al modelo de los autores Kim & Kim, (1997), que éste se encuentra modelado en un programa llamado Stella, por lo cual al tratar de adaptarlo en un programa como Vensim PLE, se debía encontrar equivalencias entre ciertas funciones de ambos programas que no eran evidentemente claras, a modo de ejemplo se podrían mencionar las tablas de relación entre las utilidades esperadas y la probabilidad correspondiente a cada una de ellas, la cual fue posible adaptar en Vensim PLE a través de 4 variables de tipo *lookup* (tabla de patrullar a oficina, tabla de oficina a patrullar, tabla de infringir a cumplir y tabla de cumplir a infringir) y su respectiva función *As Graph*. Las ecuaciones que definen las variables utilizadas para dicho modelo, se encuentran resumidas en los anexos del artículo de Kim & Kim, (1997).

Lo anterior, permitió entender el comportamiento no sólo de la dinámica del sistema, la cual fue abordada por el modelo causal elaborado, sino también, la relación



Las variables “uep” y “uenp” significan “utilidad esperada por patrullar” y “utilidad esperada por no patrullar” respectivamente y son las utilidades esperadas de patrullar o no patrullar de los policías, cuya ecuación se define como el producto de la probabilidad percibida de violar (prob v percibida) y la respectiva constante (GPCCP y GPICP). La diferencia entre “uep” y “uenp” (llamada “Diferencia uep uenp”) será la utilidad esperada que se buscará en las tablas “TABLA de patrullar a la oficina” y “TABLA de la oficina a patrullar”, lo cual, dará como resultado una probabilidad de patrullar o no, que multiplicado por el número de policías patrullando o en la oficina respectivamente, y dividido sobre el tiempo en la oficina o patrullando, determinará la cantidad de policías en cada variable tipo flujo de policías (“Ir a patrullar”, “Dejar de patrullar”). Finalmente, el número de policías que vayan a patrullar se divide sobre 100 en la variable “prob p”, que es la probabilidad de salir a patrullar. Ésta misma dinámica explica la correspondiente sección en los conductores, con los valores respectivos de cada variable.

### 3.3. Teoría de prospectos para explicar la percepción de probabilidades de los agentes

#### 3.3.1. Teoría de acumulativa de prospectos

De acuerdo a la definición de teoría de prospectos que se utilizó como marco teórico, la inclusión de la teoría al modelo de simulación, viene dada por nuevas variables que contienen las ecuaciones que explican la toma de decisiones de los agentes en ambientes de riesgo.

En este modelo, el riesgo lo percibe sólo el conductor cuando incumple las normas de tránsito al decidir si conduce a una velocidad superior a la permitida. Por esta razón, se incluyeron una serie de variables adaptadas del modelo de González & Sawicka (2003), como se explica a continuación:

Primero, la variable que afecta la probabilidad de ser atrapado por un agente de tránsito. En la Figura 2. Las 2 variables de mayor impacto son Probabilidad percibida de prob p y Parámetro de Percepción de Probabilidad PPP prob p. Probabilidad percibida de prob p contiene la ecuación que realiza el ajuste de probabilidad, es decir, la contiene la ecuación de teoría de prospectos según Prelec (2000). Parámetro de Percepción de Probabilidad PPP prob p contiene la ecuación para calcular el valor del parámetro. Este es dinámico y puede variar entre un rango determinado. Las variables como PPP Max prob p y Tasa de ajuste PPP prob p cuentan con las siguientes ecuaciones:

Variable	Ecuación o Regla de decisión	Fuente
PPP Max prob p	IF THEN ELSE((ABS(Dynamic PPP prob p)>=0.5), 2, Initial PPP prob p )	González & Sawicka(2 003)
Tasas de ajuste PPP prob p	(Max PPP prob p- Probability Perception Parameter PPP prob p)/PPP Adjustment Time prob p	González y Sawicka(2 003)

Tabla 3. Ecuaciones de teoría de prospectos. Fuente: González & Sawicka (2003).

Las constantes PPP Dinámico prob p, PPP Inicial prob p y Tiempo de ajuste PPP prob p tienen los siguientes valores registrados por González & Sawicka (2003).

Constante	Valor	Fuente
PPP Dinámico prob p	0 o 1	González y Sawicka(2003)
PPP Inicial prob p	0.65	Prelec(2000)
Tiempo de ajuste PPP prob p	1000	González & Sawicka(2003)

Tabla 4. Valores de constantes. Fuentes: González & Sawicka (2003) y Prelec (2000).

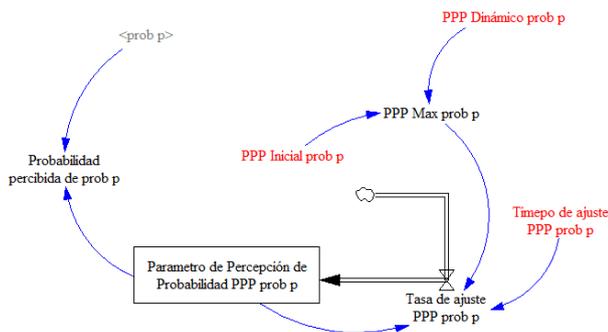


Figura 18. Variables de Teoría de Prospectos para probabilidad P. Fuente: Adaptada de González & Sawicka (2003).

En el caso de la Figura 3., se trata de la parte del modelo que cambia la prob p de patrullar a una probabilidad percibida de prob p. Para la prob i (probabilidad de infringir), se desarrolló un modelo exactamente igual utilizando ese valor de entrada.

La ecuación de teoría de prospectos utilizada en la variable *Probabilidad percibida de prob p*

para ajustar la *prob p* (Probabilidad de ser atrapado), tal como lo definen Kahneman & Tversky (1979), sin embargo, Prelec (2000) hizo una simplificación definiéndola de la siguiente manera:

$$e^{-((-\ln(\text{prob } p))^{\text{Parametro percibida de prob } p})}$$

Esta ecuación modifica la probabilidad real de ser atrapado y hace que se comporte como indican Kahneman & Tversky (1979). Cuando las probabilidades de ser atrapado es baja, el agente decisor sobrevalora esa probabilidad, pero cuando las probabilidades son más altas, el agente decisor tiende a subestimar la probabilidad real o el suceso real, que para el caso del conductor, es ser atrapado mientras incumple la normatividad.

3.3.2. Consideración de la tendencia:

La adaptación de la teoría de prospectos al modelo de Kim & Kim (1997) con la inclusión de las variables del modelo de González & Sawicka, genera un comportamiento diferente en la percepción de probabilidades. Para hacer más robusto el modelo, se incluyeron una serie de variables las cuales cumplen la función de detectar una tendencia en los datos. Cuando detecta que los datos están aumentando o disminuyendo progresivamente, la función TREND trata de mantener esta tendencia y tiene en consideración un tiempo en el cual se percibe la condición actual de los datos, un horizonte de tiempo para generar el valor resultante de la tendencia y por ultimo un tiempo para percibir dicha tendencia. La figura es función TREND en el modelo de simulación.

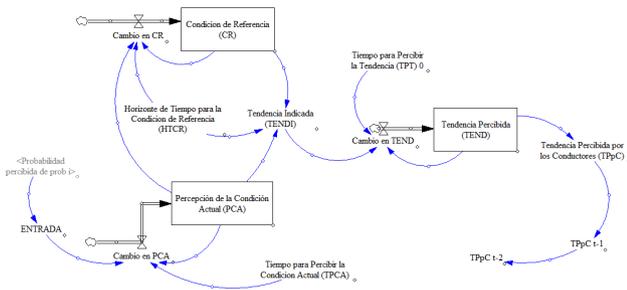


Figura 19. Función TREND. Fuente: Adaptada de Sterman (2000).

La función TREND (Figura 4.) se aplicó para la prob *i*, ya que los que detectan la probabilidad de infringir son los policías. Cuando existe una tendencia positiva en la dicha probabilidad, debería existir un aumento en los policías patrullando para de alguna manera contrarrestar la situación.

Se tiene entonces la entrada del valor de la prob *i* en un tiempo determinado. Este valor se le resta el valor inicial de PCA (0.5) y esta diferencia se divide entre el TPCA (4). El flujo *Cambio en PCA* ingresa nuevamente en la variable de nivel de PCA para alimentarla con un nuevo valor en cada corrida de la simulación. También se encuentra el flujo *Cambio en CR* al cual le llegan tres valores: PCA, HTCR y CR. En este flujo se calcula un nuevo valor con la diferencia entre el PCA y el valor inicial del CR (0.5) dividido entre el HTCR (4), el cual alimenta la variable de nivel CR. Con estos primeros cálculos en las variables se determina si existe una tendencia positiva o negativa y ese valor es calculado en la variable *Tendencia Indicada*.

Por último se realiza el cálculo para determinar el valor de la tendencia percibida. Este valor es calculado en el flujo *Cambio en*

*TEND* y es la diferencia entre la TENDI y el valor inicial de TEND (0) dividido entre el TPT y ese es el valor final de tendencia que se observa en la probabilidad de infringir.

Las variables TPpC t-1 y TPpC t-2, guardan los valores de la TEND de la última y la penúltima simulación haciendo uso de la función DELAY FIXED de Vensim PLE.

La función TREND permite que los policías puedan determinar en qué momento se debe aumentar la cantidad de unidades en patrullaje para disminuir la cantidad de conductores que sobrepasan el límite de velocidad, pero no aumenta dichas unidades. Para hacer esto, se agregó una regla de decisión que tiene en cuenta los valores de la función TREND.

3.3.3. Regla de decisión

La regla de decisión está incluida en el flujo *Aumento policías patrullando* que está conectado con la variable de nivel *Policía patrullando* como se puede observar en la Figura 5.

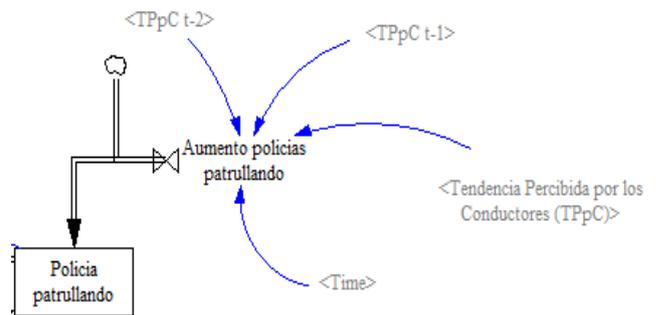


Figura 20. Regla de Decisión. Fuente: Los autores.

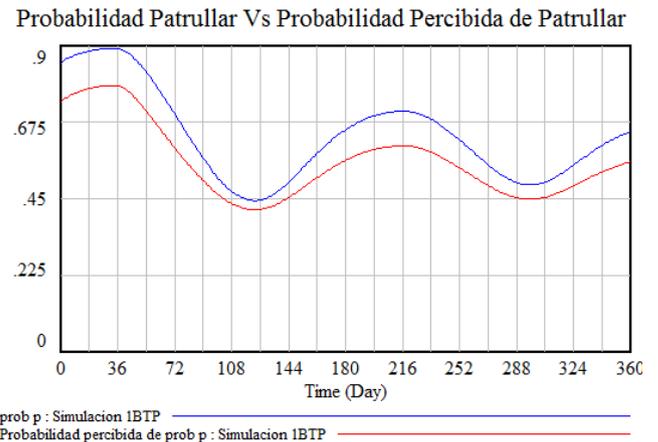
*Aumento policías patrullando* le ingresan 4 valores: Time, TPpC t-2, TPpC t-1 y la TPpC. Si la TPpC es >0 (significa que la prob *i* va en

aumento) y  $TPpC < TPpC_{t-1}$  y  $TPpC_{t-1} < TPpC_{t-2}$  (significa que el valor de la tendencia va en aumento) entonces se ingresan 50 policías a patrullaje por medio de la función PULSE de Vensim PLE para aumentar la prob  $p$ , de lo contrario el valor es cero (no aumentan los policías en patrullaje). La variable Time, permite que la función PULSE ingrese los policías en el momento en que nota que la probabilidad de infringir está en aumento.

## 4. Resultados

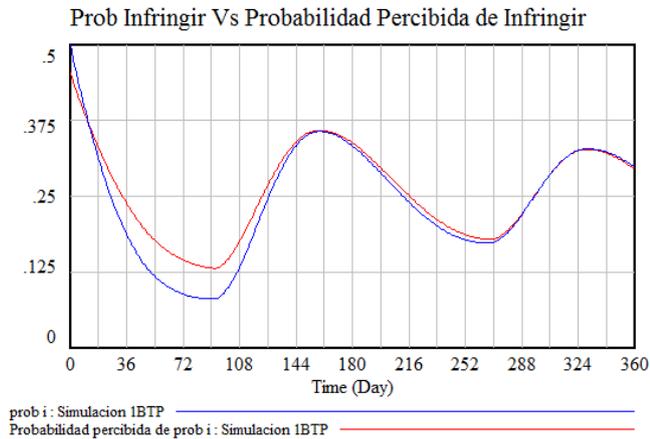
### 4.1. Teoría de evolutiva de prospectos:

Las ecuaciones de teoría evolutiva de prospectos de Kahneman & Tversky (1979), adaptada por Prelec (2000), introducidas en el modelo base, dieron como resultado, una leve suavización de la probabilidad real. Para el caso de los policías, su probabilidad de patrullar, es percibida por los conductores de una forma más suavizada, lo que quiere decir, que la probabilidad de patrullar percibida por los conductores de forma menos exacta, subestimándola con respecto a la probabilidad real, como se puede observar en la Figura 6.



**Figura 6. Probabilidad de patrullar vs probabilidad percibida de patrullar con Teoría de Prospectos. Fuente: Los autores.**

Para el caso de los conductores, su probabilidad de infringir la ley, es percibida por los policías de una forma más suavizada. La probabilidad de infringir la ley percibida por los policías es sobreestimada con respecto a la probabilidad real, al menos al principio, dado que luego de aproximadamente 162 días, estas se ajustan y son muy parecidas, lo cual genera una buena percepción del comportamiento de los conductores en los policías, como se puede observar en la Figura 7.

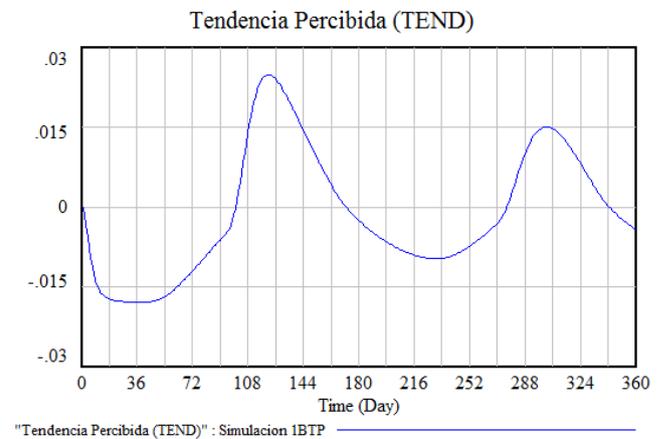


**Figura 7. Probabilidad de infringir vs probabilidad percibida de infringir con Teoría de Prospectos. Fuente: Los autores.**

#### 4.2. Consideración de la tendencia

Con respecto a la función TREND de Sterman (2000), como se explicó con anterioridad, ésta sigue la tendencia percibida de las probabilidades, de forma que la Figura 8., muestra a los policías, cuál es la tendencia de comportamiento de los conductores, a partir de la probabilidad percibida de infringir de los mismos. En la gráfica, se observa cómo una disminución de la probabilidad percibida de infringir de los conductores, se torna en una tendencia negativa de la función TREND. De la misma manera, un aumento de la probabilidad percibida de infringir de los conductores, se torna en una tendencia positiva de la función. Estas tendencias, dan cuenta del patrón de comportamiento del conductor a lo largo del tiempo, lo cual puede ser utilizado para formular políticas, como el aumento del número de policías, que aumente la probabilidad de patrullar, que aumenta el riesgo de ser atrapado

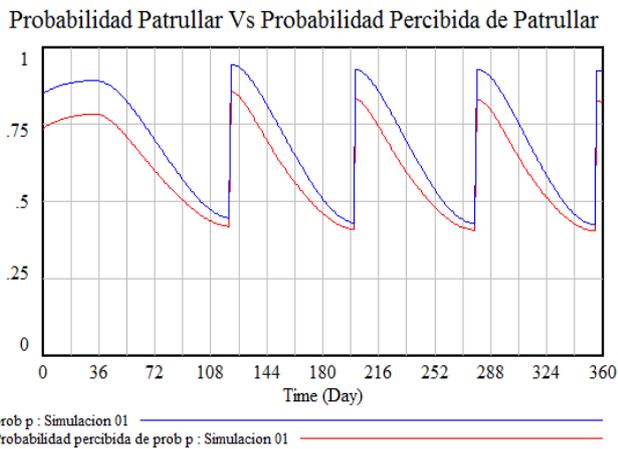
infringiendo la ley y condiciona el comportamiento riesgoso del conductor.



**Figura 8. Tendencia Percibida por los policías del comportamiento de los Conductores (TEND). Fuente: Los autores.**

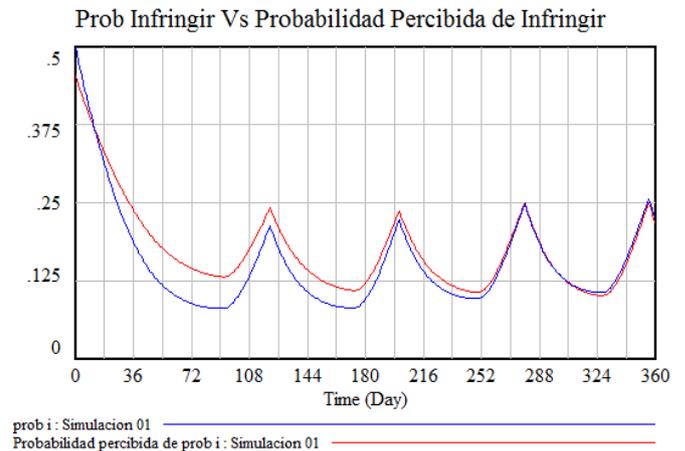
#### 4.3. Regla de Decisión: "Comportamiento de Conductores y Policías en eventos de pérdidas"

Una vez aplicada la función TREND y se observó el patrón de comportamiento del conductor, se procedió a utilizar una regla de decisión que aumentara el número de policías patrullando, en caso de observarse un aumento de la tendencia a infringir la ley. Por un lado, en la Figura 13., se puede observar como en contraste con la Figura 3., en el momento de observarse una tendencia positiva muy pronunciada, luego del día 108, se incrementa el número de policías patrullando y por ende la probabilidad de patrullar a través de la regla de decisión, mostrando un pulso en la gráfica de probabilidades de patrullar, tanto real como percibida. Lo anterior se hace de forma sucesiva.



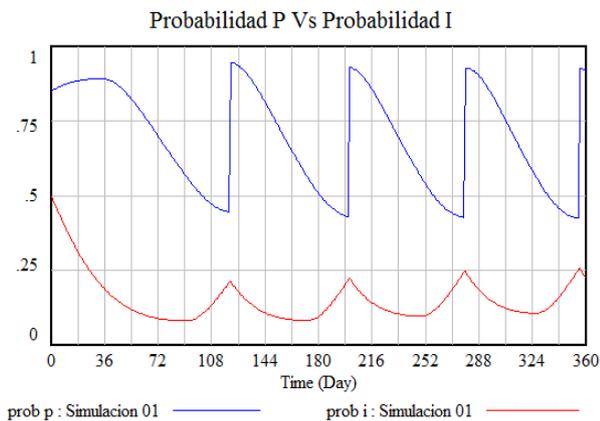
**Figura 9. Probabilidad de patrullar vs probabilidad percibida de patrullar con Teoría de Prospectos, Función TREND y Regla de Decisión. Fuente: Los autores.**

Por otro lado, en la Figura 9., se puede observar, siguiendo la explicación anterior, como en el momento de observarse una tendencia positiva muy pronunciada, luego del día 108, al incrementarse el número de policías patrullando y por ende la probabilidad de patrullar a través de la regla de decisión, se muestra un pulso en la gráfica de probabilidades de infringir, tanto real como percibida. Lo anterior se hace de forma sucesiva, haciendo que ésta disminuya inmediatamente hay un aumento de la probabilidad patrullar, pero relajando el comportamiento con el tiempo, haciéndolos propensos al riesgo nuevamente.



**Figura 10. Probabilidad de infringir vs probabilidad percibida de infringir con Teoría de Prospectos, Función TREND y Regla de Decisión. Fuente: Los autores.**

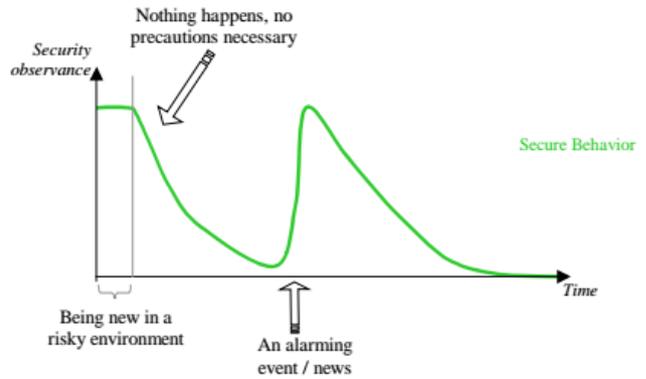
Finalmente, en la Figura 10., es posible observar el contraste de comportamiento tanto de policías como de conductores. Se podría decir que ambos comienzan en cierto equilibrio, pero en el momento en que los conductores aumentan la probabilidad de infringir la ley, inmediatamente, se envía un pulso, que indica a los policías dicho comportamiento, para aumentar a su vez el número de policías patrullando, lo que aumenta la probabilidad de patrullar inmediatamente y por ende, la posibilidad de un evento de pérdida como el hecho de ser atrapado infringiendo la ley, haciendo que los conductores disminuyan su propensión al riesgo y comiencen a aborrecerlo. Sin embargo, es claro, que ésta aversión al riesgo, sólo dura mientras la probabilidad de patrullar es relativamente alta, dado que luego de que ésta comienza a bajar, los conductores se arriesgan más.



**Figura 11. Comportamiento en eventos de pérdidas de conductores. Fuente: Los autores.**

González & Sawicka (2003, Pág. 2), muestran que un comportamiento similar al mostrado en la Figura 14., ocurre en ambientes de riesgo, el cual puede observarse en la Figura 15., donde explican por qué las medidas restrictivas impuestas no se conservan en el tiempo, puesto que éstas van haciéndose más laxas a medida que éste avanza, por lo cual, los conductores se “relajan” y vuelven a su comportamiento arriesgado, hasta que ocurre nuevamente un evento riesgoso para ellos, como después de un evento de multa.

Más aún, varias investigaciones realizadas por éstos autores, sugieren que la probabilidad de eventos que se producen con frecuencia, tiende a sobreestimarse, por lo cual, inmediatamente después de la ocurrencia de un evento, la adherencia a la seguridad aumenta.



**Figura 21. Comportamiento típico observado en ambientes de riesgo. Fuente: González & Sawicka (2003, Pág. 2)**

Cabe resaltar, por un lado, que aun cuando González y Sawicka (2003) mencionan que éste es un típico comportamiento en ambientes de riesgo, sin embargo, estos autores no logran replicarlo en su modelo, argumentando que “la teoría utilizada no tenía en cuenta los cambios dinámicos en la percepción de probabilidades o los posibles cambios en las funciones de valor” González y Sawicka (2003, Pág. 25).

Por otro lado, en el presente modelo es observable que el comportamiento entre agentes decisores como policías y conductores, se ajusta al comportamiento típico observado en ambientes de riesgo, lo cual es un aporte importante no sólo en el campo de estudio de éste proyecto, sino también para el estudio del comportamiento entre estos agentes decisores y para la formulación de políticas de control, encaminadas a asegurar el cumplimiento de la normatividad de tránsito.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

Con los resultados obtenidos, se puede concluir que la interpretación que Kim & Kim (1997) hacen de la teoría expuesta por Tsebelis (1989) es poco profunda, dado que éste último no asegura que incrementar la multa no sea efectivo, sino que es contraproducente, desde el punto de vista que no afecta la frecuencia de cometer el crimen, sino que incrementa la frecuencia con la que se aplica la ley, resultados que se ven corroborados en el presente proyecto. Sin embargo, apoyando lo concluido por Kim & Kim (1997), esto puede llegar a ser una medida de control útil, es decir, la multa puede inducir al conductor a cumplir la norma, complementando a ambos autores.

El comportamiento de los conductores simulado desde la teoría evolutiva de juegos y teoría acumulativa de prospectos, a través de la dinámica de sistemas, se ajusta a lo descrito por González & Sawicka (2003, Pág. 2) bajo situaciones de eventos de riesgo, donde se puede observar, como después de un evento de multa, el conductor se va volviendo progresivamente más laxo y al relajarse, vuelve a arriesgarse, hasta que ocurre nuevamente un evento.

De acuerdo con el modelo, en el largo plazo, los policías logran percibir de forma casi exacta e comportamiento del conductor, lo cual logra que en el modelo, las medidas restrictivas tomadas, puedan ser bastante efectivas.

Según el modelo, la percepción de probabilidad de patrullar percibida por los conductores,

generalmente es subestimada por los mismos, lo cual genera que estos se encuentren muy confiados en el momento de un evento de control de los organismos de control policíacos.

Las variables de teoría acumulativa de prospectos introducidas en el modelo, permitieron tener un mejor entendimiento acerca del comportamiento de los agentes decisores en condiciones de riesgo.

Para proyectos futuros:

- Una limitación del modelo simulado, es que es genérico, por lo cual si se desea seguir por la misma línea de estudio del proyecto actual, es necesario utilizar investigaciones empíricas y datos reales para ajustar parámetros de modelo, de forma que se pueda presentar, una mejor aproximación al mundo real.

Una vez haya validado el modelo, se tiene:

Para la Universidad Icesi:

- Podría ser útil el aporte relacionado con la comprensión del comportamiento del conductor como agente decisor, para la aplicación de políticas de control interno del parqueadero.

Para Organismos de Control y Alcaldías:

- Sería interesante contactarlos, en el futuro, para contrastar el modelo con los datos generados por el comportamiento real entre conductores y policías, de modo que se pueda validar que tan

alejado o no se encuentra el mismo, para su respectiva utilización en políticas de control reales.

- Se recomienda validar si las políticas de control orientadas hacia controles frecuentes, realmente generan una sobre estimación de los riesgos por parte de los conductores, de modo que se pueda generar una mayor observancia de cumplimiento de las medidas de seguridad.

Nunes, E. G. (2014). Multiagent Decision Making on Transportation Networks. *Journal of Information Processing*, 307-318.

Oechssler, J. (1994). An evolutionary interpretation of mixed-strategy equilibria. *Mimeo*, 1-24.

Sterman, J. D. (2000). *Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Management (Vol. 6).

Tsebelis, G. (1989). The Abuse of Probability in Political Analysis: The Robinson Crusoe Fallacy. *American Political Science Review* 83 (1), 77-91.

## Bibliografía

Arenas, F. (2004). Una aproximación a los indicadores de gestión a través de la dinámica de sistemas. *Sistemas y Telemática*, Universidad Icesi., 69-81.

Hufbauer, G. S. (1985). *Economic Sanctions Reconsidered*. Washington D.C: Institute for International Economics.

Kahneman, D., & Tversky, A. (1979). Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk. *Econometrica*, 263-291.

Kim, D. H., & Kim, D. H. (1997). A system dynamics model for a mixed-strategy game between police and driver. *System Dynamics Review*, 13(1), 33-52.

Maschler, M. S. (2013). *Game Theory* (1st ed.). New York: Cambridge University Press.

