



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Efectos de elementos de diseño del Programa Nacional de Cupos Transables de Emisión (PNCTE) sobre los precios de los cupos y las emisiones agregadas: Un enfoque experimental

Alejandro Rodríguez Mosquera

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Geociencias
Medellín, Colombia

2021

Efectos de elementos de diseño del Programa Nacional de Cupos Transables de Emisión (PNCTE) sobre los precios de los cupos y las emisiones agregadas: Un enfoque experimental

Alejandro Rodríguez Mosquera

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Medio Ambiente y Desarrollo

Director (a):

PhD. Santiago Arango Aramburo

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Geociencias
Medellín, Colombia

2021

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Alejandro Rodríguez Mosquera

Fecha 15/12/2021

Resumen

El cambio climático plantea desafíos a la hora de diseñar mecanismos para su mitigación, por esta razón en esta tesis, se analiza el efecto de elementos de diseño del Programa Nacional de Cupos Transables (PNCTE), como el límite de emisiones, la probabilidad de monitoreo y el volumen de compensaciones permitidas sobre el precio de los permisos y las emisiones agregadas. Los efectos se evalúan utilizando un modelo económico estático que analiza la interacción entre un regulador y tres conjuntos de actores, en el marco de un Sistema de Comercio de Emisiones (SCE) bajo cumplimiento imperfecto. El modelo plantea una serie de hipótesis teóricas donde se sugiere que una estrategia de cumplimiento mayor aumenta el valor esperado de la penalización lo que hace que en equilibrio las firmas se anticipen y disminuyan su nivel de emisiones. Al mismo tiempo, las firmas, aumentan el número de permisos que adquieren en el mercado secundario, llevando a un aumento en el precio de equilibrio dado que la oferta total de permisos es limitada. Adicionalmente, en contraste con la mayoría de SCE en operación en otros mercados, cuando el regulador decide aumentar el volumen de permisos asignados para proyectos de compensación voluntarias, el precio de los permisos aumenta; la diferencia radica en que en el PNCTE las compensaciones no representan permisos adicionales por fuera del límite definido. Por tal razón, el aumento en el volumen de permisos asignados a proyectos de compensación voluntarias representa una disminución del volumen de permisos asignados a los agentes regulados. Finalmente, se propone un diseño experimental que busque testear las hipótesis teóricas derivadas del modelo teórico.

Palabras clave: Sistemas de Comercio de Emisiones, Programa Nacional de Cupos Transables de Emisiones, *Grandfathering*

Abstract

Effects of design elements of the National Program of Emission Tradable Quotas (PNCTE) on the prices of quotas and aggregate emissions: An experimental approach

Climate change poses challenges to the design of mitigation mechanisms. This document analyzes the effect of the design elements of the Colombian National Tradable Quotas Program (PNCTE, for its acronym in Spanish), such as the emissions limit, the monitoring probability and the allowed offset volume on the permit price and aggregate emissions. The effects are assessed using a static economic model that analyses the interaction between a regulator and three sets of actors, within the framework of an imperfectly functioning Emissions Trading System (SCE, for its acronyms in Spanish). The results suggest that a stronger compliance strategy increases the expected value of the penalty, which in turn leads to companies anticipating and reducing their emissions. At the same time, companies increase the number of permits they purchase on the secondary market, leading to an increase in the balance price as the total supply of permits is limited. In contrast to most of the SCE/ETEs in operation, the permit's price increases, when the regulator decides to increase the volume of permits allocated for voluntary offset projects. The difference is that in the PNCTE, offsets do not represent additional permits out of the defined limit. Thus, an increase in the volume of permits allocated to voluntary offset projects represents a decrease in the volume of permits allocated to regulated actors. Finally, an experimental design is proposed seeking to test theoretical hypotheses derived from the model.

Keywords: Emissions Trading System, Colombian National Tradable Quotas Program, Grandfathering

Contenido

	Pág.
1. Marco teórico y estado del arte	5
1.1 Sistemas de Comercio de Emisiones: Teoría y práctica	5
1.2 Experimentos económicos	8
1.3 Teorías sobre el comportamiento de los sujetos.....	9
1.4 El rol de los experimentos económicos en el diseño de SCE	10
2. Caracterización del PNCTE	13
2.1 Variables de diseño.....	13
2.1.1 Ámbito de aplicación.....	13
2.1.2 Límite de emisiones.....	16
2.1.3 Asignación de derechos de emisión y uso de compensaciones	17
2.1.4 Flexibilidad temporal y control de precios	20
▪ <i>Banking</i>	20
▪ Banda de precios.....	21
▪ Contención de costos con una reserva de derechos de emisión.....	21
2.1.5 Cumplimiento y vigilancia.....	21
2.1.6 Enlaces internacionales.....	22
2.2 Selección de elementos de variables a analizar	22
3. Modelo teórico y derivación de hipótesis	25
3.1 Modelo teórico.....	25
3.2 Hipótesis	33
3.2.1 Simulaciones	36
4. Experimento económico	43
4.1 Diseño.....	43
4.1.1 Tipos de jugadores	44
4.1.2 Variables control.....	46
4.1.3 Tratamientos.....	47
4.1.4 Número de sesiones y participantes	47
4.2 Procedimiento	49
4.2.1 Reclutamiento de los participantes	49
4.2.2 Desarrollo del experimento	49
4.2.3 Sorteo de la auditoría del regulador	52
4.2.4 Pagos	53
4.2.5 Controles adicionales.....	53
4.2.6 Plataforma tecnológica	54
5. Conclusiones y recomendaciones	57

X		Título de la tesis o trabajo de investigación
5.1	Conclusiones	57
5.2	Recomendaciones	58

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1: Proceso de asignación de permisos.....	18
Figura 3-1: Valores óptimos de eib^* y lib^* como función de p en el modelo de <i>grandfathering</i>	38
Figura 3-2: óptimos de eik^* , lik^* y yi^* como función de p	38
Figura 3-3: valores óptimos de lik^* y lib^* como función de la probabilidad de monitoreo.....	39
Figura 3-4: Precio de equilibrio como función de L y π	40
Figura 3-5: Precio de equilibrio del SCE como función de LH	40
Figura 3-6: Emisiones totales como función de L y LH	41
Figura 3-7: Emisiones agregada como función de la probabilidad de monitoreo.....	42
Figura 4-1: Distribución de tiempos para cada periodo.....	51

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Elementos de diseño de un SCE	7
Tabla 2-1 Ambito de aplicación del PNTCE	14
Tabla 3-1. Estática comparativa para la firma del sector b	29
Tabla 3-2. Estática comparativa para la firma del sector k	32
Tabla 3-3: Hipótesis sobre el precio de los permisos de emisión.....	34
Tabla 3-4: Hipótesis sobre las emisiones agregadas.....	35
Tabla 3-5: Resumen hipótesis	36
Tabla 3-6 Niveles de equilibrio para eib^* , eik^* , yi^* , lib^* , lik^*	37
Tabla 4-1: asignación entre tipos de jugadores	46
Tabla 4-2: Tratamientos del experimento	47
Tabla 4-3: Variación en el orden de las sesiones experimentales.....	48

Lista de Símbolos y abreviaturas

Abreviatura	Término
COP	Conferencia de las Partes
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas al Cambio Climático
DNP	Departamento Nacional de Planeación
GEI	Gases de Efecto Invernadero
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
MRV	Monitoreo, Reporte y Verificación
PNCTE	Programa Nacional de Cupos Transables de Emisiones
RENARE	Registro Nacional de Reducción de Emisiones
SCE	Sistema de Comercio de Emisiones

Introducción

En la vigésima primera Conferencia de las Partes (COP21) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), Colombia propuso como Contribución Nacionalmente Determinada (NDC, por sus siglas en inglés) la reducción del 20% de sus emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) para 2030, con respecto al escenario tendencial (IDEAM et al., 2018). Dentro de las respuestas del país para cumplir con dicho compromisos se encuentran: i) la implementación de instrumentos normativos como la creación del Sistema Nacional de Cambio Climático (SISCLIMA) y la Política Nacional de Cambio Climático; y ii) la implementación de instrumentos económicos como la fijación de un precio al carbono (Sousa et al., 2018).

Fijar un precio al carbono se presenta como la forma más eficiente de reducir las emisiones de GEI, al mismo tiempo que se convierte en un pilar indispensable para cualquier política climática ambiciosa (Sterman, 2000). La fijación de este precio puede hacerse de manera directa, por medio de una decisión administrativa (impuesto al carbono), o del establecimiento de un Sistema de Comercio de Emisiones (SCE) (Baranzini et al., 2017). En un SCE, el gobierno asigna a los agentes regulados un número limitado de permisos para un contaminante específico por períodos determinados. De este modo, aquellos agentes que cuenten con permisos y cuyos costos marginales de mitigación sean menores al precio de mercado de estos, podrán vender el excedente; mientras que aquellos que no posean suficientes y tengan costos marginales de mitigación mayores a el precio del permiso buscarán comprar los necesarios para no incumplir la exigencia de respaldo de sus emisiones (Ji et al., 2017).

Dentro de las estrategias de fijación de precio al carbono antes mencionadas, Colombia, en su más reciente reforma tributaria (mediante la Ley 1819 de 2016), decretó un impuesto que recae sobre el contenido de carbono de todos los combustibles fósiles (Rona, 2019). De manera paralela, se estableció en el Decreto 926 de 2017 el mecanismo para la no causación de dicho impuesto, permitiendo a los agentes gravados respaldar sus emisiones

de GEI mediante la adquisición de reducciones o remociones de GEI verificadas, provenientes de proyectos de mitigación desarrollados ante estándares reconocidos de carbono.

El impuesto al carbono establece un precio a la externalidad generada (emisión de GEI), pero no le otorga a la autoridad competente tener control sobre la reducción de las emisiones, debido a que el mercado es el que determina el volumen de GEI a reducir (Sousa et al., 2018). Por esta razón, los responsables de las políticas en Colombia han manifestado su interés en la creación de un SCE y han solicitado el desarrollo de una hoja de ruta para su evaluación y diseño. En consecuencia, en el Título IV, Capítulo I de la Ley 1931 de 2018, el gobierno nacional presenta el Programa Nacional de Cupos Transables de Emisión (PNCTE), como uno de los instrumentos económicos y financieros para la gestión del cambio climático.

Si bien los elementos de diseño del PNCTE se encuentran definidos en la Ley 1931 de 2018 y los fundamentos teóricos de los SCE se encuentran ampliamente documentados, la atención de los responsables de las políticas debería centrarse en evaluar los efectos¹ del mecanismo antes de su implementación. Este enfoque conlleva la necesidad de examinar exhaustivamente los detalles que pueden estar ocultos en una visión general, pero que requieren un gran cuidado durante la implementación de un SCE (Andrew Muller & Mestelman, 1998).

A la hora de evaluar los efectos de la implementación de un SCE, es posible hacer predicciones acerca del comportamiento futuro de las variables por medio de modelos teóricos basados en supuestos económicos. Sin embargo, los modelos económicos suelen requerir suposiciones lo suficientemente sólidas para obtener resultados inequívocos, los cuales pueden ser ajenos a entornos de aplicación más complejos (Adrew Muller & Mesterlma, 2016). Con el fin de complementar los resultados obtenidos de modelaciones teóricas, los experimentos económicos permiten contrastar de forma tangible algunos

¹ Entre ellos, la volatilidad de los precios de los permisos, retrasos en la inversión en tecnologías de reducción de emisiones de GEI, incrementos en los costos a lo largo del tiempo (Zhao, 2003), ineficiencia en la asignación de las responsabilidades individuales para la mitigación, incumplimiento en las obligaciones de los actores regulados y baja reducción en las emisiones agregadas (Stranlund et al., 2014b).

postulados teóricos de la ciencia económica (Tlapanco, 2016). Siendo entonces los experimentos económicos, simulaciones en la que un conjunto de personas se enfrenta a la toma de una serie de decisiones con contenido económico en ambientes controlados (Willer & Walker, 2007).

Los experimentos económicos han sido ampliamente utilizados como 'túnel de viento', a semejanza de las pruebas de laboratorio empleadas para el diseño de aviones y como experiencia preliminar para el diseño de mercados alternativos (Aldana, 2003) y en particular para la evaluación de SCE en diferentes aspectos (Schaeffer & Sonnemans, 2000) (Stranlund et al., 2014a) (Perkis et al., 2016). En este sentido, el aspecto más importante del experimento económico desde el punto de vista aplicativo es la posibilidad que ofrece de establecer formas de razonamiento proyectivo, en tanto no se limita al estudio de lo que ya existe, sino que permite anticipar nuevos mecanismos, políticas y estructuras (Warglien, 2008)

El desarrollo de estudios que permitan probar el diseño del PNCTE es de especial importancia para Colombia en el logro de sus objetivos trazados para la reducción de emisiones, ya que los resultados de aquellos permitirían generar recomendaciones de diseño con el fin de mitigar los posibles efectos sobre la eficiencia del mercado. Por tal razón, este trabajo tiene como objetivo principal analizar el efecto de los elementos de diseño del PNCTE, como el límite de emisiones, la probabilidad de monitoreo y el volumen de compensaciones permitidas sobre el precio de los permisos y las emisiones agregadas. Para ello, se plantean como objetivos específicos: i) caracterizar el PNCTE; ii) desarrollar un modelo teórico para derivar hipótesis y iii) plantear un diseño experimental que busque testear las hipótesis teóricas previamente derivadas.

Ahora bien, en relación con el modelo económico planteado, este analiza la interacción entre un regulador y dos conjuntos de empresas, en el marco de un SCE cuya asignación inicial de permisos es diferente para cada conjunto (gratuita basada en emisiones históricas *-grandfathering-*, y gratuita basada en la producción). Adicionalmente, el regulador otorga una cantidad de permisos a proyectos de compensación voluntaria. En el modelo, las empresas deben determinar el nivel de emisiones y la cantidad de permisos que adquieren en presencia de cumplimiento imperfecto.

Con respecto a la estructura del documento, este presenta en el primer capítulo una revisión de la literatura existente sobre los SCE y las diferentes investigaciones desarrolladas que evalúan el diseño previo a su implementación. En el segundo, se caracterizan los diferentes elementos del PNCET y se identifican los principales aspectos a ser considerados en el modelo. En el tercero, se desarrolla un modelo teórico a partir de las características del PNCTE para derivar las hipótesis. En el cuarto, se presenta el diseño del experimento propuesto para testear las hipótesis. Finalmente, el quinto capítulo ofrece una discusión sobre las implicaciones políticas de los resultados y algunas recomendaciones para la implementación del experimento

1. Marco teórico y estado del arte

1.1 Sistemas de Comercio de Emisiones: Teoría y práctica

Según (Azqueta, 2002), las externalidades aparecen cuando el comportamiento de un agente cualquiera (consumidor o empresa) afecta el bienestar de otro (su función de producción o de utilidad), sin que este último haya elegido dicha modificación ni exista un precio o un valor monetario que lo compense. En presencia de externalidades, el nivel óptimo de una actividad, desde el punto de vista social, difiere del nivel óptimo desde el punto de vista privado. Es por ello por lo que, de no internalizarse los efectos externos, el nivel óptimo de emisiones de GEI será socialmente inferior al nivel observado.

En concreto, al abordar las medidas para internalizar los efectos externos, Pigou (1952) justifica la intervención del Estado como un mecanismo para desincentivar o incentivar la actividad generadora de la externalidad, por medio de impuestos, cuando se trate de una externalidad negativa, o de subsidios, cuando la externalidad sea positiva. Por su parte, Coase (1960) sostiene que la intervención estatal no siempre es necesaria. Ante la presencia de determinadas externalidades, según el autor, siempre es posible la consecución de una externalidad óptima y de un máximo nivel de bienestar social mediante la negociación, siempre y cuando los derechos de propiedad de las distintas partes estén bien asignados y los costos de transacción sean bajos o nulos.

La determinación de la forma en que se deben distribuir los derechos de propiedad se hace necesario cuando, en presencia de externalidades negativas, el derecho de un agente a producir o consumir se enfrenta al derecho de otro agente a no verse afectado por las externalidades (Vela Ortiz, 2005). Por tal razón, Coase (1960) considera que tanto el valor obtenido como el valor que se deja de percibir en cada caso, debe ser conocido primero para luego elegirse la distribución de derechos que maximice el valor de la producción. Es

a partir del planteamiento anterior que Coase formula su teorema: dada una dotación inicial de derechos y en ausencia de costos de transacción, las dos partes implicadas resolverán el problema planteado por la externalidad mediante la negociación, no siendo necesario, por tanto, la intervención del Estado a través de instrumentos pigouvianos. Dicho teorema constituye la base sobre la que se asientan los SCE, ya que, con la limitación de las emisiones de GEI, el establecimiento de determinados derechos de emisión y la creación de un mercado para su negociación, se fomenta la valoración de la externalidad negativa que suponen dichas emisiones y su internalización, al tener que añadir las empresas emisoras a sus costos de producción aquellos relacionados con la emisión de GEI (Perman et al., 2006).

En la práctica, en un SCE, el gobierno impone un límite máximo de emisiones totales para uno o más sectores de la economía. Una vez fijado el tope, el regulador asigna permisos gratuitos a las compañías en el denominado “Mercado primario” (con base en las emisiones históricas o en estándares de desempeño) o por medio de subastas (Gilbertson & Reyes, 2006). Los participantes regulados están obligados a entregar un derecho de emisión por cada unidad de emisiones de la que sean responsables al final de cada periodo (por ejemplo, de un año), lo cual puede hacerse reduciendo sus propias emisiones o comprando permisos adicionales en el mercado secundario a aquellas compañías que redujeron sus emisiones y tienen permisos sobrantes (Partnership for Market Readiness & International Carbon Action Partnership, 2016). No contar con permisos suficientes que respalden las emisiones de una compañía al final de un periodo representa un incumplimiento que implica sanciones por parte del regulador (Ríos et al., 2013)

Además de los elementos mencionados en la descripción del funcionamiento de un SCE, otros aspectos de su diseño pueden incluir la definición de mecanismos para la previsibilidad de los precios, la contención de costos y el funcionamiento eficaz del mercado. Las distintas jurisdicciones pueden optar por vincular sus SCE directa o indirectamente al hacer el reconocimiento mutuo de los derechos de emisión u otras unidades, tales como los créditos de compensación. Asimismo, deben considerar el establecimiento de sistemas de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV) para garantizar la integridad ambiental del mecanismo integrada del mecanismo. La Tabla 1-1 presenta una descripción de los elementos a ser considerados en el diseño de un SCE.

Tabla 1-1: Elementos de diseño de un SCE

Elemento de diseño	Descripción
Ámbito de aplicación	Hace referencia a los sectores y GEI regulados, así como a los puntos de regulación y umbrales de emisión.
Límite de emisiones	Es el límite en el número de derechos de emisión expedidos durante el período de cumplimiento, limitando a su vez la cantidad total de emisiones producidas por las entidades reguladas. Este límite debe disminuirse con el tiempo y estar alineado con la meta de reducción de emisiones de la jurisdicción respectiva, lo cual enviaría una señal de mercado a largo plazo para permitir a las compañías planear sus inversiones.
Asignación de permisos	<p>Se refiere a los mecanismos mediante los cuales el regulador asigna los permisos de emisión en el mercado primario. Dentro de estos se encuentran:</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Subasta</u>: Mecanismo de mercado • <u>Grandparenting</u>: Asignación gratuita basada en las emisiones históricas de las entidades individuales que constituyen agentes regulados. • <u>Benchmarking fijo por sector</u>: El nivel de apoyo es determinado en referencia a un valor estándar para la intensidad de emisiones de un producto o sector de referencia, y no con base en la intensidad de las emisiones actuales o históricas de cada empresa. • <u>Asignación basada en la producción</u>: En primer lugar, el apoyo se asigna de acuerdo con una intensidad de emisiones predeterminada. En segundo lugar, cuando las empresas aumentan o disminuyen su producción, el monto del apoyo que reciben sube o baja proporcionalmente, según el nivel de intensidad predefinido.
Uso de compensaciones	Un SCE puede permitir a las entidades reguladas usar compensaciones de créditos derivados de la reducción de emisiones en fuentes y sectores no regulados para cumplir con sus obligaciones. En este elemento, se deben definir los sectores, gases y actividades elegibles; los límites de uso; y el establecimiento de un sistema de MRV.
Flexibilidad temporal	Hace referencia a la posibilidad de que los participantes acumulen permisos para ser usados en períodos posteriores (<i>banking</i>) o soliciten en préstamo derechos de emisión de un futuro período de cumplimiento (<i>borrowing</i>).
Previsibilidad de precios y mecanismos de contención de costos	El diseño de un SCE puede buscar reducir la volatilidad de los precios de los permisos, incluyendo ajustes en la cantidad de permisos disponibles, reservando permisos para realizar operaciones de mercado o estableciendo restricciones sobre el precio y al grado de discrecionalidad otorgado a los tomadores de decisiones de políticas.

Elemento de diseño	Descripción
Cumplimiento y vigilancia	Se deben considerar enfoques rigurosos del cumplimiento de de las obligaciones de los agentes regulados, así como de vigilancia del SCE por parte del ente regulador. Para esto, se deben establecer sistemas eficaces de MRV de las emisiones de GEI, lo cual facilitará la evaluación posterior del cumplimiento.
Vinculación con otros mecanismos	La vinculación se produce cuando un SCE permite que los actores regulados utilicen derechos de emisión expedidos ante el sistema de otra jurisdicción, como moneda válida para el cumplimiento. La vinculación amplía la flexibilidad respecto al lugar en el que pueden ocurrir las reducciones de emisiones, permitiendo aprovechar una gama más amplia de oportunidades de reducción.

Fuente: (Partnership for Market Readiness & International Carbon Action Partnership, 2016)

1.2 Experimentos económicos

La economía experimental surge como un método formal para contrastar, de forma tangible, algunos postulados teóricos de la ciencia económica y como un medio para recopilar información que permita probar hipótesis y teorías (Tlapanco, 2016). En pocas palabras, un experimento económico es una simulación en la que un conjunto de personas se enfrenta a la toma de una serie de decisiones con contenido económico en ambientes controlados (Willer & Walker, 2007). Estos constan de tres elementos: i) un objetivo perseguido por los participantes, en función del cual toman decisiones y revelan sus preferencias; ii) un sistema que describe el ambiente de toma de decisiones y las reglas de comportamiento, y al tiempo permite abstraer elementos de la realidad para establecer interrelaciones entre variables, de acuerdo con lo que pasaría en la cotidianidad; y iii) el comportamiento, basado en las decisiones tomadas o conductas reveladas por los participantes de un experimento (Friedman & Cassar, 2004) (Castañeda et al, 2008; Friedman y Sunder, 1994; Thaler y Sustein, 2008; Cooper, 2019).

Los experimentos económicos hacen uso de incentivos, partiendo de la noción de “valoración inducida” (Friedman y Cassar, 2004b; Smith, 1976; Kawagoe, 2019). Esta reconoce que el uso de un medio de compensación permite inducir un comportamiento determinado en los agentes, evitando que se generen distorsiones en el propósito del experimento debido a sus intereses particulares (Smith, 1976). Las condiciones suficientes para inducir el comportamiento de un agente, por lo tanto, hacen referencia a que un medio

de recompensa apropiado es siempre mejor (monotonicidad); la recompensa depende de las acciones de las acciones de los sujetos que la reciben, así como de los demás (prominencia); y los cambios en la utilidad de los sujetos proceden del medio de recompensa y el resto de las influencias es despreciable (dominancia). Estas tres condiciones se satisfacen cuando se realizan pagos en moneda local mayores al costo de oportunidad de los sujetos (Smith, 1982).

Finalmente, cabe mencionar que, a pesar del aporte de los experimentos a la ciencia económica, existen objeciones asociadas a su validez externa, fundamentadas principalmente en el supuesto de que los resultados no son aplicables a la vida real (Samuelson, 2005). No obstante, la economía experimental se basa en el principio de la inducción: las regularidades comportamentales persistirán en nuevas situaciones, siempre que las condiciones fundamentales de la nueva situación sean similares a las de la situación anterior (Smith, 1982). De este modo, si se demuestra que el ambiente del laboratorio difiere de manera significativa del mundo real, puede realizarse un nuevo experimento para estudiar el efecto de dichas diferencias en el comportamiento humano (Castañeda et al, 2008)

1.3 Teorías sobre el comportamiento de los sujetos

La economía experimental se fundamenta en dos grandes corrientes del pensamiento. La primera supone que los individuos se guían haciendo uso de la elección racional (Arrow, 1990; Lucas, 1981; Albin y Foley, 1998) y la segunda sostiene que los seres humanos tienen una racionalidad limitada (Simon, 1979; Thaler y Sustein, 2008). La elección racional, según la cual los decisores maximizan su utilidad esperada, asume un conocimiento perfecto de todas las políticas disponibles, un conocimiento pleno de los resultados posibles generados como consecuencia de la aplicación de todas las políticas y certidumbre en los decisores acerca de los resultados presentes y futuros de tales consecuencias. En este contexto, el decisor tiene la habilidad de comparar las políticas, sin importar cuán diversas y heterogéneas sean.

Por su parte, la teoría de la racionalidad limitada asume que, más que en el homo economicus, el análisis debería centrarse en el homo sapiens, el ser humano que al elegir corre el riesgo de no estar maximizando su bienestar, puesto que existe una serie de fallos

que lo conduciría a ello. En general, el homo sapiens busca satisfacerse con la mejor opción entre un conjunto de alternativas, pero en medio de este proceso de decisión simplifica la sistematización de probabilidades a juicios de valor (Tversky y Kahneman, 1974). Como respuesta a estos postulados, los defensores de la corriente de la racionalidad limitada buscan métodos que transformen los problemas de decisión en problemas tratables.

Por su parte, recientes trabajos en el campo de la economía experimental han puesto a la teoría de la racionalidad limitada en el centro de sus estudios, convirtiendo al control de los heurísticos y los sesgos cognitivos en una regla. Sobresalen entre estos el heurístico del anclaje, el heurístico de la disponibilidad y el heurístico de la representatividad (Thaler y Sustein, 2008; Mullainathan y Thaler, 2005; Kahneman, 2011). En primer lugar, el heurístico del anclaje es la disposición a calcular las decisiones según un punto de referencia previamente establecido, asumido o impuesto. Luego, el heurístico de la disponibilidad se presenta cuando las personas fabrican juicios sobre las probabilidades de que suceda un cierto evento, basadas en qué tan fácil resulta traer un ejemplo, recuerdo o experiencia a la mente. Por último, el heurístico de la representatividad ocurre principalmente cuando se juzga la probabilidad de que un evento o un objeto A pertenezca a un determinado grupo B, con base en el grado en que el evento u objeto A se asemeja al grupo B.

1.4 El rol de los experimentos económicos en el diseño de SCE

La economía experimental ha sido aplicada a diferentes situaciones económicas, entre ellas la toma de decisiones en mercados y contextos microeconómicos. En estos experimentos, por ejemplo, el objetivo podría ser la maximización de beneficios o ganancias, el sistema podría ser un tipo particular de mercado donde existe un límite para las transacciones entre demandantes y oferentes, y el comportamiento se basaría en las decisiones de compra y venta. En ellos, el experimentador controla el objetivo y el sistema, y observa el comportamiento. En numerosos experimentos de mercado llevados a cabo hasta el momento, cuyo sustento ha sido el teorema de la telaraña (Ezekiel, 1938; Holt y Villamil, 1986; Sonnemans et al, 2004), los investigadores se han preguntado acerca de la forma en que se establece el equilibrio y se forman precios. En consecuencia, sus

resultados han mostrado que el comportamiento de los sujetos conduce a puntos de equilibrio o a fluctuaciones aleatorias alrededor de los mercados, dándole un espaldarazo a la teoría de la racionalidad limitada (Castañeda et al, 2008).

De forma específica, la aplicación del método experimental a mercados ambientales, y especialmente en mercados de permisos transables, se ha utilizado para probar el diseño de estos. Cason, Gangadharan, & Duke, (2003) llevaron a cabo un experimento de laboratorio para examinar si una empresa puede ejercer poder de mercado por medio de la doble institución de subastas en un SCE propuesto para la reducción de nitrógeno en la cuenca de Port Phillip en Victoria, Australia. El experimento varió entre los tratamientos de la asignación inicial de cupos y la información que los sujetos tenían sobre el número y los costos de reducción de sus competidores, y los resultados demostraron que los precios y las ganancias del vendedor son más altas y la eficiencia es más baja en las sesiones de monopolio que en las de duopolio.

Otros estudios, como el de Murphy y Stranlund (2007), utilizaron experimentos de laboratorio para probar las predicciones teóricas sobre el comportamiento de cumplimiento en programas competitivos de comercio de emisiones. Estos probaron las hipótesis de que tanto las violaciones cometidas por empresas competitivas de riesgo neutral como la eficacia marginal del aumento del cumplimiento en las empresas, son independientes de las diferencias en los beneficios que obtienen de las emisiones (costes de reducción) y de sus asignaciones de permisos iniciales. En consecuencia, se demostró que la rentabilidad del cumplimiento de la normativa no mejoraría si el rigor del cumplimiento se basara en la heterogeneidad de los costos de reducción de las empresas, y se concluyó que los reguladores no tienen justificaciones conceptuales para basar sus esfuerzos de aplicación normativa en función de las características de las empresas.

Burtraw et al. (2009), por su parte, desarrolló experimentos de laboratorio para probar tres modelos de subasta: de oferta sellada, de precio uniforme y discriminatorio, y de reloj ascendente. Probó, además, la capacidad de los agentes para conspirar tácita o explícitamente con el fin de maximizar los beneficios, encontrando que las subastas de precios discriminatorias y uniformes producen mayores ingresos que las subastas de reloj, con y sin comunicación explícita. Otros autores como Cong & Wei (2012) desarrollaron el mismo ejercicio, pero aplicado en un SCE cuyos agentes regulados eran centrales

eléctricas de carbón y centrales de gas; adicionalmente, examinaron el impacto del *banking* y el precio de penalización en el comportamiento de los licitadores en diferentes formatos de subasta.

Por otro lado, la flexibilidad temporal y la contención de precios son elementos de los SCE de gran interés para los investigadores. Stranlund, Murphy, & Spraggon (2011) encontraron que las altas sanciones por el incumplimiento de los compromisos de los agentes en un SCE que permite *banking* tienen poco valor disuasorio en los mercados de emisiones dinámicas, y que el principal desafío es motivar a los agentes a presentar informes reales de sus emisiones. Por su parte, Stranlund et al. (2014) analiza el efecto de la combinación del *banking* con mecanismos de control de precios sobre la contención del precio de los cupos de emisión, encontrando que, mientras ambos instrumentos reducen la volatilidad de los precios entre períodos y la dispersión de precios dentro de un período, la combinación genera precios iniciales más bajos y menos volátiles, y mayor volatilidad de las emisiones entre períodos.

Con respecto al comportamiento de los agentes en la toma de decisiones de reducción de emisiones de GEI, Koten (2014) demostró que estos hacen elecciones altamente ineficientes, lo cual permite que los métodos de asignación sesguen a los sujetos a demasiada o muy poca reducción de GEI. Por otro lado, autores como Holt & Shobe (2016), interesados en identificar el comportamiento de un SCE con choques estructurales de demanda, identificaron que las medidas de resultados del mercado, como el excedente social y la variabilidad de los precios, se mejoran mediante el uso de un collar de precios.

Finalmente, los estudios aplicados han brindado recomendaciones importantes para la implementación de SCE como el de California. En este caso, autores como Bodsky, Donato, James, & Porter (2012) presentaron una serie de experimentos para examinar las propiedades del mecanismo de asignación de cupos; al igual que Cason (2010), quien también utiliza los experimentos de laboratorios para abordar elementos como las reglas de las subastas, las fechas de vencimiento de permisos, el *banking*, las reglas de responsabilidad y el cumplimiento normativo

2. Caracterización del PNCTE

Este capítulo presenta la caracterización del PNCTE y los elementos de diseño a considerar en el planteamiento del modelo teórico del cual se derivarán las hipótesis que serán testeadas en el experimento propuesto. La caracterización tomó como base las disposiciones consignadas en la Ley de Cambio Climático (Ley 1931 del 2018) sobre el programa y se complementa con los resultados obtenidos de estudios desarrollados por Partnership for Market Readiness del Banco Mundial, el MADS y el DNP, considerando que no existe un marco regulatorio que defina los detalles del funcionamiento del mecanismo.

2.1 Variables de diseño

2.1.1 Ámbito de aplicación

El alcance propuesto del PNCTE es amplio, en tanto espera cubrir el 100% de las emisiones reportadas en el inventario nacional de GEI y, por ende, incluir los seis gases considerados en el Protocolo de Kioto². La forma en la que el PNCTE pretende abarcar la totalidad de las emisiones es articulando el programa con otros instrumentos implementados para la gestión del cambio climático, entre ellos los programas de deforestación evitada y las iniciativas tempranas de proyectos de reducción de emisiones.

El establecimiento de un ámbito de aplicación ambicioso como el propuesto para Colombia tiene ventajas. Algunas de estas están relacionadas con el aumento de la certeza sobre el cumplimiento del objetivo de reducción de emisiones del país, la disminución en los costos de reducción de emisiones, la baja posibilidad de que algunos actores obtengan poder de

² Dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCs), y hexafluoruro de azufre (SF₆).

mercado y la reducción de fugas internas (Munnings et al., 2016). Sin embargo, debido a que numerosos emisores de los sectores regulados por el PNCTE se encuentran en pequeñas escalas, como el agrícola y de procesos industriales, la gestión y operación del mecanismo podría generar altos costos al no considerarse los umbrales suficientes que excluyan dichas pequeños emisores. Adicionalmente, la complejidad del monitoreo de las emisiones resultante de la heterogeneidad de los actores dentro de cada sector constituye otra desventaja del alcance propuesto para el mecanismo.

La Tabla 2-1 resume los principales aspectos definidos en el ámbito de aplicación para el PNCTE. En la primera columna se presentan los sectores económicos regulados; en la segunda, las actividades o combustibles regulados dentro de cada sector; en la cuarta se define si existen umbrales³ para excluir a los pequeños emisores; la quinta muestra el momento de inclusión del sector al mecanismo; y en la última se detalla el punto de regulación desde donde se generan las emisiones (*upstream*) o desde donde se liberarán emisiones de GEI a la atmósfera en el futuro (*downstream*).

Tabla 2-1 Ambito de aplicación del PNTCE

Sector	Cobertura	Umbral	Momento de inclusión	Agentes regulados
Energía	Petróleo, combustibles líquidos de aceite y gas natural	No	Inmediato	<i>upstream</i> Productores, Importadores
	Carbón	Si	Inmediato	<i>upstream</i> Grandes minas, grandes consumidores de carbón
	Biocombustibles	No	Inmediato	<i>upstream</i> : refinarias
	Biomasa	No	Inmediato	<i>downstream</i> : Grandes consumidores
Procesos industriales	Procesos industriales	S	Inmediato	<i>downstream</i> : Empresas
	Carbón (Emisiones fugitivas),	Si	Inmediato	<i>Aguas abajo</i> : Grandes minas
	Producción de petróleo (Emisiones fugitivas)	Si	Inmediato	<i>Aguas abajo</i> : Grandes sitios de extracción y refinarias
Residuos	Residuos solidos	Si	Inmediato	Rellenos sanitarios

³ Límites a la participación del SCE. Estos límites establecen que las entidades por debajo de cierto "tamaño" (definidas con base en sus emisiones de GEI por año, su nivel de consumo de energía, producción, importaciones y capacidad) no están sujetas a los requisitos del SCE.

Sector	Cobertura	Umbral	Momento de inclusión	Agentes regulados
Agricultura	Ganadería	No	Mediano plazo	Plantas de sacrificio
	Ganadería - programa jurisdiccional	No	Mediano plazo	Jurisdicción
	Ganadería – Programas voluntarios de compensación	No	Mediano plazo Mediano plazo	Propietarios
Forestal	Deforestación	No	Mediano plazo	Grandes proyectos de desarrollo de tierras que deforestan
	Deforestación evitada	No	Mediano plazo	Jurisdicción
	Reforestación – Programas jurisdiccionales	No	Mediano plazo	Jurisdicción
	Reforestación - Programas voluntarios	No	Mediano plazo	Propietarios

Fuente: (Kerr et al., 2019)

Se puede identificar que El PNCTE contiene todos los usos de combustibles fósiles y biocombustibles, incluidos los sectores de transporte y electricidad, ya que estos representaron el 35% de todas las emisiones de GEI en 2014 (IDEAM, PNUD, MADS y DNP, 2018). Los procesos industriales también hacen parte del PNCTE, representando el 4% de las emisiones en el inventario nacional de GEI de 2010 (IDEAM et. Al. 2015b). No obstante, las emisiones industriales han aumentado durante la última década y se considera que dicha tendencia se mantendrá en el tiempo, lo cual hace estratégica su inclusión. El punto de regulación para este sector será *downstream*, ya que este permite monitorear las emisiones, y se aplicará un umbral de capacidad a las instalaciones.

Con respecto a las emisiones biológicas provenientes de la agricultura (metano y óxido nitroso), estas no se han incluido comúnmente en los ETS en operación debido a algunos desafíos que conllevan, particularmente relacionados con su monitoreo (ICAP, 2020). No obstante, tomando en cuenta el importante papel de la agricultura en el perfil de las emisiones de Colombia y, por lo tanto, en el cumplimiento de los objetivos climáticos nacionales, se ha propuesto incluir el sector agrícola en el PNCTE.

De igual manera, el sector forestal no ha sido incluido directamente en los sistemas de comercio de emisiones existentes porque su estructura administrativa puede ser altamente compleja. Nueva Zelanda tiene el único ETS que ha incluido los bosques como un sector

regulado (ICAP, 2020), mientras que Colombia ha considerado el sector forestal principalmente como fuente potencial de compensaciones. La inclusión de este sector en el PNCTE se basa en la articulación con políticas existentes relacionadas con los bosques en Colombia, como los programas de deforestación evitada a nivel jurisdiccional o privado.

Tanto para el sector agrícola como para el forestal, se proponen como puntos de regulación a las jurisdicciones (departamentos) y a los propietarios privados. A estos actores les corresponde la implementación de las actividades de reducción de emisiones para la obtención de compensaciones, logrando demostrar que la deforestación es menor que la línea base de acreditación (para el caso de la deforestación evitada) o que se produce la captura de carbono por el crecimiento de los árboles en proyectos de reforestación (Kerr et al., 2019)

2.1.2 Límite de emisiones

El límite de emisiones del PNCTE son las toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂-eq) como límite absoluto. Con la definición de un límite absoluto, el número de unidades disponibles a ser asignadas es completamente predecible y se posibilita, además, un entendimiento internacional, ya que la gran mayoría de los ETS consideran un límite con dichas características (Pang & Duan, 2016). El límite propuesto tiene un enfoque descendente y será establecido por adelantado para proporcionar a los agentes información sobre la cantidad máxima de permisos disponibles, permitiendo la acumulación de estos (banking) dada las asignaciones adicionales de los primeros años.

Por otro lado, con el objetivo de proporcionar información a largo plazo mientras se aporta información sólida sobre el suministro de permisos a corto plazo, se establecerá un límite móvil de cinco años (o incluso superior), en combinación con una trayectoria indicativa a mayor largo plazo. Esto implicaría fijar el límite durante cinco años, anunciando anualmente el quinto año. Por ejemplo, si el sistema se anuncia e implementa en 2020, el número de unidades para cada año se anunciaría de 2020 a 2024 y, a su vez, el número de unidades para 2025 se anunciaría en 2021.

En relación con los valores del límite de emisiones, estos aún no se encuentran definidos. Sin embargo, Sousa et al., (2018) propone un límite para el PNCTE que sea equivalente a

la trayectoria que se debería seguir para lograr las metas de reducción de emisiones planteadas por Colombia en sus NDC. Teniendo en cuenta que esta trayectoria debe estar ligada al ámbito de aplicación del mecanismo, todas las iniciativas de reducción de emisiones que se desarrollen en el marco de los programas existentes serán gestionadas dentro del límite del programa.

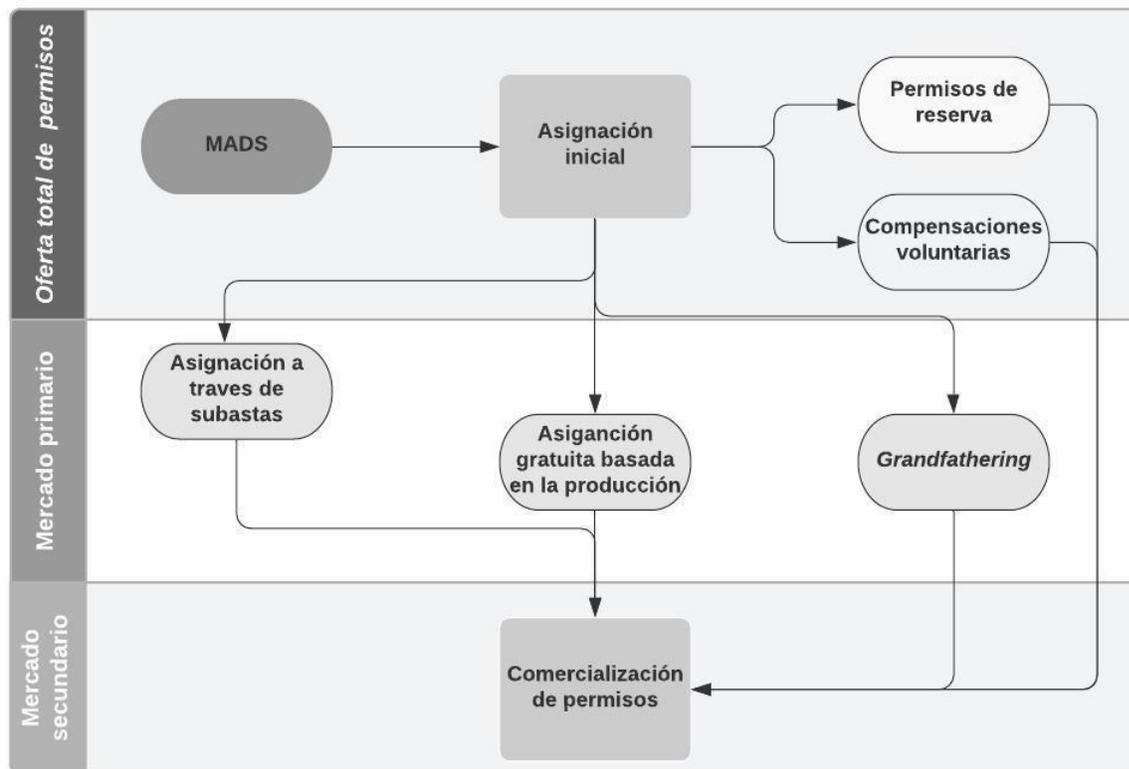
2.1.3 Asignación de derechos de emisión y uso de compensaciones

Los cupos de emisiones son un activo valioso y su distribución tiene implicaciones sobre las decisiones tomadas por los actores regulados con respecto a los volúmenes de producción, la ubicación de nuevas inversiones y el porcentaje del precio del carbono que es transmitido a los consumidores (Burtraw et al., 2005). Con respecto a los enfoques para la asignación de cupos de emisión, el gobierno nacional podría venderlos mediante una subasta, o bien otorgarlos de forma gratuita, existiendo tres métodos principales dentro de esta última categoría (*grandfathering*, *benchmarking* fijo por sector con actualización infrecuente y asignación basada en la producción).

La Figura 2-1 presenta el proceso de asignación de cupos propuesto entre los diferentes agentes regulados para el PNCTE. En primera instancia, el MADS reservará una cantidad de permisos, los cuales podrá utilizar en el mercado secundario para realizar operaciones de mercado (compra o venta) como mecanismo de control de precios. Las compensaciones voluntarias que cumplan con los requisitos exigidos por el MADS⁴ serán las primeras en obtener permisos, mientras las restantes se ofrecerán en el mercado primario de manera gratuita y por medio de subasta. Al final, los proyectos de mitigación voluntaria que reciban permisos, junto con el MADS y los agentes regulados que los hayan obtenido en una subasta o gratuitamente, pueden ofrecer sus cupos en el mercado secundario y otros agentes regulados pueden acudir a dicho mercado para comprarlos.

⁴ i) El proyecto debe estar incluido en el Registro Nacional de Reducción de Emisiones de GEI; ii) Estas toneladas de CO₂-eq no deben haber sido comprometidas en negociaciones bilaterales internacionales, y no deben comprometerse a futuro; y iii) Estas toneladas de CO₂-eq se excluirán del mercado voluntario.

Figura 2-1: Proceso de asignación de permisos



Fuente: Elaboración propia, con base en (Kerr et al., 2019)

Con respecto a la asignación en el mercado primario, se proponen tres enfoques para la asignación:

- **Subasta:** La asignación mediante una subasta se propone, en primera instancia, porque el gobierno podrá usar los ingresos recaudados para perseguir objetivos como el apoyo a otras políticas climáticas⁵. Otra ventaja que ofrece este mecanismo es que facilita la determinación de precios, especialmente en los casos en que la liquidez es limitada por la alta cantidad de permisos acumulados por los agentes que reciben asignaciones gratuitas. Adicionalmente, la subasta resulta en una asignación eficiente de los permisos de emisión y en la determinación de un precio que refleja el valor real de estos en el mercado, ya que las entidades pagan

⁵ El gobierno podría, por ejemplo, invertir en infraestructura con bajas emisiones, incentivar la industria a invertir en energía eficiente y tecnología de energía limpia o reducir las emisiones en sectores no regulados.

conjuntamente el costo total de los derechos de emisión, lo cual debe resultar en una reducción costo-efectiva de las emisiones (Kerr et al., 2019).

- *Grandfathering*: Las empresas recibirán apoyo de acuerdo con sus emisiones históricas y la cantidad recibida se mantendrá, independientemente de las decisiones futuras sobre la producción o reducción de la intensidad de carbono. Este mecanismo de asignación será aplicable para aquellos actores regulados upstream que cuenten con activos varados como una medida de compensación. Los activos varados hacen referencia a las inversiones o los compromisos contractuales a largo plazo realizados durante el régimen regulador anterior que las empresas nunca hubieran llevado a cabo si hubiesen anticipado la futura introducción del SCE (Castro-Rodriguez & Arocena, 2000).
- Asignación gratuita basada en la producción: Los sectores intensivos en emisiones y expuestos al comercio internacional (en el caso del PNTC, corresponde al sector industrial, cuyos bienes son destinados a la exportación) son normalmente los más susceptibles a ser afectados negativamente por la inclusión de un precio al carbono, quedando en desventaja competitiva en respuesta al aumento de los costos de producción (Dobson & Winter, 2018). Por tal razón, el PNTCE espera hacer frente a esta situación mediante la asignación gratuita de cupos basada en la producción, es decir, asignando un factor de emisión (FE) por unidad de producción, el cual disminuirá con el tiempo de una manera predecible.
- Compensaciones voluntarias: El uso de compensaciones es considerado equivalente a los permisos una vez estos cumplan con los requisitos exigidos por la autoridad: i) El proyecto debe estar incluido en el Registro Nacional de Reducción de Emisiones de GEI (RENARE); ii) Estas toneladas de CO₂-eq no deben haber sido comprometidas en negociaciones bilaterales internacionales y no deben comprometerse a futuro; y iii) Estas toneladas de CO₂-eq se excluirán del mercado voluntario.

La inclusión de compensaciones en el PNCTE amplía la cantidad de opciones de reducción en el mercado, ya que presenta nuevos sectores y actividades elegibles

para vender las reducciones de sus emisiones (Kerr et al., 2019). Estas compensaciones podrían tener un costo menor que los permisos de reducción de emisiones, por lo cual podrían ayudar a reducir los costos de cumplimiento, facilitando la fijación de un mayor objetivo de mitigación (Fell et al., 2011). No obstante, la aceptación de compensaciones en un SCE también puede tener desventajas, ya que pese a proporcionar una mayor flexibilidad para el cumplimiento, podría también contribuir a la disminución de la inversión en bajas emisiones de carbono en los sectores regulados, al menos durante algún tiempo (Naegele, 2018).

En resumen, teniendo en cuenta el ámbito de aplicación y el límite de emisiones, la forma en que el PNCTE espera realizar la asignación de permisos entre los diferentes actores regulados se encuentra articulada con estos elementos de diseño. Al considerarse un volumen de permisos para ser entregado a los proyectos de reducción de emisiones, se cubrirían sectores como el de AFOLU dentro del límite propuesto.

2.1.4 Flexibilidad temporal y control de precios

La flexibilidad temporal puede aumentar la rentabilidad de un ETS. Los períodos anuales de cumplimiento podrían no ser suficientes para la implementación de medidas de mitigación (Partnership for Market Readiness (PMR) e International Carbon Action Partnership (ICAP), 2016), por lo cual pueden ser deseables algunas medidas de control de precios en un ETS para garantizar que el precio del carbono no baje ni suba drásticamente.

- *Banking*

El *banking* puede entenderse como una forma especulativa y prospectiva de almacenamiento de permisos que sirve como mecanismo de contención de precios (Kuusela & Lintunen, 2020). En este sentido, el PNCTE contempla la posibilidad de proporcionar a las entidades reguladas la posibilidad de decidir en qué momento realizar la reducción de sus emisiones, específicamente al permitir la acumulación de cupos de emisión para su uso en períodos de cumplimiento futuros. Para lograr dicha acumulación, el mecanismo plantea, tal como se indicó en la sección 2.1.2, la asignación de una cantidad

de cupos superior a las emisiones esperadas después del proceso de mitigación, de modo que las empresas puedan acumular los cupos excedentes desde el principio.

- Banda de precios

Con el fin de proporcionar una mayor previsibilidad sobre los precios de los derechos de emisión, el PNCTE sugiere la implementación de un corredor de precios, lo que significa que estos deben ubicarse dentro de un cierto rango, con un tipo de techo y piso que restrinja las fluctuaciones de precios por encima y por debajo de los límites especificados. El enfoque de diseño del PNTCE es híbrido, ya que integra otros instrumentos económicos de política ambiental vigentes en el país, como el impuesto al carbono y las tasas retributivas. Se espera que estos instrumentos formen una banda de precios, actuando como límite mínimo (impuesto al carbono) y máximo (tasa retributiva).

- Contención de costos con una reserva de derechos de emisión

Un método alternativo propuesto para evitar precios excesivamente altos en el PNCTE consiste en el establecimiento de una oferta adicional limitada de derechos de emisión, los cuales entrarían en el mercado de forma progresiva, a medida que subieran los precios. Este suministro se podrá crear reservando una cantidad fija de derechos de emisión que siga siendo compatible con el límite. De manera similar, los agentes podrían ser autorizados para vender al gobierno sus derechos de emisión, a un precio mínimo fijo.

2.1.5 Cumplimiento y vigilancia

Se contemplan sanciones por medio de multas a los agentes regulados que incumplan con sus obligaciones, pudiendo aquellas alcanzar hasta dos veces el valor de las emisiones generadas, el cual será medido con base en el precio resultante de la última subasta realizada. Los criterios para la dosificación de las multas serán tomados del artículo 50 de la Ley 1437 de 2011 o de la norma que la sustituya o modifique. La identificación de los actores que incumplan sus obligaciones debe ser el resultado de la aplicación de un proceso de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV) de las emisiones de GEI. Este, que no ha sido diseñado aún para el PNTCE, en línea con lo planteado por Coria & Sterner (2009), representa un cuello de botella debido a la falta de recursos para su implementación.

2.1.6 Enlaces internacionales

El PNCTE podría vincularse a otros mercados de comercio de emisiones en el futuro. La vinculación total con otro ETS no sería inmediata, lo cual permitiría que el sistema colombiano se desarrolle sin el riesgo de volatilidad de los precios o efectos externos sobre el precio de los derechos de emisión. Inicialmente, el SCE podría vincularse internacionalmente, de modo que Colombia podría vender cualquier reducción adicional de emisiones que logre más allá de sus NDC. Incluso si Colombia eligiera no vincularse directamente con otro SCE, un mayor control sobre las emisiones logrado por medio de un SCE probablemente facilitaría la capacidad del país para entregar Resultados de Mitigación Transferidos Internacionalmente (ITMO) y obtener fondos para lograrlos.

2.2 Selección de elementos de variables a analizar

En contraste con la literatura existente y con los SCE en operación, es posible identificar que las principales particularidades del PNCTE radican en el ámbito de aplicación, la definición del límite de emisiones y la inclusión de compensaciones voluntarias dentro del límite. La definición de un ámbito de aplicación que considere el 100% de las emisiones del país, implica la definición de un límite de emisiones alto, el cual, a su vez debe incluir todos los sectores de la economía. Este hecho tiene sentido para Colombia ya que algunos de los principales sectores emisores del país como el sector de AFOLU, tienen un alto potencial de reducción de emisiones que pueden optar por recibir permisos de emisión y participar en el mercado como oferentes netos.

Estas variables serán consideradas para el desarrollo del modelo teórico presentado en el siguiente capítulo. No obstante, con el objetivo de que los resultados del modelo logren capturar más a la realidad del PNTCE, el modelo analizará la interacción entre un regulador y dos conjuntos de empresas, en el marco de un SCE cuya asignación inicial de permisos tomara como base la planteada por el PNCTE ⁶. Adicionalmente, en el modelo, las firmas deben determinar el nivel de emisiones y la cantidad de permisos que adquieren bajo un escenario de cumplimiento imperfecto. Este supuesto se plantea debido a los retos que

⁶ Se excluye del análisis de la asignación a través de subasta debido a que, la ruta de implementación del PNTCE considera en su primera fase únicamente la asignación de permisos de manera gratuita. Adicionalmente el tipo de subasta a ser empleada aún no se encuentra definido (Kerr et al., 2019)

implica establecer un sistema de MRV en un SCE con un ámbito de aplicación y límite de emisiones amplios. Si bien la literatura plantea que una empresa cumplirá con una regulación cuando sus costos de cumplimiento sean más bajos que la penalidad esperada asociada con la violación, la falta de tecnología precisa para el monitoreo, la reticencia a usar sanciones altas y las restricciones presupuestarias podrían generar incentivos para el incumplimiento (Coria & Villegas-Palacio, 2010).

3. Modelo teórico y derivación de hipótesis

En este capítulo se presenta el modelo teórico a partir del cual se derivan las hipótesis que servirán de base para el diseño del experimento económico. El modelo económico planteado busca identificar el efecto del ámbito de aplicación del PNCTE, la definición del límite de emisiones y la inclusión de compensaciones voluntarias dentro del límite de emisiones; sobre el precio de los permisos y las emisiones agregadas. El modelo analiza la interacción entre un regulador y dos conjuntos de empresas, en el marco de un SCE cuya asignación inicial de permisos (mercado primario) es diferente para cada conjunto (gratuita basada en emisiones históricas *-grandfathering-*, y gratuita basada en la producción). Adicionalmente, el regulador otorga una cantidad de permisos a proyectos de compensación voluntaria y las empresas deben determinar el nivel de emisiones y la cantidad de permisos que adquieren en presencia de cumplimiento imperfecto.

3.1 Modelo teórico

El modelo considera una jurisdicción con dos sectores competitivos (b y k) que consisten en un conjunto discreto de firmas $[1, n]$, que se asumen son neutrales al riesgo. Cada firma de cada sector emite una cantidad e_i de CO_{2-eg} . Suponemos que hay una autoridad ambiental que establece un objetivo en términos de reducción de emisiones de GEI e implementa un SCE para alcanzarlo. Una firma regulada por el SCE puede reducir una fracción de sus emisiones y comprar permisos para compensar la fracción restante. Los costos de reducción de emisiones están representados por la función $C(e_i)$ la cual es una función estrictamente convexa y decreciente en las emisiones: $C'(e_i) < 0$; $C''(e_i) > 0$ (Stranlund & Chavez, 2000). Por otro lado, asumiremos que la autoridad emite L permisos de emisión en un período, cuya posesión otorga el derecho legal de emitir una unidad de CO_{2-eg} y los cuales se asignan a cada una de las firmas en el mercado primario de la siguiente manera: una cantidad de permisos $L0^b$ siendo $L0^b = \sum_{i=1}^n l0_i^b$ para las firmas del sector b mediante el enfoque de Grandfathering es decir en función de las emisiones

históricas de la firma y una cantidad $L0^k$ siendo $L0^k = \sum_{i=1}^n l0_i^k$ para las firmas del sector k de manera gratuita basado en el nivel de producción. Adicionalmente, la autoridad otorgará una cantidad de permisos (L^h) a proyectos de compensación voluntaria.

Al final del periodo, las firmas tanto del sector b y k están obligados a entregar un derecho de emisión por cada unidad de emisiones de la que sean responsables lo cual puede hacerse reduciendo sus propias emisiones o comprando permisos adicionales en el mercado secundario a aquellas firmas que redujeron sus emisiones y tienen permisos sobrantes, o a los proyectos de mitigación voluntaria. El número de permisos al final del periodo para la i -ésima firma del sector b esta representado por l_i^b y para el sector k por l_i^k . Por otro lado, el precio de equilibrio de cada permiso en el mercado secundario es representado por p . Se asume que no hay poder de mercado y todas las firmas son tomadores de precio. Una firma que emite e_i debería gastar $p_i * e_i$ en la compra de permisos; sin embargo, en presencia de cumplimiento imperfecto, las empresas tienen un incentivo para mantener en equilibrio una cantidad de permisos (l_i) menor que e_i de tal manera que pueda reducir el gasto asociado a la compra de permisos.

Si al final del periodo, una firma posee una cantidad de permisos inferior a sus unidades correspondientes de emisiones, estará incumpliendo. El modelo tiene en cuenta que el regulador no puede observar las emisiones de las firmas; por lo tanto, plantea la posibilidad de la realización de un monitoreo con una probabilidad de ocurrencia (π) conocida por las firmas. Siguiendo el enfoque adoptado por Stranlund & Chavez, (2000) para modelar sanciones, una vez que el regulador monitorea una firma, puede determinar el estado de cumplimiento de esta; si el monitoreo revela que la firma no cumple, se enfrenta a una penalización $F(v)$ donde v representa el alcance de la violación ($v = e_i - l_i$), siendo F una función creciente y estrictamente convexa (i.e., $F'(v) > 0$ y $F''(x) > 0$). Además, para una violación cero, la penalización es cero $F(0) = 0$, pero la penalización marginal es mayor que cero: $F'(0) > 0$.

Teniendo en cuenta lo anterior, si L^b representan la demanda agregada de permisos del sector b , siendo $L^b = \sum_{i=1}^n l_i^{b*}$, y L^k representa la demanda agregada de permisos del sector k , siendo $L^k = \sum_{i=1}^n l_i^k$; el equilibrio del SCE está representado por la ecuación (3-1).

$$L = L^b + L^k + L^h \quad (3-1)$$

Para encontrar el equilibrio representado por la ecuación (3-1), es necesario identificar el nivel de emisiones y la demanda de permisos que minimizan los costos totales esperados de cada una de las firmas de cada sector b y k sujeto a que el nivel de violación $(e - l)$ sea mayor o igual que cero. Para esto, se plantea un problema de optimización el cual se resuelve utilizando la función lagrangiana. Este método permitirá medir como la restricción afecta al valor del óptimo es decir mide el grado de respuesta al problema de cambio del óptimo debido a cambios en las restricciones. A continuación, se presente la solución del problema para una firma tipo de cada uno de los sectores los cuales se diferencian por la forma en la que se realiza la asignación inicial de permisos en el mercado primario:

Asignación por *grandfathering*: El problema al cual se enfrenta la firma b (Ecuación (3-2)) es determinar el nivel de emisiones (e_i^b) y de permisos (l_i^b) que minimizan sus costos totales sujetos a que el nivel de violación $(e_i^b - l_i^b)$ sea mayor o igual que cero, es decir, no hay sobrecumplimiento de la regulación.

$$\text{Min}_{e_i^b, l_i^b} C(e_i^b) + p(l_i^b - l0_i^b) + \pi F(e_i^b - l_i^b) \quad \text{s. a. } e_i^b - l_i^b \geq 0. \quad (3-2)$$

Donde:

- e_i^b emisiones generadas por la i -ésima firma del sector b
- $C(e_i^b)$ es la función de costos de reducción de emisiones de la i -ésima firma del sector b
- p es el precio del permiso de emisión
- l_i^b es el número de permisos de emisión al final del periodo de la i -ésima firma del sector b
- $l0_i^b$ es la cantidad de permisos asignados de manera gratuita por *grandfathering* a la i -ésima firma del sector b
- π es la probabilidad de monitoreo
- $F(e_i^b - l_i^b)$ es la función de penalización

Para encontrar la solución al problema de la firma, se plantea la función lagrangiana $(\varphi(y, l^k))$ (Ecuación (3-3)) donde λ representa el multiplicador de Lagrange. Posteriormente se identifican las condiciones de primer orden (Ecuaciones (3-4) (3-5) (3-6)). Es importante

mencionar que este modelo ha sido usado en investigaciones anteriores por autores como (Stranlund & Chavez, 2000)

$$\varphi(e, l) = C(e_i^b) + p(l_i^b - l_0^b) + \pi F(e_i^b - l_i^b) + \lambda(e_i^b - l_i^b), \quad (3-3)$$

$$\frac{d\varphi}{de^b} = C'(e_i^b) + \pi F'(e_i^b - l_i^b) + \lambda = 0, \quad (3-4)$$

$$\frac{d\varphi}{dl^b} = P - \pi F'(e_i^b - l_i^b) - \lambda = 0, \quad (3-5)$$

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = l_i^b - e_i^b \leq 0; (e_i^b - l_i^b)\lambda = 0. \quad (3-6)$$

Si la solución es interior, $\lambda = 0$, es decir si el óptimo se ubica en un punto de tangencia entre la curva de la restricción y la curva de indiferencia; entonces, las condiciones de primer orden se pueden escribir como:

$$C'(e_i^b) = -\pi F'(e_i^b - l_i^b), \quad (3-7)$$

$$p = \pi F'(e_i^b - l_i^b). \quad (3-8)$$

De las ecuaciones (3-7) y (3-8) la firma selecciona un nivel de emisiones que satisface la ecuación (3-9). Lo que implica que e_i^{b*} es tal que $C'(e_i^{b*}) = -p$.

$$C'(e_i^{b*}) + p = 0, \quad (3-9)$$

$$e_i^{b*} = (C')^{-1}(-p). \quad (3-10)$$

Así, la única solución de (3-9) está representada por la ecuación (3-10). lo que indica que cada firma elige sus emisiones de manera que el costo marginal de reducción sea igual a menos el precio de equilibrio de los permisos y lo hace de manera independiente al nivel de sanción (Malik 1990).

Para encontrar el nivel de permisos que la firma compra en el mercado secundario (l_i^{b*}) se tiene de la ecuación (3-8) que:

$$F'(e_i^{b*} - l_i^b) = \frac{p}{\pi}. \quad (3-11)$$

Recordemos, además, que $F'' > 0$, lo cual implica que F' es una función estrictamente creciente, por lo tanto, es invertible, así obtenemos: $e_i^{b*} - l_i^{b*} = (F')^{-1}\left(\frac{p}{\pi}\right)$; entonces la

solución está representada por la ecuación (3-12) lo que indica que las empresas tienen

una cantidad de permisos tal que la multa marginal esperada es igual al beneficio marginal del incumplimiento, es decir, el precio del permiso de equilibrio.

$$l_i^{b*} = e_i^{b*} - (F')^{-1} \left(\frac{U}{\pi} \right) \tag{3-12}$$

Con el objetivo de identificar el efecto que tienen la variación de p y π ; sobre los óptimos hallados, se desarrolló un análisis de estática comparativa cuyos resultados se presentan en la

Tabla 3-1 y el procedimiento matemático para alcanzar dichos resultados se encuentra en el Anexo I.

Tabla 3-1. Estática comparativa para la firma del sector b

$\frac{de_i^{b*}}{dp} = -\frac{1}{C''(e_i^{b*})} < 0$	<p>El nivel óptimo de emisiones e_i^{b*} tiene una relación inversa con el precio de los permisos en el mercado secundario (p). Esto es, aumentos en el precio p representa una disminución en el nivel óptimo de emisiones. e_i^{b*}</p>
$\frac{dl_i^{b*}}{dp} = -\frac{1}{C''(e_i^{b*})} - \frac{1}{\pi F''(e_i^{b*} - l_i^{b*})} < 0$	<p>El nivel óptimo de permisos que la firma adquiere en el mercado secundario (l_i^{b*}) tiene una relación inversa con el precio de los permisos (p). Aumentos en p representa una disminución en l_i^{b*}</p>
$\frac{dl_i^{b*}}{d\pi} = \frac{p}{\pi^2 F''(e_i^{b*} - l_i^{b*})} > 0$	<p>El nivel óptimo de permisos que la firma adquiere en el mercado secundario (l_i^{b*}) y la probabilidad de ser monitoreado (π) tiene una relación positiva. Aumentos en π implica aumentos en l_i^{b*}</p>

De la

Tabla 3-1 se pueden entender algunas regularidades de una firma emisora bajo el esquema de asignación por *grandfathering*. Dado que la función de costo marginal es decreciente en las emisiones, un aumento en el precio de permisos en el mercado secundario hace que la empresa reduzca sus emisiones de equilibrio. Por otro lado, si la

sanción marginal aumenta, la violación disminuye lo que implica que la empresa adquiera más permisos.

Asignación inicial basada en la producción: Para la i -ésima firma del sector k , tanto el nivel de emisiones (e_i^k) como el número de permisos a asignar gratuitamente por parte del regulador (l_0^k) están en función del nivel de producción (y_i). Definimos una función de costos estándar en función de la producción así $C_1'(y_i) > 0$ y $C_1''(y_i) < 0$ y una función de costos de reducción de emisiones estándar⁷ que satisface $C'(e_i^k) < 0$ y $C''(e_i^k) > 0$.

Adicionalmente, suponemos que las funciones de emisión y de permisos iniciales varían de manera lineal en función de la producción (i.e., $e_i^k(y_i) = \omega y_i$; $l_0^k(y_i) = \sigma y_i$); y suponemos que el nivel de emisiones es mayor que el nivel de permisos iniciales (i.e., $\omega \geq \sigma$). El problema al cual se enfrenta la firma k X (Ecuación (3-13)) es determinar el nivel de producción y el número de permisos que debe adquirir en el mercado secundario (l_i^k) que minimizan sus costos totales, sujeto a que el nivel de violación ($e_i^k(y_i) - l_i^k$) sea mayor o igual que cero.

$$\begin{aligned} \text{Min}_{y,l^k} \quad & C_1(y_i) + C(e_i^k(y_i)) + p(l_i^k - l_0^k(y_i)) + \pi F(e_i^k(y_i) - l_i^k) \quad \text{s. a. } e_i^k(y_i) \\ & - l_i^k \geq 0. \end{aligned} \quad (3-13)$$

Donde:

- y_i el nivel de producción de la i -ésima firma del sector k
- $C_1(y_i)$ es la función de costos de producción de la i -ésima firma del sector k
- $e_i^k(y_i)$ emisiones de la i -ésima firma del sector k como función de la producción
- $C(e_i^k(y_i))$ es la función de costos de reducción de emisiones de la i -ésima firma del sector k
- p es el precio del permiso de emisión
- l_i^k es el número de permisos de emisión al final del periodo de la i -ésima firma del sector k
- $l_0^k(y_i)$ es la cantidad de permisos asignados de manera gratuita como función de la producción de la i -ésima firma del sector k

⁷ Adicionalmente se supone que $C_1''(y) + C''(e^k(y))e^{k'}(y)^2 > 0$.

- π es la probabilidad de monitoreo
- $F(e_i^k(y_i) - l_i^k)$ es la función de penalización

Para encontrar la solución al problema de la firma, se plantea la función lagrangiana $\varphi(y, l^k)$ (Ecuación (3-14)) donde λ representa el multiplicador de Lagrange. Posteriormente se identifican las condiciones de primer orden (Ecuaciones (3-15), (3-16) y (3-17))

$$\varphi(y, l^k) = C1(y_i) + C(e_i^k(y_i)) + p(l_i^k - l0_i^k(y_i)) + \pi F(e_i^k(y_i) - l_i^k) + \lambda (e_i^k(y_i) - l_i^k), \quad (3-14)$$

$$\frac{d\varphi}{dy} = C1(y_i) + C'(e_i^k(y_i)) e'(y_i) - pl_i^k(y_i) + \quad (3-15)$$

$$F'(e_i^k(y_i) - l_i^k) e_i^{k'}(y_i) + \lambda e_i^{k'}(y_i) = 0,$$

$$\frac{d\varphi}{dl^k} = p - \pi F'(e_i^k(y_i) - l_i^k) - \lambda = 0, \quad (3-16)$$

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = l_i^k - e_i^k(y_i) \leq 0; \lambda(e_i^k(y_i) - l_i^k) = 0. \quad (3-17)$$

Si la solución es interior, $\lambda = 0$, es decir si el óptimo se ubica en un punto de tangencia entre la curva de la restricción y la curva de indiferencia; entonces, las condiciones de primer orden se pueden escribir como:

$$\frac{d\varphi}{dy} = C1(y_i) + C'(e_i^k(y_i)) e'(y_i) - pl0_i^{k'}(y_i) + \pi F'(e_i^k(y_i) - l_i^k) e_i^{k'}(y_i) = 0, \quad (3-18)$$

$$\frac{d\varphi}{dl^k} = p - \pi F'(e_i^k(y_i) - l_i^k) = 0, \quad (3-19)$$

Despejando p de la ecuación (3-19) se obtiene la ecuación (3-20) la cual reemplazándola en la ecuación (3-18) y despejando p de nuevo, se obtiene que la firma selecciona un nivel de producción que satisface la ecuación (3-21), es decir, que la firma elige su nivel de producción de manera que el costo marginal de producción sea igual a menos el precios de equilibrio de los permisos y lo hace de manera independiente al nivel de sanción.

$$p = \pi F'(e_i^k(y_i) - l_i^k), \quad (3-20)$$

$$\frac{C1(y_i) + C'(e_i^k(y_i)) e_i^{k'}(y_i)}{e_i^{k'}(y_i) - l0_i^{k'}(y_i)} = -p. \quad (3-21)$$

Si definimos $M(y) = \frac{C1(y_i) + C'(e_i^k(y_i))e_i^{kF}(y_i)}{e_i^{kF}(y_i) - l_0^{k*}(y_i)}$, entonces M es una función invertible, puesto que $M'(y) > 0$.⁸ Como $M'(y) > 0$, se tiene que la solución de la ecuación (3-21), $y^*(p)$, es única y está definida por la ecuación (3-22),

$$M(y^*) = -p. \quad (3-22)$$

Así mismo l_i^{k*} está dado por la ecuación (3-20) y está bien definida para cada (p, π) puesto que y^* es único y $F'' > 0$. Adicionalmente, F' es estrictamente creciente, por lo tanto, es invertible, así: $e_i^{k*}(y) - l_i^{k*} = (F')^{-1} \left(\frac{p}{\pi} \right)$; entonces la solución está representada por la

ecuación (3-23)

$$l_i^{k*} = e_i^{k*}(y_i) - (F')^{-1} \left(\frac{p}{\pi} \right). \quad (3-23)$$

Al igual que en el modelo anterior, en equilibrio (3-23), las empresas tienen una cantidad de permisos tal que la multa marginal esperada es igual al beneficio marginal del incumplimiento, es decir, el precio del permiso de equilibrio.

Para identificar el efecto que tienen la variación de p y π sobre los valores óptimos de la producción y este a su vez sobre la asignación inicial de permisos ($l_0^k(y_i)$) y el número de permisos adquiridos en el mercado secundario, se desarrolló un análisis de estática comparativa cuyos resultados se presentan en la Tabla 3-2 y el procedimiento matemático para alcanzar dichos resultados se presenta en el Anexo I.

Tabla 3-2. Estática comparativa para la firma del sector k

$\frac{dy^*}{dp} = \frac{-1}{M'(y)} < 0$	El nivel de producción óptimo (y_i^*) y el precio de los permisos de emisión (p) tienen una relación inversa. Aumentos en p genera una disminución en y^*
$\frac{dl_i^{k*}}{dp} = e_i^{kF}(y_i^*) \frac{dy^*}{dp} - \frac{1}{\pi F''(e_i^{k*}(y_i^*) - l_i^{k*})} < 0$	El nivel óptimo de permisos adquiridos en el mercado secundario (l_i^{k*}) y el precio de los permisos de emisión (p) tienen una relación inversa. Aumentos en p genera una disminución en l_i^{k*}

⁸ Teniendo en cuenta que $e_i^{k''}(y_i) = 0$ y; $l_0^{k''}(y_i) = 0$ y que las emisiones aumentan a un ritmo mayor que el número de permisos asignados inicialmente $e_i^{k'}(y_i) - l_0^{k'}(y_i) \geq 0$, se tiene entonces

$$\text{que, } M'(y) = \frac{C1''(y_i) + C''(e_i^k(y_i))e_i^{kF}(y_i)^2}{e_i^{kF}(y_i) - l_0^{k*}(y_i)}$$

$$\frac{dl_i^{k*}}{d\pi} = \frac{p}{\pi^2 F''(e_i^{k*} - l_i^{k*})} > 0$$

El nivel óptimo de permisos adquiridos en el mercado secundario (l_i^{k*}) y la probabilidad de ser monitoreado (π) tiene una relación positiva. Aumentos en π implica aumentos en l_i^{k*}

De la Tabla 3-2 se pueden identificar como actúa una firma emisora bajo el esquema de asignación inicial basado en la producción. Dado que la función de costos de reducción de emisiones y la función de penalización son estrictamente convexas, y como la función de costos de producción es estrictamente cóncava, un aumento en el precio de permisos en el mercado secundario obliga a la firma a reducir el número de permisos que puede adquirir en el equilibrio (*i. e.*, $\frac{dl_i^{k*}}{dp} < 0$). Además, como la producción y el nivel de emisiones están directamente relacionados por la ecuación $e_i^k(y_i) = \omega y_i$, por lo tanto, el aumento en el nivel de precios también conlleva a una disminución en la producción óptima ya que los permisos son un insumo de producción y que un aumento en el precio de un insumo disminuye la producción (*i. e.*, $\frac{dy_i^*}{dp} < 0$). Finalmente, cuando la probabilidad de ser monitoreado aumenta, también aumenta el valor esperado de la penalización, una firma que actúa de manera racional se anticipa a esta posible multa aumentando el número de permisos que adquiere en el mercado secundario.

3.2 Hipótesis

Una vez identificados el nivel de permisos óptimos de la firma tipo de cada uno de los sectores (l_i^{b*} y l_i^{k*}) y el nivel de emisiones óptimas (e_i^{b*} y $e_i^{k*}(y_i)$); la demanda agregada de permisos del sector b , es representado por $L^b = E^b - (F')^{-1}(\frac{p}{\pi})$, y L^k representa la demanda agregada de permisos del sector k , siendo $L^k = E^k(Y) - (F')^{-1}(\frac{p}{\pi})$. Reemplazando los valores de los permisos óptimos en (3-1), se puede identificar el equilibrio del SCE (ecuación, (3-24)).

$$L = [E^b - (F')^{-1}(\frac{p}{\pi})] + [E^k(Y) - (F')^{-1}(\frac{p}{\pi})] + L^H \tag{3-24}$$

$$L = [E^b - E^k(Y)] + 2(F')^{-1}(\frac{p}{\pi})$$

$$L = [E^b - \omega Y] + 2(F')^{-1}(\frac{p}{\pi})$$

Teniendo en cuenta que la ecuación (3-24) es una ecuación que está en términos de L , p , π y L^H , se puede despejar el precio de los permisos p como función de la oferta total de permisos, de la probabilidad de monitoreo y de la asignación de permisos a proyectos de compensación $p = p(L, L^H, \pi)$. Esta relación nos permite derivar una serie de hipótesis sobre los efectos que tienen dichas variables sobre el precio de los permisos de emisión (Tabla 3-3); las cuales pueden ser testeadas por medio el experimento propuesto.

Tabla 3-3: Hipótesis sobre el precio de los permisos de emisión

$\frac{dp}{dL} = \frac{1}{\frac{dE^b}{dp} + \omega \frac{dY}{dp} - \frac{2}{\pi} * \frac{1}{F'' ((F')^{-1} (\frac{p}{\pi}))}} < 0$	<p>Hipótesis 1: La oferta total de permisos (L) y el precio de los permisos (p) guardan una relación inversa. Una disminución en L implica aumentos en p. Una reducción en el límite de emisiones para un periodo en el SCE genera presiones al alza de los precios de los permisos en el mismo periodo.</p>
$\frac{dp}{d\pi} = \frac{\frac{-2}{\pi^2} \frac{p}{F'' ((F')^{-1} (\frac{p}{\pi}))}}{\frac{dE^b}{dp} + \omega \frac{dY}{dp} - \frac{2}{\pi} * \frac{1}{F'' ((F')^{-1} (\frac{p}{\pi}))}} > 0$	<p>Hipótesis 2: El precio de los permisos (p) y la probabilidad de que las firmas sean monitoreadas (π) tiene una relación de causa-efecto positiva. Aumentos en π implica aumentos en p.</p>
$\frac{dp}{dL^H} = - \frac{1}{\frac{dE^b}{dp} + \omega \frac{dY}{dp} - \frac{2}{\pi} * \frac{1}{F'' ((F')^{-1} (\frac{p}{\pi}))}} > 0$	<p>Hipótesis 3: El número total de permisos otorgados a los proyectos de compensación voluntaria (L^H) y el precio de los permisos (p) guardan una relación causal positiva. Un aumento en L^H implica aumentos en p.</p>

Notemos que si la oferta total de permisos L aumenta, dado que las emisiones de equilibrio de una firma en la asignación por grandfathering y la producción óptima de una firma en la asignación basada en la producción son decrecientes en el precio de permisos en el mercado secundario (i.e., y), es más fácil para estas firmas adquirir los permisos que necesitan para cumplir con sus planes de producción y emisión, de modo que el precio de equilibrio disminuye.

Por otro lado, cuando la probabilidad de ser monitoreado aumenta para ambas firmas, también aumenta el valor esperado de la penalización, dado que las firmas actúan de

manera racional, y la oferta total de permisos es limitada, ambas se anticipan a esta posible multa aumentando el número de permisos que adquieren en el mercado, esto lleva a un aumento en el precio de equilibrio.

Finalmente, cuando el regulador decide aumentar el volumen de permisos asignados para proyectos de compensación voluntarias, el precio de los permisos aumenta. Esto se contradice con la evidencia existente en la literatura, la cual presenta una relación inversa entre el precio de los permisos y el volumen de compensaciones aceptadas en un SCE (Kemfert et al., 2006) (Fell et al., 2011) (Trotignon, 2012) . La diferencia radica en que en el PNCTE las compensaciones no representan permisos adicionales por fuera del límite definido. Por tal razón, al aumentar el volumen de permisos asignados a proyectos de compensación voluntarias, esto representa una disminución del volumen de permisos asignados a los agentes regulados ejerciendo presión sobre el precio de este.

Por otro lado, notemos que la ecuación (3-24) también nos permite definir las emisiones totales de equilibrio ($E^b + E^k$) como función de L , L^H o de la penalización π . Esta relación nos permitirá derivar las hipótesis acerca del efecto de estas variables sobre las emisiones agregadas La Tabla 3-4 presenta los resultados de estas relaciones funcionales

Tabla 3-4: Hipótesis sobre las emisiones agregadas

$\frac{d(E^b + E^k)}{dL} = 1 + \frac{2}{\pi} \frac{1}{F''((F')^{-1}(\frac{p}{\pi}))} * \frac{dp}{dL} <> 0$	<p>Hipótesis 4: El cambio en las emisiones totales óptimas como función de la oferta total de permisos no está determinado. Aunque en las simulaciones presentadas en la siguiente sección se identifica una relación positiva, para el experimento esta hipótesis se plantea como exploratoria, que permita en un trabajo futuro ajustar el modelo económico que de lugar con la evidencia empírica.</p>
$\frac{d(E^b + E^k)}{dL^H} = -1 + \frac{2}{\pi} \frac{1}{F''((F')^{-1}(\frac{p}{\pi}))} * \frac{dp}{dL^H} <> 0$	<p>Hipótesis 5: El cambio en las emisiones totales óptimas como función de la oferta total de permisos no está determinado. Aunque en las simulaciones presentadas en la siguiente sección se identifica una relación negativa, para el experimento esta hipótesis será testada de manera exploratoria.</p>

$$\frac{d(E^b + E^k)}{d\pi} = -\frac{2p}{\pi^2} \frac{1}{F''((F')^{-1}(\frac{p}{\pi}))} < 0$$

Hipótesis 6: El cambio en las emisiones agregadas como función de la probabilidad de monitoreo es negativo. Un aumento en la probabilidad de monitoreo aumenta el valor esperado de la penalización para ambas firmas, lo que hace que en equilibrio estas firmas se anticipen y disminuyan su nivel de emisiones

Finalmente, la Tabla 3-5 presenta las diferentes hipótesis que buscaran ser testeadas por el experimento propuesto, estas hipótesis presentan la relación existente entre la oferta total de permisos, la probabilidad de monitoreo y el numero de permisos otorgados a proyectos de compensación voluntarios sobre el precio de los permisos de emisión y las emisiones agregadas.

Tabla 3-5: Resumen hipótesis

Hipótesis sobre el precio de los permisos de emisión	Hipótesis sobre las emisiones agregadas
$\frac{dp}{dL} = \frac{1}{\frac{dE^b}{dp} + \omega \frac{dY}{dp} - \frac{2}{\pi} \frac{1}{F''((F')^{-1}(\frac{p}{\pi}))}} < 0$	$\frac{d(E^b + E^k)}{dL} = 1 + \frac{2}{\pi} \frac{1}{F''((F')^{-1}(\frac{p}{\pi}))} * \frac{dp}{dL} < > 0$
$\frac{dp}{d\pi} = \frac{\frac{-2}{\pi^2} \frac{p}{F''((F')^{-1}(\frac{p}{\pi}))}}{\frac{dE^b}{dp} + \omega \frac{dY}{dp} - \frac{2}{\pi} \frac{1}{F''((F')^{-1}(\frac{p}{\pi}))}} > 0$	$\frac{d(E^b + E^k)}{dL^H} = -1 + \frac{2}{\pi} \frac{1}{F''((F')^{-1}(\frac{p}{\pi}))} * \frac{dp}{dL^H} < > 0$
$\frac{dp}{dL^H} = -\frac{1}{\frac{dE^b}{dp} + \omega \frac{dY}{dp} - \frac{2}{\pi} \frac{1}{F''((F')^{-1}(\frac{p}{\pi}))}} > 0$	$\frac{d(E^b + E^k)}{d\pi} = -\frac{2p}{\pi^2} \frac{1}{F''((F')^{-1}(\frac{p}{\pi}))} < 0$

3.2.1 Simulaciones

En esta sección se utilizan algunas formas funcionales específicas para las funciones de costos de abatimiento y costos de producción, con el objetivo de encontrar soluciones explícitas a los planteamientos de la sección anterior, que permiten tener ideas iniciales a la parametrización del experimento. Con estas soluciones explícitas se presentan algunos

gráficos que ejemplifican de mejor manera las dinámicas de venta de permisos en el mercado secundario.

Suponemos que la función de costos de abatimiento está dada por $C(e) = 4 - \sqrt{e} + 1$ para $e \in [0,15]$. Notemos que esta función satisface las hipótesis necesarias, es decir $C'(e) = -\frac{1}{2\sqrt{e}} < 0$ y $C''(e) = \frac{1}{4(1+e)^2} > 0$. Suponemos que la función de penalización toma la forma funcional $F(x) = x^2 + 10x$, de modo que $F'(x) = 2(x + 5) > 0$ y $F''(x) = 2 > 0$. Para la solución del modelo de asignación basado en la producción, por simplicidad, suponemos que los costos de producción son constantes e iguales a 1, es decir, $C_1(y) = 1$ para todo y (notemos que esta función satisface de manera trivial la condiciones $C_1'(y) \geq 0$ y $C_1''(y) \leq 0$).⁹ Finalmente, suponemos que las emisiones y permisos iniciales como función de la producción tiene la siguiente forma funcional $e^k(y) = \frac{1}{2}y$ y $l^k(y) = \frac{2}{5}y$. Notemos que se satisface la hipótesis, $e_i^k(y) - l_i^k(y) = \frac{1}{10} > 0$. Utilizando estos supuestos sobre las formas funcionales, y las ecuaciones derivadas en la sección anterior obtenemos los niveles de equilibrio para $e_i^{b*}, e_i^{k*}, y_i^*, l_i^{b*}, l_i^{k*}$ presentados en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6 Niveles de equilibrio para $e_i^{b*}, e_i^{k*}, y_i^*, l_i^{b*}, l_i^{k*}$

Valores de equilibrio - grandfathering	Valores de equilibrio - producción
$e_i^{b*} = \frac{1 - 4p^2}{p^2}$	$e_i^{k*} = \frac{25 - 4p^2}{4p^2}$
$l_i^{b*} = \frac{16\pi p^2 - 2p^3 + \pi}{4\pi p^2}$	$l_i^{k*}(y) = 4 + \frac{25}{4p^2} - \frac{p}{2\pi}$
----	$y_i^* = \frac{25 - 4p^2}{4p^2}$

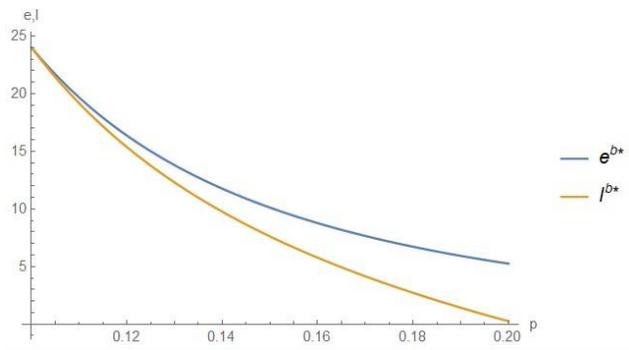
Fuente: Elaboración propia, (2020)

A partir de las formas funcionales presentadas en la Tabla 3-6 se construyeron las gráficas de las curvas $e_i^{b*}, e_i^{k*}, y_i^*, l_i^{b*}, l_i^{k*}$ como función del precio, las cuales se presentan a

⁹ Es decir, suponemos que los costos variables de la firma son iguales a cero, y que solo enfrenta un costo fijo de producción el cual se normaliza a una unidad.

continuación. La Figura 3-1 muestra los valores óptimos de e_i^{b*} y l_i^{b*} (gráfico azul y naranja, respectivamente) como función del precio de permisos en el mercado secundario. La gráfica muestra que en equilibrio $e_i^{b*} \geq l_i^{b*}$, lo cual se representa en el hecho de que la gráfica azul está por encima de la gráfica naranja. Esta grafica ejemplifica la estática comparativa de la Tabla 3-1 al mostrar que tanto el nivel de emisiones óptimo, como el número de permisos para el actor cuya asignación se hace a través de grandfathering, disminuyen a medida que el precio de permisos en el mercado secundario aumenta.

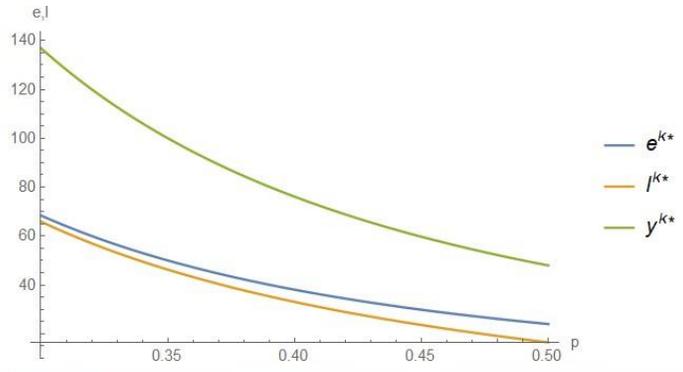
Figura 3-1: Valores óptimos de e_i^{b*} y l_i^{b*} como función de p en el modelo de *grandfathering*



Fuente: Elaboración propia, (2020)

Por su parte, la Figura 3-2 muestra los valores de equilibrio de e_i^{k*} , l_i^{k*} y y_i^* (gráfico azul, naranja y verde, respectivamente) como función del precio de permisos en el mercado secundario. La gráfica muestra que en equilibrio $e_i^{k*} \geq l_i^{k*}$, lo cual se representa en el hecho de que la gráfica azul está por encima de la gráfica naranja. La Figura 3-2 ejemplifica la estática comparativa de la Tabla 3-2, al mostrar que tanto el nivel de emisiones óptimo, como el número de permisos al final del periodo y la producción óptima, disminuyen a medida que el precio de permisos en el mercado secundario aumenta.

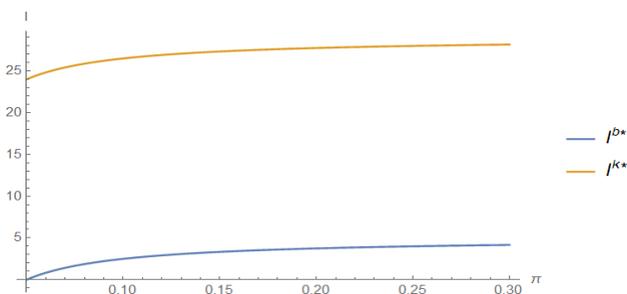
Figura 3-2: óptimos de e_i^{k*} , l_i^{k*} y y_i^* como función de p



Fuente: Elaboración propia, (2020)

Con respecto a los valores óptimos de l_i^{k*} y l_i^{b*} como función de la probabilidad de monitoreo asumiendo p fijo, $p = 0.5$, la Figura 3-3 representa la estática comparativa de la Tablas 3-1 y 3-2 al mostrar que los valores óptimos del número de permisos, l_i^{k*} y l_i^{b*} , son crecientes en la probabilidad de monitoreo. Recordemos que sí π aumenta, el valor esperado de la penalización también aumenta, lo que lleva a las firmas a comprar más permisos en el mercado secundario y así evitar una penalización mayor.

Figura 3-3: valores óptimos de l_i^{k*} y l_i^{b*} como función de la probabilidad de monitoreo

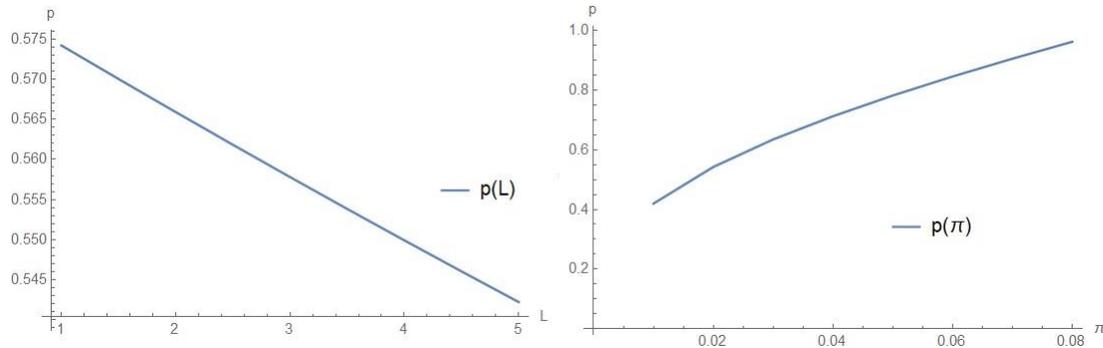


Fuente: Elaboración propia, (2020)

Los resultados del equilibrio del SCE, al adoptar las formas funcionales de la Tabla 3-6, permiten construir gráficos de precio de equilibrio como función de la oferta total de permisos y como función de la penalización La Figura 3-4 en el panel izquierdo muestra los valores del precio de los permisos en el mercado secundario como función de la oferta total de los permisos, cuando $L^H = 1$ y $\pi = 0.02$; En el panel derecho muestra los valores del precio de los permisos en el mercado secundario como función de la probabilidad de monitoreo, cuando $L^H = 1$ y $L = 1$.

De igual manera los resultados de la Figura 3-4 corroboran las hipótesis presentadas en la Tabla 3-3. al mostrar que el precio de los permisos en el mercado secundario es una función decreciente en la oferta total de permisos y es una función creciente en la probabilidad de monitoreo.

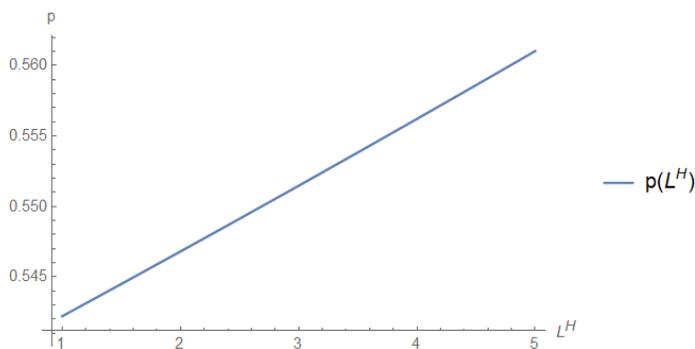
Figura 3-4: Precio de equilibrio como función de L y π



Fuente: Elaboración propia, (2020)

Análogamente, al asumir $L = 5$ y $\pi = 0.02$ el precio de equilibrio de los permisos también puede verse como una función del número total de permisos otorgados a los proyectos de compensación voluntaria, $p = p(L^H)$. En este caso, el precio aumentará (ver Figura 3-5), ya que si L^H aumenta, la oferta de permisos disponibles para las firmas será menor, y por tanto la competencia entre las firmas por los permisos disponibles incrementará, lo que causará que a su vez p aumente.

Figura 3-5: Precio de equilibrio del SCE como función de L^H

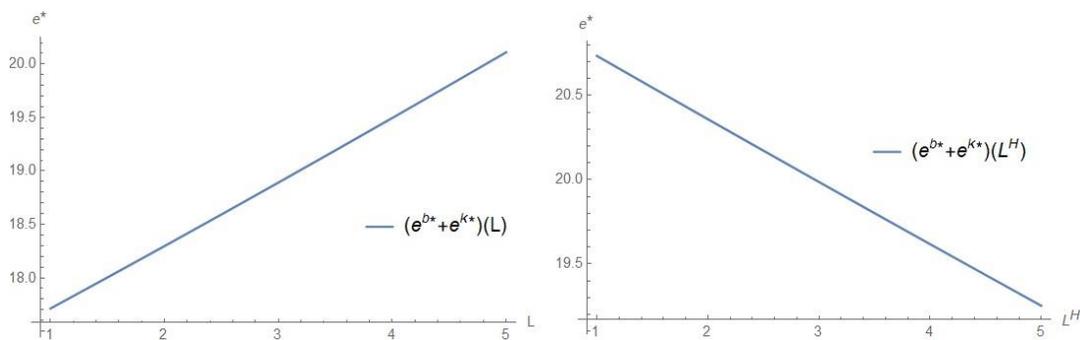


Fuente: Elaboración propia, (2020)

Para concluir el análisis del equilibrio en el SCE, utilizamos las ecuaciones $e^{b*} = \frac{1-4p^2}{p^2}$, $e^{k*} = \frac{25-4p^2}{4p^2}$ y la relación $p = p(L)$, para entender el comportamiento de las emisiones totales de las firmas como función de la oferta total de permisos. Es decir, $(e^{b*} + e^{k*})$ como función de L . Notemos primero que, $(E^b + E^k) = \frac{13}{2p^2} - 2$. Si L aumenta como lo vimos anteriormente, el precio de los permisos en el mercado secundario disminuirá, ya que la oferta superará la demanda de permisos. Al caer el precio de los permisos en el mercado secundario, las firmas podrán adquirir más permisos y por tanto aumentar el nivel de emisiones posibles, por esta razón $(E^b + E^k)$ es una función creciente de L , como lo muestra la Figura 3-6 en el panel izquierdo.

Similarmente, cuando el número de total de permisos otorgados a los proyectos de compensación voluntaria aumenta, la competencia por los permisos restantes en el mercado secundario aumenta, lo que lleva a un aumento del precio, como consecuencia el nivel de emisiones totales de equilibrio disminuye, como lo muestra la Figura 3-6 en el panel derecho.

Figura 3-6: Emisiones totales como función de L y L^H

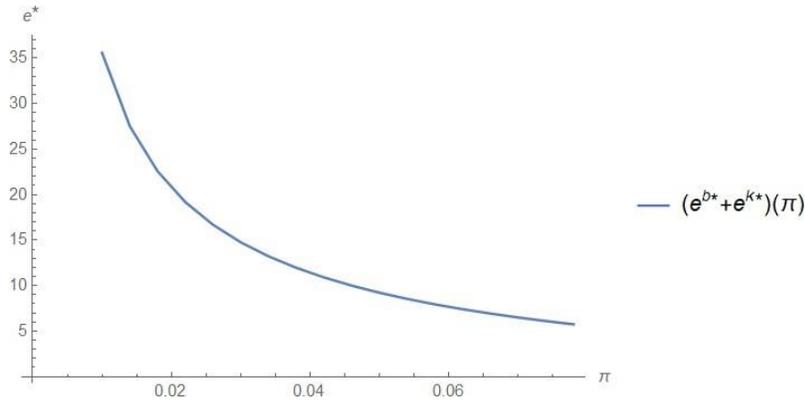


Fuente: Elaboración propia, (2020)

Finalmente, el cambio en las emisiones totales óptimas, $(E^b + E^k)$, como función de la probabilidad de monitoreo es negativo. Esto sucede porque un aumento en la probabilidad de monitoreo aumenta el valor esperado de la penalización para ambas firmas, lo que hace que en equilibrio estas firmas se anticipen y disminuyan su nivel de emisiones La Figura

3-7 muestra los valores óptimos de las emisiones totales de las firmas como función de la probabilidad de monitoreo; tomando $L^H = 1$ y $L = 5$.

Figura 3-7: Emisiones agregada como función de la probabilidad de monitoreo



Fuente: Elaboración propia, (2020)

Después de asumir algunas formas funcionales específicas para las funciones de costos de abatimiento y costos de producción, se encontraron soluciones explícitas para las hipótesis planteadas en el modelo teórico permitiendo constatar y ejemplificar de manera gráfica los hallazgos realizados. El resultado de estas simulaciones soporta la validez de las hipótesis a ser testeadas en el experimento que se plantea en el siguiente capítulo.

4. Experimento económico

4.1 Diseño

A continuación, se propone un diseño inicial de un experimento económico pensado para probar las predicciones teóricas previamente planteadas en el capítulo anterior. Se plantea inicialmente un experimento piloto para evaluar viabilidad, tiempo, coste, acontecimientos adversos, y para mejorar el diseño previo al posterior desarrollo de un experimento formal el cual contará con 8 tratamientos con un solo periodo por tratamiento sobre la base de la neutralidad al riesgo de los actores. El diseño del experimento está basado en el estado del arte de la literatura de economía experimental (Smith, 1976; Kahneman & Smith, 2002; Friedman & Cassar, 2004; Andrew Muller & Mestelman, 1998; Willer & Walker, 2007; además de estar inspirado en otros experimentos relacionados (Vogstad et al., 2005; Cason, 2010; Stranlund et al., 2011; Stranlund et al., 2014a).

El experimento se ha diseñado con dos fases, la primera corresponde a la asignación inicial de los cupos de emisión entre los diferentes agentes (Mercado primario) y la segunda fase corresponde al intercambio de cupos entre estos (Mercado secundario). Dentro de estas fases, se plantean una serie amplia de posible casos o tratamientos planteados que buscan analizar la influencia en los precios y las emisiones agregadas como respuesta a cambios en la oferta total de permisos (L), el volumen de permisos asignados compensaciones voluntarias (L_C) y la probabilidad de que el cumplimiento individual sea monitoreado por la autoridad que regula el mercado (π). El experimento está diseñado para ser desarrollado en un laboratorio de economía experimental, el cual provee un ambiente controlado que permite la recolección de la información para el testeo de las hipótesis.

4.1.1 Tipos de jugadores

El experimento está diseñado para tres tipos de jugadores los cuales se diferencian por la forma en la que los permisos son asignados inicialmente. Estos jugadores participaran en cada uno d ellos tratamientos planteados en el experimento.

- **Jugador tipo b:** Se les asigna un volumen de permisos (L_B) de manera gratuita basado en el nivel de emisiones que determine entendiendo que cada unidad de contaminante emitida debe estar respaldada por un permiso de emisión. Con este grupo de jugadores se utilizará un lenguaje neutro al tener que decidir específicamente sobre el nivel de emisiones. La función de beneficio del jugador tipo b esta dado por la Ecuación 4-1

$$\sum_{t=1}^8 B^b = A_t + \alpha e_t - p_t(l_t - l_t^0) - \pi_t \theta(e_t - l_t) \quad \text{Ecuación 4-1}$$

Donde:

- A_t es la dotación inicial en unidades monetarias en el en el tratamiento t
 - e_t es el volumen de emisiones en el tratamiento t
 - αe_t es la ganancia en unidades monetarias al emitir e en el tratamiento t
 - l_t^0 es la cantidad de permisos asignados de manera gratuita en el periodo del tratamiento t
 - p_t es el precio del permiso de emisión en el mercado secundario en el periodo del tratamiento t
 - l_t es el número de permisos de emisión al final del periodo del tratamiento t
 - $\pi_t \theta(e_t - l_t)$ es la función de penalización en el periodo del tratamiento t
- **Jugador tipo k:** Se les asigna un volumen de permisos (L_K) de manera gratuita basado en el nivel de producción que determine el regulador?, entendiendo que cada unidad producida debe estar respaldada por un permiso de emisión. Para este grupo de jugadores el experimento se enmarca como una decisión de producción en la que los permisos transmiten una licencia para producir, en lugar de una decisión de emisiones. La función de beneficio del jugador tipo k esta dado por la ecuación (4-2)

$$\sum_{t=1}^8 B^k = A_t + \beta y_t - p_t(l_t - l_t^0) - \pi_t \theta(y_t - l_t) \quad \text{Ecuación 4-2}$$

Donde:

- A_t es la dotación inicial en unidades monetarias en el en el tratamiento t
 - y_t es el número de unidades producidas en el tratamiento t
 - βy_t es la ganancia en unidades monetarias al producir y_t
 - l_t^0 es la cantidad de permisos asignados de manera gratuita en el periodo del tratamiento t
 - p_t es el precio del permiso de emisión en el mercado secundario en el periodo del tratamiento t
 - l_t es el número de permisos de emisión al final del periodo del tratamiento t
 - $\pi_t \theta (y_t - l_t)$ es la función de penalización en el periodo del tratamiento t
- **Jugadores tipo h :** Se les asigna un volumen de permisos (L_H) de manera gratuita con base en la capacidad de mitigación del contaminante. Para poder certificar esta mitigación, cada unidad de contaminante reducida debe estar respaldada por un permiso de emisión. La función de beneficio está representada por la ecuación (4-3).

$$\sum_{t=1}^8 B^h = A - c_t(e) - p_t(l_t^0 - l_t) \quad \text{Ecuación 4-3}$$

Donde:

- A_t es la dotación inicial en unidades monetarias en el en el tratamiento t
- $c_t(e)$ es el costo de reducción de emisiones en el tratamiento t
- l_t^0 es la cantidad de permisos asignados en el periodo del tratamiento t
- p_t es el precio del permiso de emisión en el mercado secundario en el periodo del tratamiento t
- l_t es el número de permisos de emisión al final del periodo del tratamiento t

Este jugador no está sujeto a ningún tipo de penalización ya que es oferente neto de permisos. Este jugador tiene incentivos para vender el total de los permisos asignados dado que su función de beneficios disminuye si al final del periodo se queda con permisos sin comercializar.

4.1.2 Variables control

- **Oferta total de permisos:** La oferta total de permisos (L) tendrá dos niveles. un nivel alto con $L=120$ permisos, y un nivel bajo con $L=80$ permisos. Los permisos serán distribuidos entre los tres grupos de jugadores presentados en la sección 4.1.1.
- **Asignación a compensaciones:** La asignación de permisos para proyectos de compensación voluntaria (L_H) tendrá dos niveles. Un nivel bajo correspondiendo al 10% de la oferta total de permisos (L) y; un nivel alto correspondiente al 40% de L . Una vez se define este nivel, el resto de los permisos se distribuye de manera equitativa entre los otros dos grupos de jugadores. La Tabla 4-1 ilustra la asignación inicial entre tipos de participantes en función de la variación en el nivel de permisos asignados a los jugadores tipo H . En la primera columna se presentan los dos niveles correspondientes a la asignación de permisos para los jugadores tipo H y el número de permisos correspondiente a cada nivel. En la segunda y tercera columna, se presentan el número de permisos para los jugadores tipo B y tipo K en función de los niveles de L_H

Tabla 4-1: asignación entre tipos de jugadores

Asignación a compensaciones(H)	Asignación a jugadores tipo B	Asignación a jugadores tipo K
Baja (12 permisos)	54	54
Alta (48 permisos)	36	36

- **Probabilidad de monitoreo:** En el experimento, cada individuo será auditado con una probabilidad exógena conocida. Si luego de cada período se audita a una persona y se determina que no cumple con los requisitos (es decir, que la producción o las emisiones totales exceden los permisos), se aplicará una sanción también conocida por los participantes. Para el experimento se proponen dos niveles de probabilidad de ser monitoreado: una baja, igual a 33.33%; y un alta, igual a 50%.

4.1.3 Tratamientos

Los ocho tratamientos se construyeron combinando los diferentes niveles de las variables control presentadas en la sección anterior. La Tabla 4-2 resume los tratamientos del experimento propuesto. En la primera columna, se presenta el número del tratamiento; en la segunda, los niveles que tomará la oferta total de permisos; en la tercera, los niveles que puede tomar el número de permisos asignados a compensaciones y en la cuarta los niveles de probabilidad de monitoreo. Por ejemplo, en T2, el número de permisos de emisiones es Alto (120), la asignación de permisos a compensaciones voluntarias es Alto (40%) y la probabilidad de monitoreo es baja (33%). Un análisis similar podrá hacerse para los siguientes tratamientos.

Tabla 4-2: Tratamientos del experimento

Tratamiento	Oferta total de permisos (L)	Asignación a compensaciones (L_H)	Probabilidad de monitoreo (π)
T1	Alta	Alta	Alta
T2	Alta	Alta	Baja
T3	Alta	Baja	Alta
T4	Alta	Baja	Baja
T5	Baja	Alta	Alta
T6	Baja	Alta	Baja
T7	Baja	Baja	Baja
T8	Baja	Baja	Alta

Fuente: elaboración propia (2020)

4.1.4 Número de sesiones y participantes

Para analizar los resultados del experimento económico se requiere llevar a cabo un control del orden en el cual se presentan los tratamientos. Un control estricto del orden de los 8 tratamientos genera 40,320 posibles combinaciones. Este número de sesiones resulta imposible de realizar, por lo tanto, se plantean, Por lo tanto, se propone que en todas las sesiones conserve siempre en bloque y en un orden preestablecido la asignación a compensaciones, y se varíen las otras dos variables control. Así, el número de combinaciones se reduce a 24 (Tabla 4-3). Esto implica que la alternancia de la variable asignación a compensaciones comenzará siempre en el primer periodo en “baja”, y luego pasará a “alta” en el periodo siguiente, y este patrón lo mantendrá durante los 8 periodos.

No obstante, en caso de que los recursos económicos y de tiempo no sean suficientes para implementar 24 sesiones, estas pueden reducirse a 12, eligiendo al azar cuál de cada par de sesiones consecutivas se realizará. Es decir, se sorteará si se implementa la sesión 1 o la sesión 2, luego se sorteará si se implementa la sesión 3 o la sesión 4, y así sucesivamente hasta llegar a la sesión 24.

Dentro del modelo de análisis de los resultados del experimento deben contemplarse variables *Dummy* que indiquen el orden en que se ofreció a los participantes en cada bloque de tratamientos. Por ejemplo, puede establecerse una variable *Dummy* llamada “T1T2p” si el bloque del tratamiento T1 y T2 se ofreció de primero (es el caso de las sesiones 1 y 2). Se determina un 1 si efectivamente se ofreció, y 0 en caso contrario. Otra variable podrá ser “T1T2s” que indica si el bloque del tratamiento T1 y T2 se ofreció de segundo. Después de analizar el orden de los dos primeros bloques, puede determinarse que el anclaje ya fue identificado, así que no es necesario seguir creando más de estas variables.

Tabla 4-3: Variación en el orden de las sesiones experimentales

Sesión 1	Sesión 2	Sesión 3	Sesión 4	Sesión 5	Sesión 6	Sesión 7	Sesión 8	Sesión 9	Sesión 10	Sesión 11	Sesión 12	Sesión 13	Sesión 14	Sesión 15	Sesión 16	Sesión 17	Sesión 18	Sesión 19	Sesión 20	Sesión 21	Sesión 22	Sesión 23	Sesión 24
T1	T1	T1	T1	T1	T1	T3	T3	T3	T3	T3	T3	T5	T5	T5	T5	T5	T5	T7	T7	T7	T7	T7	T7
T2	T2	T2	T2	T2	T2	T4	T4	T4	T4	T4	T4	T6	T6	T6	T6	T6	T6	T8	T8	T8	T8	T8	T8
T3	T3	T5	T5	T7	T7	T1	T1	T5	T5	T7	T7	T3	T3	T1	T1	T7	T7	T3	T3	T5	T5	T1	T1
T4	T4	T6	T6	T8	T8	T2	T2	T6	T6	T8	T8	T4	T4	T2	T2	T8	T8	T4	T4	T6	T6	T2	T2
T5	T7	T3	T7	T5	T3	T5	T7	T1	T7	T5	T1	T1	T7	T3	T7	T1	T3	T5	T1	T3	T1	T5	T3
T6	T8	T4	T8	T6	T4	T6	T8	T2	T8	T6	T2	T2	T8	T4	T8	T2	T4	T6	T2	T4	T2	T6	T4
T7	T5	T7	T3	T3	T5	T7	T5	T7	T1	T1	T5	T7	T3	T7	T3	T3	T1	T1	T5	T1	T3	T3	T5
T8	T6	T8	T4	T4	T6	T8	T6	T8	T2	T2	T6	T8	T4	T8	T4	T4	T2	T2	T6	T2	T4	T4	T6

Fuente: Elaboración propia, (2021)

Después de mostrar el amplio espectro de posibles tratamientos, se plantea un experimento piloto que permita acotar el problema. Con el experimento piloto se puede empezar a reducir los posibles tratamientos y llevarlo hacia los mas importantes en

términos de diseño de mercado para el SCE. Esta es una práctica habitual en experimentos (Castañeda et al., 2009), que se sugiere para este diseño en particular.

4.2 Procedimiento

En esta sección se presentan la secuencia de actividades que deberán ser seguidas para la correcta realización del experimento. Es importante seguir de manera estricta el orden lógico planteado de las actividades ya que en cada una de ellas se plantea la manera como deben ejecutarse las actividades, quién debe ejecutarlas y en qué momento.

4.2.1 Reclutamiento de los participantes

El experimento buscará reclutar estudiantes de economía, Ingeniería Administrativa e ingeniera Forestal de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Las razones para hacer esta selección consisten en i) la facilidad de reclutamiento de los estudiantes, ii) el bajo costo de oportunidad, y iii) la facilidad de aprendizaje, siguiendo las recomendaciones de economía experimental (Friedman & Cassar, 2005d). Aunque existen críticas sobre el reclutamiento de estudiantes para los experimentos de laboratorio, dicha práctica es defendida usando el argumento de que la teoría económica debe aplicarse a cualquier persona, y no sólo a grupos especiales (Croson, 2005). Además, el uso de profesionales implica pagos más altos (Croson, 2003).

En cuanto al número de participantes que se requiere, el financiamiento y las instalaciones serán los elementos más importantes para considerar. Sin embargo, la teoría sugiere que al menos tres participantes para cada tipo de individuo podrían ser suficientes (Smith, 1982). Adicionalmente, ningún sujeto deberá tener experiencia previa en ningún experimento relacionado. y podrán ganar entre COP 20.000 y COP 80.000 en aproximadamente una hora, valores que son mayores que su costo de oportunidad.

4.2.2 Desarrollo del experimento

Los participantes del experimento ingresarán al laboratorio de economía experimental, donde se les dará la bienvenida y se les informará respecto a las instrucciones (Anexo II) y los incentivos que recibirán por su asistencia a la sesión. Una vez comunicadas las instrucciones, se procede a hacer una prueba de comprensión rápida con preguntas sobre los procedimientos en el primer tratamiento, para lo cual se buscará a alguien de forma

aleatoria que logre responderlas. Cuando se tenga la seguridad de que las instrucciones fueron comprendidas, se pasará a tomar las decisiones relacionadas con el primer tratamiento.

- **Mercado primario:** En esta primera fase, los jugadores conocen a qué tipo de jugador fueron asignados y también se les comunica que en la sala hay otros tipos de participantes. Por lo tanto, saben cuántos permisos les ha sido asignados de manera agregada a los otros tipos de jugadores y cuántos corresponden a su tipo de jugador. Adicionalmente, los participantes conocen la función de beneficios esperados de los otros tipos de participantes, mas no del tipo de participante que representa cada individuo que se encuentra en la sala. Esta información permanecerá secreta durante todo el desarrollo de la sesión. Se propone que en los experimentos se cuente mínimamente con cuatro participantes por cada tipo de jugador.

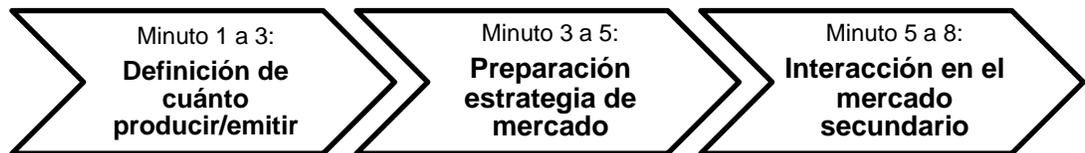
En la primera fase, los participantes deben revelar en el ordenador la cantidad de unidades a emitir si se trata del jugador tipo B; o del bien hipotético a producir si se trata del Jugador tipo K. Los participantes contarán con dos minutos para tomar esta primera decisión, luego de lo cual el moderador de la sesión procederá a anunciar que el tiempo ha terminado y que a continuación se abre el mercado secundario para que los participantes puedan ofrecer o demandar permisos de emisión. A este mercado llegan los participantes con déficit o superávit de permisos de emisión, por lo cual se ofrecen las condiciones necesarias para motivar las transacciones

- **Mercado secundario:** Tanto oferentes como demandantes deben elegir un precio para la transacción deseada. Por ejemplo, si un oferente espera que le paguen 5 u.m por cada permiso que pondrá en el mercado, debe digitarlo en la consola, o si un demandante espera encontrar permisos a 3 u.m. también debe digitar este precio. Esto permitirá que, al abrir el mercado, tanto oferentes como demandantes comuniquen sus pretensiones simultáneamente sin el efecto anclaje, siendo así una subasta de doble punta. La interacción en el mercado secundario permitirá hacer cambios en las aspiraciones, y de esta manera intercambiar información y poder cerrar tratos. En otras palabras, los sujetos podrán modificar su tenencia de

permisos mediante la negociación con los otros participantes. La transacción tendrá lugar cuando un comprador acepte una oferta realizada por algún vendedor o un vendedor acepte una licitación realizada por algún comprador. Si no se aceptan las ofertas, no hay transacciones. En la consola se podrán visualizar todas las ofertas y las demandas de los participantes independientemente del tipo de jugador que representen.

La comunicación se mantendrá exclusivamente desde el software diseñado para el experimento, donde los compradores anunciarán sus licitaciones y los vendedores, sus ofertas, de tal manera que se mantenga el anonimato (nadie sabe quién le está ofreciendo o demandando). Como no está permitido comunicarse con otros participantes verbalmente ni de manera escrita, la única forma restante es por medio de cambios en precios y cantidades. El Mercado secundario abrirá por 3 minutos. La Figura 4-1 muestra la distribución del tiempo para cada periodo.

Figura 4-1: Distribución de tiempos para cada periodo



Fuente: Elaboración propia, (2020)

Para la comercialización en el mercado secundario, los jugadores tienen una asignación monetaria llamada restricción presupuestaria (A), la cual se refiere a la disponibilidad de recursos monetarios para acceder a permisos de emisión. Los recursos monetarios que no se usen se sumarán a la función de beneficios del periodo. La restricción presupuestaria es la misma en cada tratamiento y no se acumula para utilización entre tratamientos, si bien todos los recursos que no se usen se verán reflejados en los beneficios netos del final del experimento, los cuales serán convertidos a moneda local y entregados a los participantes en sobres sellados como incentivo por la participación. Tras el cierre del mercado, los participantes se pueden encontrar en una de estas situaciones:

- **Compradores:** Los compradores se pueden encontrar en dos situaciones, siendo la primera aquella en la que compraron los permisos que

necesitaban y, por lo tanto, cuentan con una condición favorable a la hora de someterse a una auditoría. En la segunda, no logran comprar todos los permisos ligados a la producción/emisión declarada, por lo cual se exponen a una sanción en caso de ser sometidos a una auditoría. No existen limitaciones para que los compradores accedan a más permisos de los que necesitan, en cuyo caso estos serán simplemente descartados (no sumarán en su función de beneficios), ya que se trata de un ejercicio estático por lo cual no se considera *Banking*.

- **Oferentes:** Los permisos que no lograron ser comerciados regresarán a las cuentas de los oferentes. Estos permisos pueden ser mayores a los necesarios para la producción/emisión declarada (es decir, no se logró vender todo el inventario disponible), lo que implicaría su descarte, es decir, no estarían disponibles para el participante en otro tratamiento. Otro caso que puede ocurrir es que los permisos sean menores a la producción/emisión declarada (porque los vendedores se excedieron ofreciendo permisos o simplemente así lo deseaban), lo que dejaría al participante expuesto a la sanción del regulador en caso de que el proceso resulte auditable.

4.2.3 Sorteo de la auditoría del regulador

Como se ha mencionado anteriormente, la identificación de los actores que incumplan sus obligaciones debe ser el resultado de la aplicación de un proceso de MRV de las emisiones de GEI. Sin embargo, debido a que numerosos emisores de los sectores regulados por el PNCTE se encuentran en pequeñas escalas, la gestión y operación del mecanismo podría generar altos costos al no considerarse los umbrales que excluyan esos pequeños emisores. Por esta razón, el experimento tiene en cuenta que el regulador no puede observar las emisiones de las firmas; por lo tanto, plantea la posibilidad de la realización de un monitoreo con una probabilidad de ocurrencia (π) conocida por las firmas. Este proceso se llevará a cabo por el regulador al final de cada tratamiento solamente entre los jugadores tipo B y K. En esta fase se verificará el cumplimiento y se sancionará a aquellos jugadores que no cumplieron. Esta sanción al hacer parte de la función de beneficio del jugador será reflejada en el pago del jugador.

4.2.4 Pagos

Teniendo en cuenta que los experimentos económicos hacen uso de incentivos partiendo de la noción de “valoración inducida” (Friedman y Cassar, 2004b; Smith, 1976; Kawagoe, 2019) se propone el pago para los participantes del experimento siguiendo lo planteado por la literatura, i) los sujetos participantes recibirán pagos en efectivo en moneda local, ii) los pagos estarán ligados a las acciones que tomen los sujetos en el experimento y iii) el pago medio superará el coste de oportunidad medio. Utilizar el pago económico como medio de recompensa disminuye la variabilidad de las decisiones y elimina efectos *framing*; además, el incentivo monetario, es más universal que otros tipos de incentivos y no existe un nivel de saciedad sobre el dinero. (Croson, 2005; Hertwig & Ortmann, 2001). Algunos autores como Rosenblat (2004) recomienda usar dinero, ya que la recompensa con bienes físicos puede ocasionar que se pierda control sobre los participantes porque cada individuo tiene su propia valoración de los bienes; además, el dinero tiene la ventaja de ser divisible, lo cual facilita los pagos.

En la práctica, después de cada tratamiento, el software calculará inmediatamente los beneficios de cada participante, con base en su rendimiento en el mercado de permisos transables para satisfacer la producción/emisión declarada. Con los beneficios calculados con las ecuaciones (4.1; 4.2; y 4.3) se puede calcular el pago en unidades monetarias el cual es una función lineal de los beneficios; $Pago = \alpha + \beta (B)$

Después de cada tratamiento, los participantes recibirán un reporte sencillo que contendrá sus ganancias en el período en cuestión. Para no distorsionar el comportamiento de los participantes por motivo de la frustración o euforia, únicamente se mostrará el reporte del período que acaba de culminar y no el acumulado. Adicionalmente, no se comparará su rendimiento con el promedio de los participantes de la sesión.

4.2.5 Controles adicionales

Al finalizar los tratamientos del experimento, se procederá a aplicar una encuesta a los participantes (Anexo III). La primera parte de la encuesta contiene preguntas sobre las características demográficas y socioeconómicas del participante. La segunda, formula preguntas sobre la percepción del participante acerca del cambio climático y las políticas públicas existentes para su lucha, lo cual es un control importante para tener en cuenta en

el análisis de la toma de decisiones de este tipo de mercado. Para finalizar, se hacen algunas preguntas sobre la aversión al riesgo que el participante podría tener. Toda esta información recolectada en la entrevista servirá para establecer controles adicionales para el modelo de análisis de los resultados.

4.2.6 Plataforma tecnológica

Es importante considerar la plataforma tecnología en la cual se desarrolle el experimento económico; dentro de las opciones existentes identificadas después de analizar sus características y contrastarlas con los elementos del diseño experimental propuesto, se encuentran las siguientes:

- **z-Tree (Zurich Toolbox for Readymade Economic Experiments):** es un software ampliamente utilizado para desarrollar y realizar experimentos económicos. El lenguaje utilizado para definir los experimentos es sencillo, permitiendo un rápido desarrollo del experimento sin requerir experiencia en programación. Para el caso del experimento propuesto, sería pertinente ya que, el software permite crear un ambiente de mercado con oferentes y demandantes, con costos de producción y presupuesto máximo, permitiéndola observar la convergencia hacia el equilibrio (Medina, 2013). Por otro lado, Z-tree permite programar diferentes tipos de subasta lo cual resulta útil para la asignación y transacción de los permisos de emisión.
- **LabSEE:** Software basado en un programa experimental que utiliza Java como ambiente de programación para ejecutar experimentos en Internet. Su funcionamiento es similar al de Z-tree.
- **oTree:** Es un software libre basado en Python que permite construir, juegos de estrategia multijugador, como el dilema del prisionero, el juego de bienes públicos y subastas, Experimentos conductuales controlados en economía, psicología y campos relacionados. Una ventaja de esta plataforma es que, al momento de iniciar la programación, la estructura para el funcionamiento del experimento ya está creada y solo se deben agregar los elementos particulares al experimento como aquellos que verán los participantes o los requerimientos de información que deben ingresar los participantes

- **ConG ConG (Continuous-Time Games for Experimental Economics)** es un software conformado por un conjunto de programas para correr experimentos con sujetos humanos que interactúan estratégicamente en tiempo real. Utiliza gráficas de forma intensiva para crear una variedad de ambientes estratégicos y permitirles a los sujetos que constantemente cambien y adapten sus estrategias. Corre experimentos in tiempo continuo y discreto.
- **UAA PEET: UAA PEET (Python Experimental Economics Toolkit)** fue desarrollado por la University of Alaska Anchorage (UAA), este software escrito en Python es una aplicación y un marco de programación para experimentos económicos en red de varios jugadores. Proporciona un conjunto común de servicios y de interfaces, como la gestión de parámetros, comunicación cliente-servidor, monitoreo de estados y gestión de datos finales.

Analizar en detalle cada una de las plataformas para evaluar su pertinencia se plantea como una etapa a la hora de implementar el experimento. Sin embargo, si en dicha evaluación se identifica que ninguna de las plataformas tecnológicas mencionadas se ajusta a las características del experimento propuesto, se considerará un desarrollo tecnológico propio.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

En este trabajo se analizó el efecto de los elementos de diseño del PNCTE por medio de un modelo económico, de cual se desprendieron hipótesis a ser probadas en un experimento económico para contrastar los resultados, el cual fue diseñado. Se analizaron variables como el límite de emisiones, la probabilidad de monitoreo y el volumen de compensaciones permitidas; sobre el precio de los permisos y las emisiones agregadas. Para el diseño del experimento, primero se caracterizó el PNCTE; posteriormente se desarrolló un modelo teórico para derivar hipótesis y finalmente se planteó un diseño experimental que busque testear las hipótesis teóricas previamente derivadas.

Por medio de la revisión de la literatura relacionada con el diseño del SE para Colombia y la ley Nacional de Cambio Climático, fue posible caracterizar el PNCTE. Esta caracterización sirvió de base para plantear un modelo económico estático que analiza la interacción entre un regulador y tres conjuntos de actores, en el marco de un SCE bajo cumplimiento imperfecto; como una representación simplificada del PNCTE; se analizaron los efectos de la variación del límite de emisiones del programa, la probabilidad de monitoreo y el volumen de permisos asignados a compensaciones voluntarias sobre el precio de los permisos y el nivel de emisiones agregadas. Finalmente se planteó un experimento que consta de dos fases, donde los diferentes tratamientos planteados buscan analizar la influencia en los precios y las emisiones agregadas como respuesta a cambios en la oferta total de permisos (L), el volumen de permisos asignados compensaciones voluntarias (L_c) y la probabilidad de que el cumplimiento individual sea monitoreado por la autoridad que regula el mercado (π).

Los resultados del modelo económico en particular sugieren que el precio de los permisos guarda una relación inversa con la oferta total de permisos, a diferencia de la relación

positiva existente entre dicha oferta y el nivel de emisiones agregadas. Este hecho, aunque parezca trivial, representa un hallazgo importante para que los tomadores de decisiones del PNCTE consideren un límite de emisiones menor que permita el cumplimiento de las metas trazadas en su NDC, pero que la vez contengan los costos del mecanismo. El experimento propuesto presenta 4 tratamientos que consideran límites de emisiones bajos cuyos resultados podrían determinar el mejor escenario para dicha definición en contraste con las demás variables control (π, L^H) .

Del mismo modo, el impacto de una estrategia de cumplimiento mayor sobre el precio de los permisos y el nivel de emisiones agregadas presentan diferentes comportamientos esperados. El aumento en la probabilidad de monitoreo aumenta el valor esperado de la penalización lo que hace que en equilibrio las firmas se anticipen y disminuyan su nivel de emisiones. Al mismo tiempo, las firmas, aumentan el número de permisos que adquieren en el mercado secundario, llevando a un aumento en el precio de equilibrio dado que oferta total de permisos es limitada. Considerando el ámbito de aplicación del PNCTE y el límite de emisiones que debe ser fijado para responder a dicho ámbito, los hacedores de política deben considerar estrategias de cumplimiento fuertes que garanticen la reducción de emisiones trazadas por el país. Sin embargo, la complejidad de implementar un sistema de MRV de las emisiones resultante de la heterogeneidad de los actores dentro de cada sector constituye una desventaja del alcance propuesto para el programa.

En la mayoría de SCE en operación no se incluyen las compensaciones voluntarias; mientras que el PNCTE si las considera. Este hecho, implica que cuando el regulador decide aumentar el volumen de permisos asignados para proyectos de compensación voluntarias, el precio de los permisos aumenta, existiendo una contradicción con la evidencia existente en la literatura. La diferencia radica en que en el PNCTE las compensaciones no representan permisos adicionales por fuera del límite definido. Por tal razón, el aumento en el volumen de permisos asignados a proyectos de compensación voluntarias representa una disminución del volumen de permisos asignados a los agentes regulados.

5.2 Recomendaciones

En futuras investigaciones se podría considerar dentro del modelo teórico el modelo de asignación por subasta ya que este mecanismo facilita la determinación de precios,

especialmente en los casos en que la liquidez es limitada por la alta cantidad de permisos acumulados por los agentes que reciben asignaciones gratuitas. Adicionalmente, el modelo podría considerar un escenario donde el costo marginal de reducción de emisiones de los proyectos voluntarios sea estrictamente menor que el costo marginal de abatimiento de los actores regulados. Este hecho podría generar resultados contrastantes al modelo propuesto inicialmente.

Con respecto al experimento planteado, este presenta algunos elementos de complejidad debido a que involucra dos fases en cada tratamiento. No obstante, es posible que el número de tratamientos se reduzca en el futuro, con el fin de hacer más sencillo el experimento, pero sin afectar la interacción de los participantes con las variables de interés. A medida que se reduzca el número de tratamientos y, por ende, la complejidad del experimento. Futuras investigaciones podrían simplificar el universo de variables para involucrar la dinámica de sistemas, de tal manera que se analicen las lecciones aprendidas mediante la repetición de tratamientos.

Tal como se indicó a lo largo de la descripción del diseño, los tipos de participantes del mercado tienen diferentes aproximaciones al problema de la emisión de GEI. A algunos de ellos, este se les planteó como un problema de producción, el cual inherentemente estaba asociado a la generación de emisiones y, por lo tanto, requería permisos de emisión. No obstante, el énfasis se estableció en la producción del bien ficticio, con el propósito de que la lógica del mercado fuera simplificada y se pudieran evitar los sesgos en la posición personal del participante con respecto al cambio climático.

Por otro lado, a otro tipo de participantes se le planteó el problema explícitamente desde la perspectiva de las emisiones de GEI. Este cambio en el planteamiento del escenario hipotético será importante porque permitirá analizar los resultados por tipo de participante de acuerdo con la forma en que se planteó el problema (problema de producción vs problema de emisión de GEI). Adicionalmente, la encuesta captará las percepciones de todos los participantes con respecto a temas ambientales sensibles. Vale recordar que la encuesta se realizará al final de cada sesión, para asegurar que no exista predisposición en los jugadores.

A. Anexo I

- Estática comparativa: Firma sector b

Cambios en el nivel de emisiones por cambios en el precio:

Derivando la ecuación (3-9) con respecto a p se obtiene

$$\frac{d}{dp}[C(e^*)] = \frac{d}{dp}[-p]$$
$$C'(e^*) \frac{de^*}{dp} = -1 ; \frac{de^*}{dp} = -\frac{1}{C''(e^*)} < 0$$

Cambios en el nivel de permisos por cambios en el precio:

Derivando la ecuación (3-12) con respecto a p se obtiene:

$$\frac{d}{dp}[F'(e^* - l^{b*})] - \frac{d}{dp} \left[\frac{p}{\pi} \right]$$
$$F''(e^* - l^{b*}) \left[\frac{de^*}{dp} - \frac{dl^{b*}}{dp} \right] = \frac{1}{\pi}$$
$$\left[\frac{de^*}{dp} - \frac{dl^{b*}}{dp} \right] = \frac{1}{\pi F''(e^* - l^{b*})}$$
$$\frac{dl^{b*}}{dp} = \frac{de^*}{dp} - \frac{1}{\pi F''(e^* - l^{b*})}$$
$$\frac{dl^{b*}}{dp} = -\frac{1}{C''(e^*)} - \frac{1}{\pi F''(e^* - l^{b*})} < 0$$

Cambios en el nivel de permisos por cambios en la probabilidad de ser monitoreado

Derivando (3-12) con respecto a π se obtiene

$$\frac{d}{d\pi} [F'(e^* - l^*)] - \frac{d}{d\pi} \left[\frac{p}{\pi} \right]$$

$$F''(e^* - l^*) \left[\frac{de^*}{d\pi} - \frac{dl^*}{d\pi} \right] = \frac{-p}{\pi^2}$$

$$F''(e^* - l^*) \frac{dl^*}{d\pi} = \frac{-p}{\pi^2}$$

$$\frac{dl^*}{d\pi} = \frac{p}{\pi^2 F''(e^* - l^*)} > 0$$

- **Estática comparativa: Firma sector k**

Cambios en el nivel de producción por cambios en nivel de precio de los permisos en el mercado secundario

Derivando (3-22) con respecto a p se obtiene

$$M'(y) \frac{dy^*}{dp} = -1$$

$$\frac{dy^*}{dp} = \frac{-1}{M'(y)} < 0$$

Cambios en el número de permisos por cambios en el precio

Derivando (3-23) con respecto a p se obtiene

$$\frac{dl^{k*}}{dp} = e'(y^*) \frac{dy^*}{dp} - \frac{1}{\pi F''(e(y^*) - l^{k*})} < 0$$

Cambios en el número de permisos por cambios en la probabilidad de ser monitoreado

$$\frac{dl^{k*}}{d\pi} = \frac{p}{\pi^2 F''(e(y^*) - l^{k*})} > 0$$

- **Estática comparativa: SCE**

Cambios en p por cambios en L

$$L = [e^{b^*} - (F')^{-1} \left(\frac{p}{\pi} \right)] + \beta k^*(y) - (F')^{-1} \left(\frac{p}{\pi} \right) + L^H$$

$$L = [e^{b^*} - \omega y] + 2(F')^{-1} \left(\frac{p}{\pi} \right) + L^H$$

$$\frac{d}{dL} [L] = \frac{d}{dL} [[e^{b^*} - \omega y] + 2(F')^{-1} \left(\frac{p}{\pi} \right) + L^H]$$

$$1 = \frac{de^*}{dp} + \omega \frac{dy^*}{dp} - \frac{dp}{dL} * \frac{1}{\beta p_s} - 3 \frac{d}{dL} [(F')^{-1} \left(\frac{p}{\pi} \right)]$$

$$1 = 2 \frac{de^* \phi}{dp dL} + \omega \frac{dy^* \phi}{dp dL} - \frac{dp}{dL} * \frac{1 \phi}{\beta p_s dL} - \frac{3}{\pi F''} \frac{1}{((F')^{-1} \left(\frac{p}{\pi} \right))} \frac{dp}{dL}$$

$$1 = \left[2 \frac{de^*}{dp} + \omega \frac{dy^*}{dp} - \frac{1}{\beta p_s} - \frac{3}{\pi F''} \frac{1}{((F')^{-1} \left(\frac{p}{\pi} \right))} \right] \frac{dp}{dL}$$

$$\frac{dp}{dL} = \frac{1}{2 \frac{de^*}{dp} + \omega \frac{dy^*}{dp} - \frac{1}{\beta p_s} - \frac{3}{\pi F''} \frac{1}{((F')^{-1} \left(\frac{p}{\pi} \right))}} < 0$$

Cambios en p por cambios en π

$$L = l^r + l^h + [2e^* + \omega y^*] - \frac{p}{\beta p_s} - 3(F')^{-1} \left(\frac{p}{\pi} \right)$$

$$\frac{d}{d\pi} [L] = 2 \frac{de^*}{d\pi} + \omega \frac{dy^*}{d\pi} - \frac{dp}{d\pi} * \frac{1}{\beta p_s} - 3 \frac{d}{d\pi} [(F')^{-1} \left(\frac{p}{\pi} \right)]$$

$$0 = 2 \frac{de^* dp}{dp d\pi} + \omega \frac{dy^* \phi}{dp d\pi} - \frac{1}{\beta p_s} \frac{dp}{d\pi} - 3 \frac{d}{d\pi} \left[\frac{dp}{d\pi} \right] \frac{1}{F''} \frac{1}{((F')^{-1} \left(\frac{p}{\pi} \right))}$$

Note que:

$$\frac{d}{d\pi} \left[\frac{p}{\pi} \right] = \frac{d}{d\pi} [p\pi^{-1}] = \frac{dp}{d\pi} \pi^{-1} - \pi^{-2} p$$

$$0 = 2 \frac{de^* \phi}{dp d\pi} + \omega \frac{dy^* dp}{dp d\pi} - \frac{1 \phi}{\beta p_s d\pi} - 3 \frac{\frac{dp}{d\pi} \pi^{-1} - \pi^{-2} p}{F''} \frac{1}{((F')^{-1} \left(\frac{p}{\pi} \right))}$$

$$0 = \left[2 \frac{de^*}{dp} + \omega \frac{dy^*}{dp} - \frac{1}{\beta p_s} - \frac{3}{\pi} \frac{1}{F''((F')^{-1}(\frac{p}{\pi}))} \right] \frac{dp}{d\pi} + \frac{3}{\pi^2} \frac{p}{F''((F')^{-1}(\frac{p}{\pi}))}$$

$$\frac{dp}{d\pi} = \frac{\frac{-3}{\pi^2} \frac{p}{F''((F')^{-1}(\frac{p}{\pi}))}}{2 \frac{de^*}{dp} + \omega \frac{dy^*}{dp} - \frac{1}{\beta p_s} - \frac{3}{\pi} \frac{1}{F''((F')^{-1}(\frac{p}{\pi}))}} > 0$$

B. Anexo II

En este anexo se presentan las instrucciones del experimento por cada tipo de jugador

Instrucciones jugador tipo B

ADVERTENCIA: NO TOQUE EL COMPUTADOR HASTA QUE SE LE AVISE

Introducción

Éste es un experimento de toma de decisiones con respecto a un Sistema de Comercio de Emisiones (SCE). Tomar buenas decisiones harán que usted gane una suma de dinero el cual será entregado en efectivo al final del experimento. Este experimento ha sido financiado por (*ente financiador*), y sus decisiones permanecerán completamente anónimas.

Usted va a jugar el rol de un agente emisor de dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_{2\text{-eq}}$) quien será regulado por una autoridad ambiental que establece un objetivo en términos de reducción de emisiones de $\text{CO}_{2\text{-eq}}$ e implementa un SCE para alcanzarlo. Usted debe decidir el volumen de emisiones de $\text{CO}_{2\text{-eq}}$ a emitir en un periodo; y el volumen de permisos de emisiones a comprar para respaldar (compensar) sus emisiones y evitar una sanción por incumplimiento. Esta sanción será determinada por un monitoreo cuya probabilidad de ocurrencia será de su conocimiento. Al inicio del experimento usted recibirá una dotación inicial en unidades monetarias (A) con la que podrá hacer las diferentes transacciones. El objetivo es maximizar sus beneficios en cada periodo, contingente con sus beneficios será su pago en efectivo al final del experimento.

Usted es uno entre tres tipos de agentes regulados. Usted no sabe quiénes son los otros jugadores en el mercado y cómo se desempeñan individualmente. Sus beneficios son estimadas como:

$$\sum_{t=1}^8 B = A_t + \alpha e_t - p_t(l_t - l_t^0) - \pi_t \theta(e_t - l_t) \quad \text{Ecuación 5-1}$$

Donde:

- A_t es la dotación inicial en unidades monetarias en el en el tratamiento t
- e_t es el volumen de emisiones en el tratamiento t
- αe_t es la ganancia en unidades monetarias al emitir e en el tratamiento t
- l_t^0 es la cantidad de permisos asignados de manera gratuita en el periodo del tratamiento t
- p_t es el precio del permiso de emisión en el mercado secundario en el periodo del tratamiento t
- l_t es el número de permisos de emisión al final del periodo del tratamiento t
- $\pi_t \theta(e_t - l_t)$ es la función de penalización en el periodo del tratamiento t

Estructura del mercado

El experimento consta de dos etapas, en la primera, el regulador le asignará una cantidad de permisos de manera gratuita. Después de esta asignación usted tendrá dos minutos para seleccionar e_t . En la segunda etapa usted debe decidir el número de permisos con los que finalizará el periodo (l_t). Para esto usted podrá comprar o vender permisos a los demás jugadores. Usted debe revelar en el software su precio esperado de compra o de venta según sea el caso. La transacción tendrá lugar cuando un comprador acepte una oferta realizada por algún vendedor o un vendedor acepte una licitación realizada por algún comprador. Durante esta etapa usted podrá hacer cambios en las aspiraciones, y de esta manera intercambiar información y poder cerrar tratos.

Sorteo de la auditoria

Al final de cada tratamiento el regulador sorteará la auditoria para verificar el cumplimiento y se sancionará a aquellos jugadores que no cumplieron.

Nota

De acuerdo con el propósito del experimento, es obligatorio no compartir ningún tipo de información (verbal, escrita, gestos, etc.). Por favor, respete estas reglas pues éstas son importantes para el valor científico del experimento. Romper las reglas implica que el grupo involucrado es anulado y sus participantes no reciben pago.

¡¡¡Gracias por unirse a este experimento y haga su mejor esfuerzo!!!

Instrucciones jugador tipo k

ADVERTENCIA: NO TOQUE EL COMPUTADOR HASTA QUE SE LE AVISE

Introducción

Éste es un experimento de toma de decisiones con respecto a un Sistema de Comercio de Emisiones (SCE). Tomar buenas decisiones harán que usted gane una suma de dinero el cual será entregado en efectivo al final del experimento. Usted va a jugar el rol de un productor quien será regulado por una autoridad ambiental que establece un objetivo en términos de capacidad máxima de producción e implementa un SCE para alcanzarlo. Usted debe decidir el volumen a producir de un bien hipotético (y) en un periodo; y el volumen de permisos de emisiones a comprar para respaldar su producción y evitar una sanción por incumplimiento. Esta sanción será determinada por un monitoreo cuya probabilidad de ocurrencia será de su conocimiento. El experimento consta de ocho tratamientos con un solo periodo por tratamiento. Al inicio de tratamiento usted recibirá una dotación inicial en unidades monetarias (A) con la que podrá hacer las diferentes transacciones. El objetivo es maximizar sus beneficios en cada periodo.

Usted es uno entre tres tipos de agentes regulados. Usted no sabe quiénes son los otros jugadores en el mercado y cómo se desempeñan individualmente. Sus beneficios son estimados como:

$$\sum_{t=1}^8 B = A_t + \beta y_t - p_t(l_t - l_t^0) - \pi_t \theta(y_t - l_t) \quad \text{Ecuación 5-2}$$

Donde:

- A_t es la dotación inicial en unidades monetarias en el en el tratamiento t
- y_t es el número de unidades producidas en el tratamiento t
- βy_t es la ganancia en unidades monetarias al producir y_t
- l_t^0 es la cantidad de permisos asignados de manera gratuita en el periodo del tratamiento t
- p_t es el precio del permiso de emisión en el mercado secundario en el periodo del tratamiento t
- l_t es el número de permisos de emisión al final del periodo del tratamiento t

- $\pi_t \theta(y_t - l_t)$ es la función de penalización en el periodo del tratamiento t

Estructura del mercado

El experimento consta de dos etapas, en la primera, el regulador le asignará una cantidad de permisos de manera gratuita l_t^0 , este valor será diferente en cada tratamiento. Después de esta asignación usted tendrá dos minutos para seleccionar e_t . En la segunda etapa usted debe decidir el número de permisos con los que finalizará el periodo (l_t). Para esto usted podrá comprar o vender permisos a los demás jugadores. Usted debe revelar en el software su precio esperado de compra o de venta según sea el caso. La transacción tendrá lugar cuando un comprador acepte una oferta realizada por algún vendedor o un vendedor acepte una licitación realizada por algún comprador. Durante esta etapa usted podrá hacer cambios en las aspiraciones, y de esta manera intercambiar información y poder cerrar tratos.

Sorteo de la auditoria

Al final de cada tratamiento el regulador sorteará la auditoria para verificar el cumplimiento y se sancionará a aquellos jugadores que no cumplieron.

Nota

De acuerdo con el propósito del experimento se requiere no compartir ningún tipo de información (verbal, escrita, gestos, etc.). Por favor, respete estas reglas pues éstas son importantes para el valor científico del experimento. Romper las reglas implica que el grupo involucrado es anulado y sus participantes no reciben pago.

¡¡¡Gracias por unirse a este experimento y haga su mejor esfuerzo!!!

Instrucciones jugador tipo k

ADVERTENCIA: NO TOQUE EL COMPUTADOR HASTA QUE SE LE AVISE

Introducción

Éste es un experimento de toma de decisiones con respecto a un Sistema de Comercio de Emisiones (SCE). Tomar buenas decisiones harán que usted gane una suma de dinero el cual será entregado en efectivo al final del experimento. Usted va a jugar el rol de un actor que tiene proyectos de reducción de emisiones de GEI y podrá ingresar al SCE como oferente de permisos al aplicar

un productor quien será regulado por una autoridad ambiental que establece un objetivo en términos de capacidad máxima de producción e implementa un SCE para alcanzarlo. Usted debe decidir el volumen a producir de un bien hipotético (y) en un periodo; y el volumen de permisos de emisiones a comprar para respaldar su producción y evitar una sanción por incumplimiento. Esta sanción será determinada por un monitoreo cuya probabilidad de ocurrencia será de su conocimiento. El experimento consta de ocho tratamientos con un solo periodo por tratamiento. Al inicio de tratamiento usted recibirá una dotación inicial en unidades monetarias (A) con la que podrá hacer las diferentes transacciones. El objetivo es maximizar sus beneficios en cada periodo.

Usted es uno entre tres tipos de agentes regulados. Usted no sabe quiénes son los otros jugadores en el mercado y cómo se desempeñan individualmente. Sus beneficios son estimados como:

$$\sum_{t=1}^8 B = A - c_t(e) - p_t(l_t^0 - l_t) \quad \text{Ecuación 5-3}$$

Donde:

- A_t es la dotación inicial en unidades monetarias en el en el tratamiento t
- $c_t(e)$ es el costo de reducción de emisiones en el tratamiento t
- l_t^0 es la cantidad de permisos asignados en el periodo del tratamiento t
- p_t es el precio del permiso de emisión en el mercado secundario en el periodo del tratamiento t
- l_t es el número de permisos de emisión al final del periodo del tratamiento t

Estructura del mercado

El experimento consta de dos etapas, en la primera, el regulador le asignará una cantidad de permisos de manera gratuita l_0 , este valor será diferente en cada tratamiento. En la segunda etapa usted debe decidir el número de permisos con los que finalizará el periodo (l_t). Para esto usted podrá vender permisos a los demás jugadores. Usted debe revelar en el software su precio esperado de venta según. La transacción tendrá lugar cuando un comprador acepte su oferta realizada. Durante esta etapa usted podrá hacer cambios en las aspiraciones, y de esta manera intercambiar información y poder cerrar tratos.

Nota

De acuerdo con el propósito del experimento se requiere no compartir ningún tipo de información (verbal, escrita, gestos, etc.). Por favor, respete estas reglas pues éstas son importantes para el valor científico del experimento. Romper las reglas implica que el grupo involucrado es anulado y sus participantes no reciben pago.

¡¡¡Gracias por unirse a este experimento y haga su mejor esfuerzo!!!

C. Anexo III

Encuesta (Usted no tiene que revelar su identidad)			
Perfil demográfico del participante			
Fecha			
Número de la sesión			
Número del jugador			
Sexo del jugador	M:	F:	Otro:
Edad del jugador			
¿Pertenece a una comunidad indígena, raizal, o negritud?			
Perfil socioeconómico del participante			
¿La vivienda en la que usted habita es propia?	SÍ:	NO:	
¿Cuántas personas conforman su núcleo familiar? (incluyéndose a usted)			
¿Cuál es su nivel de ingresos mensual aproximado?			
¿Usted cuenta con trabajo fijo?	SÍ:	NO:	
¿Cuál es el nivel de ingresos mensual aproximado de su núcleo familiar?			
¿Usted tiene hijos?	SÍ:	NO:	
¿Usted está casado/a o tiene alguna unión de hecho?	SÍ:	NO:	
¿Cuál es su nivel educativo?			
De las personas que participaron en esta actividad, ¿con cuántas tiene relaciones de amistad o parentesco?			
Percepción sobre el medio ambiente			

Encuesta (Usted no tiene que revelar su identidad)		
¿Usted entiende a qué se refiere el concepto de Cambio Climático?	SÍ:	NO:
¿Cuál es su percepción respecto al desempeño de la política pública y el gobierno colombiano para combatir el cambio climático?	Favorable:	Desfavorable:
¿Usted cree que sus propias acciones impactan gravemente el medio ambiente?	SÍ:	NO:
¿Usted ha participado en alguna iniciativa o actividad para crear conciencia respecto al cambio climático?	SÍ:	NO:
¿Usted ha participado en alguna iniciativa o actividad para mitigar el cambio climático?	SÍ:	NO:
¿Conoce a alguien cercano que haya sufrido las consecuencias del cambio climático drásticamente?	SÍ:	NO:
¿Cuál cree que es la principal actividad económica que genera mayor impacto sobre el medio ambiente?	SÍ:	NO:
¿Qué aspectos relacionados con el cambio climático y la degradación del medio ambiente le causan mayor preocupación?		
Campo de acción		
En su campo de acción, ¿es usted responsable de tomar decisiones que impactan positiva o negativamente el medio ambiente?	SÍ:	NO:
En su campo de acción, ¿es usted responsable de crear conciencia sobre la degradación del medio ambiente?	SÍ:	NO:
En su campo de acción, ¿es usted responsable de desarrollar políticas para frenar la degradación del medio ambiente?	SÍ:	NO:
¿Cuál es el sector económico en el cual desarrolla su actividad laboral/productiva?		

Percepción sobre el riesgo y autocontrol					
En las siguientes preguntas, por favor asigne una puntuación de 1 a 5, donde: 1 expresa que está TOTALMENTE EN DESACUERDO 5 expresa que está TOTALMENTE DE ACUERDO					
Pregunta	1	2	3	4	5
Usted es una persona a la que le gusta tomar riesgos con frecuencia					
Usted es una persona que recibe asesoría de expertos antes de tomar una decisión que involucre un alto riesgo					
Usted nunca gasta más dinero del que puede permitirse					
Usted generalmente lleva a cabo acciones de las que después se arrepiente					

Bibliografía

- Albin, P. S., & Foley, D. K. (1998). *Barriers and bounds to rationality: Essays on economic complexity and dynamics in interactive systems*. Princeton, NJ: Princeton University Press
- Aldana, F. T. (2003). Nobel 2002: impulso a la teoría económica experimental. *Ciencia Ergo Sum*, 10(2), 213–220.
- Azqueta, D. (2002). *Introducción a la Economía Ambiental*. (McGraw-Hill (ed.)).
- Baranzini, A., van den Bergh, J. C. J. M., Carattini, S., Howarth, R. B., Padilla, E., & Roca, J. (2017). Carbon pricing in climate policy: seven reasons, complementary instruments, and political economy considerations. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 8(4), 1–17. <https://doi.org/10.1002/wcc.462>
- Bodsky, R., Donato, D., James, K., & Porter, D. (2012). Experimental evidence on the properties of the California's cap and trade price containment reserve. *Economic Science Institute, Chapman University, May*, 1–63.
- Burtraw, D., Goeree, J., Holt, C. A., Myers, E., Palmer, K., & Shobe, W. (2009). Collusion in Auctions for Emission Permits: An Experimental Analysis. *Journal of Policy Analysis and Management*, 28(4), 672–691. <https://doi.org/10.1002/pam.20460>
- Burtraw, D., Palmer, K., Burtraw, D., Palmer, K., & Kahn, D. (2005). *Allocation of CO 2 Emissions Allowances Allocation of CO 2 Emissions Allowances in the Regional Greenhouse Gas Cap-and-Trade Program*.
- Cason, T. N. (2010). What can laboratory experiments teach us about emissions permit market design? *Agricultural and Resource Economics Review*, 39(2), 151–161. <https://doi.org/10.1017/S1068280500007218>
- Cason, T. N., Gangadharan, L., & Duke, C. (2003). Market power in tradable emission markets: A laboratory testbed for emission trading in Port Phillip Bay, Victoria. *Ecological Economics*, 46(3), 469–491. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(03\)00187-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(03)00187-3)
- Castañeda, J. A., Arango, S., & Olaya, Y. (2009). Economía experimental en la toma de decisiones en ambientes dinámicos y complejos: Una revisión de diseños y

- resultados. *Cuadernos de Administracion*, 22(39), 31–57.
- Castro-Rodriguez, F., & Arocena, P. (2000). La liberalización de sectores regulados. *Boletín Económico de ICE, Información Comercial Española, ISSN 0214-8307, N° 2640, 2000, Pags. 26-36.*
- Coase, R. H. (1960). The Problem of Social Cost. *The Journal of Law & Economics*, 3, 1–44. <http://www.jstor.org/stable/724810>
- Cong, R.-G., & Wei, Y.-M. (2012). Experimental comparison of impact of auction format on carbon allowance market. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 16, Issue 6). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.049>
- Coria, J., & Sterner, T. (2009). Tradable Permits in Developing Countries: Evidence From Air Pollution in Chile. *The Journal of Environment & Development*, 19. <https://doi.org/10.1177/1070496509355775>
- Coria, J., & Villegas-Palacio, C. (2010). *Targeted Enforcement and Aggregate Emissions With Uniform Emission Taxes*. 455. [http://ideas.repec.org/p/hhs/gunwpe/0455.html%5Cnfile:///D:/Archivos Dropbox/Dropbox/Papers/Coria, Villegas-Palacio/Unknown/Coria, Villegas-Palacio - 2010 - Targeted Enforcement and Aggregate Emissions With Uniform Emission Taxes.pdf](http://ideas.repec.org/p/hhs/gunwpe/0455.html%5Cnfile:///D:/Archivos%20Dropbox/Dropbox/Papers/Coria,%20Villegas-Palacio/Unknown/Coria,%20Villegas-Palacio%20-%202010%20-%20Targeted%20Enforcement%20and%20Aggregate%20Emissions%20With%20Uniform%20Emission%20Taxes.pdf)
- Dobson, S., & Winter, J. (2018). Assessing policy support for emissions-intensive and trade-exposed industries. *The School of Public Policy Publications*, 11(October), 0–47.
- Fell, H., Moore, E., & Morgenstern, R. D. (2011). Cost Containment under Cap and Trade: A Review of the Literature. *International Review of Environmental and Resource Economics*, 5, 285–307. <https://doi.org/10.1561/101.00000044>
- Friedman, D., & Cassar, A. (2004). Economics Lab: An Intensive Course in Experimental Economics. *Journal of Economic Psychology*, 26(5), 785–787. <https://doi.org/10.1016/j.joep.2005.05.001>
- Gilbertson, T., & Reyes, O. (2006). El Mercado de Emisiones: Cómo funciona y por qué fracasa. In *Earth*.
- Holt, C. A., & Shobe, W. M. (2016). Reprint of: Price and quantity collars for stabilizing emission allowance prices: Laboratory experiments on the EU ETS market stability reserve. *Journal of Environmental Economics and Management*, 80(September 2014), 69–86. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2016.01.003>
- ICAP. (2020). *Emission Trading Worldwide: Status Report 2020*. 160.

- IDEAM, PNUD, MADS, & DNP. (2018). *Segundo Reporte Bienal de Actualización de Colombia ante la CMNUCC*. 180. www.minambiente.gov.co; www.co.undp.org
- Ji, X., Li, G., & Wang, Z. (2017). Allocation of emission permits for China ' s power plants: A systemic Pareto optimal method. *Applied Energy*, 204, 607–619. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.033>
- Kemfert, C., Kohlhaas, M., Truong, T., & Protsenko, A. (2006). The environmental and economic effects of European emissions trading. *Climate Policy*, 6(4), 441–455. <https://doi.org/10.1080/14693062.2006.9685612>
- Kerr, S., Montero, J., Lubowski, R., Cadena, A., Londoño, M., Cavallo, A., Lafferty, L., Alarcon, S., Solanilla, A., Rudas, G., Ignacio, L., Macías, L. F., Marín, D., & Palma, M. (2019). *Designing a prototype emissions trading system for Colombia*. April.
- Koten, S. van. (2014). Do emission trading schemes facilitate efficient abatement investments? An experimental study. *Center for Economic Research and Graduate Education*, 1211–3298.
- Kuusela, O.-P., & Lintunen, J. (2020). A Cap-and-Trade Commitment Policy with Allowance Banking. *Environmental and Resource Economics*, 75, 421–455. <https://doi.org/10.1007/s10640-019-00395-y>
- Medina, C. H. (2013). *Guía paso a paso de experimentos en Z-Tree Step by step guide to experiments on Z-Tree*.
- Muller, Andrew, & Mestelman, S. (2016). Emission Trading with Shares and Coupons : A Laboratory Experiment. *The Energy Journal*, 15(2), 185–211.
- Muller, Andrew, & Mestelman, S. (1998). What have we learned from microdatasets. *Managerial and Decision Economics*, 19(4), 225–238.
- Munnings, C., Morgenstern, R. D., Wang, Z., & Liu, X. (2016). Assessing the design of three carbon trading pilot programs in China. *Energy Policy*, 96(2016), 688–699. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.06.015>
- Naegele, H. (2018). Offset Credits in the EU ETS: A Quantile Estimation of Firm-Level Transaction Costs. *Environmental and Resource Economics*, 70(1), 77–106. <https://doi.org/10.1007/s10640-017-0111-1>
- Pang, T., & Duan, M. (2016). Cap setting and allowance allocation in China's emissions trading pilot programmes: special issues and innovative solutions. *Climate Policy*, 16(7), 815–835. <https://doi.org/10.1080/14693062.2015.1052956>
- Partnership for Market Readiness (PMR) e International Carbon Action Partnership

- (ICAP). (2016). *Comercio de Emisiones en la Práctica Manual sobre el Diseño y la Implementación de Sistemas de Comercio de Emisiones*, Banco Mundial.
- Partnership for Market Readiness, & International Carbon Action Partnership. (2016). *Comercio de emisiones en la práctica: manual sobre el diseño y la implementación de sistemas de comercio de emisiones*. 1–211.
<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/23874>
- Perkis, D. F., Cason, T. N., & Tyner, W. E. (2016). An Experimental Investigation of Hard and Soft Price Ceilings in Emissions Permit Markets. *Environmental and Resource Economics*, 63(4), 703–718. <https://doi.org/10.1007/s10640-014-9810-z>
- Perman, R., Ma, Y., McGilvray, J., & Common, M. (2006). Natural Resource and Environmental Economics. In Pearson Education Limited (Ed.), *Current Topics in Medicinal Chemistry* (3rd ed., Vol. 6, Issue 10).
<https://doi.org/10.2174/156802606777323773>
- Pigou, A. C. (1952). The economics of welfare. In *Development* (4th ed.). Macmillian and Co. Limited Published.
- Ríos, R. A., Arango, F., Acevedo-Daunas, R., & Vicentini, V. L. (2013). Estrategias de mitigación y métodos para la estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector transporte. *Banco Interamericano Del Desarrollo*, 1–138.
[https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/3613/Estrategias de mitigación y métodos para la estimación de las emisiones de gases efecto invernadero. En el sector transporte..pdf?sequence=4](https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/3613/Estrategias%20de%20mitigaci3n%20y%20m3todos%20para%20la%20estimaci3n%20de%20las%20emisiones%20de%20gases%20efecto%20invernadero%20en%20el%20sector%20transporte..pdf?sequence=4)
- Rona, N. (2019). Colombia: Impuesto Nacional al Carbono. *Programa EUROCLIMA+*.
https://ledslac.org/wp-content/uploads/2019/09/EdC-Impuesto-al-Carbono-Colombia-ago19-comentarios-RA-_VF-rev.pdf
- Schaeffer, G. J., & Sonnemans, J. (2000). The influence of banking and borrowing under different penalty regimes in tradable green certificate markets-results from an experimental economics laboratory experiment. *Energy and Environment*, 11(4), 407–422. <https://doi.org/10.1260/0958305001500211>
- Smith, V. L. (1976). Economics: Induced Experimental Value Theory. *American Economic Review*, 66(2), 274–279. <http://www.jstor.org/stable/1817233>
- Sousa, R., Álvarez, A. C., Rojas, N., Melo Leon, S. F., Romero, G., Riveros, L., Calderon, S., & Vazao, C. (2018). *Mitigación del cambio climático con un Sistema de Comercio de Emisiones en Colombia: primeros hallazgos económicos*. Archivos de Economía.
<https://www.dnp.gov.co/estudios-y-publicaciones/estudios->

- economicos/Paginas/archivos-de-economia.aspx%0Ahttp://www.dotec-colombia.org/index.php/series/118-departamento-nacional-de-planeacion/archivos-de-economia
- Sterman, J. D. (2000). Business dynamics systems thinking and modeling for a complex world. In *McGraw-Hill higher education*. McGraw- Hill/Irwin.
<https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601336>
- Stranlund, J. K., & Chavez, C. A. (2000). Effective Enforcement of a Transferable Emissions Permit System with a Self-Reporting Requirement. *Journal of Regulatory Economics*, 18(2), 113–131. <https://doi.org/10.1023/A:1008160317757>
- Stranlund, J. K., Murphy, J. J., & Spraggon, J. M. (2011). An experimental analysis of compliance in dynamic emissions markets. *Journal of Environmental Economics and Management*, 62(3), 414–429. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2010.10.010>
- Stranlund, J. K., Murphy, J. J., & Spraggon, J. M. (2014a). Price controls and banking in emissions trading: An experimental evaluation. *Journal of Environmental Economics and Management*, 68(1), 71–86. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2014.04.002>
- Stranlund, J. K., Murphy, J. J., & Spraggon, J. M. (2014b). Price controls and banking in emissions trading: An experimental evaluation. *Journal of Environmental Economics and Management*, 68(1), 71–86. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2014.04.002>
- Tlapanco, H. D. H. (2016). Experimentos en una ciencia no experimental. *Investigación Económica*, 75(295), 31–91. <https://doi.org/10.1016/j.inveco.2016.03.002>
- Trotignon, R. (2012). Combining cap-and-trade with offsets: Lessons from the EU-ETS. *Climate Policy*, 12(3), 273–287. <https://doi.org/10.1080/14693062.2011.637820>
- Vela Ortiz, S. (2005). Marco teórico de la Directiva de Comercio de Emisiones. *Información Comercial Española. Revista de Economía*, 822, 39–50.
- Warglien, M. G. D. M. (2008). El laboratorio y la empresa: ¿una economía experimental aplicada? *Las Nuevas Economías*, 139–154.
- Willer, D., & Walker, H. (2007). Building Experiments: Testing Social Theory. In *Bibliovault OAI Repository, the University of Chicago Press*.
- Zhao, J. (2003). Irreversible abatement investment under cost uncertainties: Tradable emission permits and emissions charges. *Journal of Public Economics*, 87(12), 2765–2789. [https://doi.org/10.1016/S0047-2727\(02\)00135-4](https://doi.org/10.1016/S0047-2727(02)00135-4)