

**MEDICIÓN DE RIESGO FINANCIERO EN EMPRESAS NO FINANCIERAS: UNA
APLICACIÓN AL SECTOR AZUCARERO COLOMBIANO**



STEPHANÍA MOSQUERA LÓPEZ

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE CIENCIAS SOCIALES Y ECONÓMICAS
MAESTRÍA EN ECONOMÍA APLICADA
SANTIAGO DE CALI
2015

**MEDICIÓN DE RIESGO FINANCIERO EN EMPRESAS NO FINANCIERAS: UNA
APLICACIÓN AL SECTOR AZUCARERO COLOMBIANO**

STEPHANÍA MOSQUERA LÓPEZ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
MAGISTER EN ECONOMÍA APLICADA

TUTOR

JORGE MARIO URIBE GIL.

CO-TUTOR

DIEGO FERNANDO MANOTAS DUQUE.

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE CIENCIAS SOCIALES Y ECONÓMICAS
MAESTRÍA EN ECONOMÍA APLICADA
SANTIAGO DE CALI
2015

A Yamileth, Héctor, Juan Felipe y Sergio.

Stephanía Mosquera López

RESUMEN

La medición de riesgo financiero es de gran importancia en la toma de decisiones de las empresas, específicamente en la evaluación de proyectos. Bajo el paradigma tradicional de la evaluación de proyectos, se han utilizado indicadores de factibilidad determinísticos, como el VPN o la TIR. Sin embargo, estos indicadores no tienen en cuenta el carácter estocástico de algunas variables que afectan la rentabilidad del proyecto de inversión. Es necesario tener en cuenta la incertidumbre asociada al comportamiento de variables como los precios de *commodities*, índices de mercado o el tipo de cambio, variables que afectan la operación de la empresa, y por ende condicionan la factibilidad de un determinado proyecto.

En el presente trabajo de grado se realiza una aplicación en el sector azucarero colombiano, de una metodología que aún no ha sido ampliamente explorada en la literatura, para la construcción de un indicador de factibilidad que permita la valoración de proyectos de una manera más robusta, al modelar adecuadamente la incertidumbre. Este indicador es el Valor en Riesgo (VeR), indicador que se construye haciendo uso de técnicas econométricas como la modelación de la volatilidad condicional autoregresiva de las series, así como la modelación multivariada a través de cópulas de las relaciones de dependencia entre éstas y, de la simulación de escenarios mediante técnicas de Monte Carlo.

Esta metodología se aplica a una empresa hipotética del sector azucarero colombiano, sector de gran importancia para la economía del país y de la región. Este sector tuvo una producción en el 2013 de 2,13 millones de toneladas de azúcar, registrando un incremento anual de 2,4% con relación al 2012. Además, el sector azucarero generó más de 180.000 empleos en los primeros eslabones de su cadena productiva.

Se estimó el valor en riesgo de la utilidad bruta operacional, variable de salida que se ve afectada por los factores de riesgo modelados. En este caso, los factores no afectan la totalidad de la utilidad bruta, sino solo aquella parte de ésta que se deriva de las exportaciones. En el caso del ingenio hipotético se supuso un volumen de ventas nacionales y un volumen de exportaciones para construir el VeR. Se encontró así, que el valor en riesgo de la utilidad bruta mensual promedio al 95% de confianza es igual a \$11.642.922.983 pesos colombianos (COP).

Este estudio permite dejar un precedente relevante para la academia y el sector, para trabajos posteriores que cuenten con datos reales y con la orientación adecuada por parte de los empresarios.

Palabras Clave: Mercado Azúcar, Cópulas, TVE, VeR.

ABSTRACT

Financial risk measurement is of great importance in making business decisions, specifically in projects evaluation. Under the traditional paradigm of projects evaluation, academicians and practitioners apply deterministic feasibility indicators, such as the NPV or IRR. However, these indicators do not take into account the stochastic nature of the variables that affect the profitability of the investment project. Thus, it is necessary to consider the uncertainty associated with the behavior of variables such as commodity prices, market indexes or exchange rates. These variables affect the operation of the company, and therefore determine the feasibility of a given project.

In this master thesis a methodology that has not been extensively explored in the literature is applied for the Colombian sugar industry. This methodology allows the construction of a feasibility indicator that permits the evaluation of projects in a more robust manner, due to an adequate modeling of uncertainty. This indicator is the Value at Risk; it is estimated using econometric techniques such as modeling the autoregressive conditional volatility of the series, multivariate modeling of the dependency relationships of the series through copulas, and simulation of scenarios by means of Monte Carlo techniques.

This methodology is applied to a hypothetical company of the Colombian sugar industry. The sugar sector is of great importance for Colombian economy and the region. This sector had a production in 2013 of 2.13 million of sugar tons, and experienced an annual increase in production of 2.4% compared to 2012. The sugar industry has generated more than 180,000 jobs in the first echelons of the productive chain.

We estimated the value at risk (VaR) of the operational gross profit, output variable that is affected by the factors modeled. In this case, the factors do not affect the total gross profit, but only the part of it that is derived from exports. For the hypothetical sugar mill a volume of domestic sales and exports were assumed to build the VaR. As a result, the VaR of the average monthly gross profit at 95% confidence is equal to \$11,642,922,983 COP.

The study provides an important advance for future studies that have real data and the appropriate guidance from entrepreneurs.

Keywords: *Sugar Market, Copulas, EVT, VaR.*

GLOSARIO

AIC: *Akaike Information Criterion* (Criterio de Información de Akaike).

ARIMA: *Autoregressive integrated moving-average model* (modelo autoregresivo de medias móviles integrado).

ASOCAÑA: Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia.

BIQ: *Bayesian information criterion* (Criterio de información bayesiano).

CIAMSA: Comercializadora Internacional de Azúcares y Mieles.

CML: *Capital Market Line* (Línea de Mercado de Capital).

COP: *Colombian Pesos* (Pesos Colombianos).

DCC: *Dynamic conditional correlation* (correlación dinámica condicional).

EBITDA: *Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization* (ingresos antes de intereses, impuestos, depreciaciones y amortizaciones).

EMD: *Empirical Mode Decomposition* (descomposición empírica de modo).

ES: *Expected Shortfall*.

EUA: *European Union Allowances*.

EWMA: *Exponential Weighted Moving Average*.

FEPa: Fondo de Estabilización de Precios del Azúcar.

GARCH: *Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity* (varianza heteroscedástica, condicional y autorregresiva).

GPd: *Generalized Pareto Distribution* (Distribución Pareto Generalizada).

HQC: *Hannan–Quinn Information Criterion* (Criterio de Información de Hannan-Quinn).

HUE: Hipótesis de la Utilidad Esperada.

ICE: *Intercontinental Exchange*.

Incertidumbre: situaciones en las que no es posible asignar una probabilidad objetiva a la ocurrencia de ciertos eventos.

KS: Kolmogorov-Smirnov.

LIFFE: *London International Financial Futures and Options Exchange* (Bolsa Internacional de Futuros y Opciones de Londres).

MS-GARCH: *Markov Switching-Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity*.

PPS: *Portfolio Project Selection* (Selección de Portafolios de Proyectos).

Riesgo: eventos desconocidos a los que se les puede asignar una probabilidad de forma objetiva.

ROI: *Return On Investment* (retorno sobre la inversión).

TIR: Tasa Interna de Retorno.

TRM: Tasa Representativa del Mercado.

TVE: Teoría del Valor Extremo.

VeR: Valor en Riesgo. Medida de la máxima pérdida esperada de un portafolio de activos en un determinado periodo, a un nivel de confianza α dado.

VNM: von Neumann y Morgenstern.

VPN: Valor Presente Neto.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	4
ABSTRACT	5
GLOSARIO	6
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABLAS	11
1 INTRODUCCIÓN	12
1.1. Motivación	12
1.2. Objetivos	12
1.3. Estructura de la Tesis	13
2 CONTEXTO DEL MERCADO DEL AZÚCAR	14
2.1 Mercado de Azúcar Internacional	14
2.1.1 Producción y Precios en el 2013	14
2.1.2 Contratos de Futuros de Azúcar	15
2.2 Mercado del Azúcar Nacional	15
2.2.1 Características del Sector	15
2.2.2 Cadena Productiva del Azúcar, Confitería y Chocolatería en Colombia ...	16
2.2.3 Comportamiento del Sector en el 2013	17
3 MARCO TEÓRICO	20
3.1 Decisiones bajo Incertidumbre	20
3.1.1 Riesgo versus Incertidumbre	20
3.1.2 Modelo de Preferencias sobre los Estados	21
3.1.3 Hipótesis de la Utilidad Esperada	22
3.1.4 Modelo de Media-Varianza	23
3.2 Teoría del Portafolio: Enfoque de Media-Varianza	24
3.2.1 Frontera Eficiente	24
3.3 CAPM-Capital Asset Pricing Model	25
3.3.1 Supuestos	26
3.3.2 Equilibrio en el Mercado	26
3.4 Teoría de la Selección Óptima de un Portafolio de Proyectos	27
4 ESTADO DEL ARTE	30
5 METODOLOGÍA	33
6 DATOS Y ANÁLISIS DESCRIPTIVO	40
7 RESULTADOS	44

8	CONCLUSIONES.....	48
9	DISCUSIÓN Y ESTUDIOS FUTUROS	49
10	REFERENCIAS.....	50
11	ANEXOS.....	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Evolución Precios Contratos No. 11 y No.5.....	15
Figura 2.2 Estructura de la Cadena Productiva de Azúcar, Confitería y Chocolatería ..	17
Figura 2.3 Mercado Interno de Azúcar, 2012-2013.....	18
Figura 2.4 Composición de las Exportaciones 2011, 2012, 2013	19
Figura 3.1 Modelos para la Toma de Decisiones bajo Incertidumbre	21
Figura 3.2 Trade-off Riesgo y Retorno	23
Figura 3.3 Frontera Eficiente	25
Figura 3.4 Principales Características del Problema de PPS.....	28
Figura 3.5 Metodología General para Seleccionar un Portafolio de Proyectos	29
Figura 5.1 Proceso de Construcción del Modelo.....	33
Figura 6.1 Precios del Contrato No. 05	40
Figura 6.2 Precios del Contrato No. 11	41
Figura 6.3 TRM.....	41
Figura 6.4 Retornos de los Precios del Contrato No. 05.....	42
Figura 6.5 Retornos de los Precios del Contrato No. 11.....	42
Figura 6.6 Retornos TRM	43
Figura 7.1 Valor en Riesgo al 95% de la Utilidad Bruta Mensual Promedio, Millones de Pesos Colombianos	47

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Principales Países Productores de Azúcar, 2011-2013.....	14
Tabla 5.1 Cópulas Bivariadas	36
Tabla 6.1 Estadísticas Descriptivas Retornos de los Factores de Riego	43
Tabla 7.1 Prueba de Raíz Unitaria Aumentada de Dickey-Fuller.....	44
Tabla 7.2 Parámetros TVE y Estadístico KS	45
Tabla 7.3 Tabla Resumen de las Cópulas Ajustadas a los Datos y Criterios de Selección	45
Tabla 7.4 Información Hipotética de un Ingenio.....	46

1 INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

La medición del riesgo financiero para la selección óptima de proyectos de inversión dentro de las empresas hace parte de sus labores y objetivos, pues de una adecuada escogencia depende su rentabilidad. Es por esta razón, que el estudio de la selección óptima de alternativas de inversión es un tema de interés por parte de empresarios y académicos. Tradicionalmente, desde la ingeniería económica y las finanzas corporativas, se han utilizado modelos e indicadores que permiten determinar la factibilidad de los proyectos de inversión de las empresas. Los indicadores más utilizados son el Valor Presente Neto (VPN), la tasa interna de retorno (TIR), la tasa interna de retorno modificada, el valor esperado de los flujos de caja futuros, entre otros.

Sin embargo, esta aproximación a la medición del riesgo financiero¹ dentro de las empresas es totalmente determinística, ya que no tiene en cuenta el carácter estocástico de algunas variables que afectan la rentabilidad de los proyectos. De esta manera, el presente trabajo de grado tiene como objetivo aplicar una nueva metodología en la evaluación proyectos, que permita tomar decisiones de inversión con base en valoraciones más robustas.

Para esto se emplean técnicas econométricas que actualmente no han sido ampliamente utilizadas en la literatura, para la modelación adecuada de las variables claves dentro de las estructuras financiera y operativa de las empresas. Tales técnicas son la modelación estocástica de la volatilidad a través de modelos de volatilidad condicional autoregresiva de las series, así como la modelación multivariada a través de cópulas de las relaciones de dependencia entre estas series, que permiten la construcción robusta de un indicador de la factibilidad de un proyecto de inversión de la empresa, como lo es el Valor en Riesgo (VeR) y el *Expected Shortfall* (ES).

La metodología aplicada busca tener en cuenta el carácter no determinístico de variables tanto internas como externas a la empresa, que afectan su rentabilidad. Variables tales como los precios internacionales de los *commodities*, las tasas de mercado referenciales, o el tipo de cambio. Esta metodología se aplica a una empresa del sector azucarero colombiano, sector de gran importancia para la economía del país y de la región.

1.2. Objetivos

Objetivo General

Desarrollar y aplicar herramientas metodológicas que permitan la medición efectiva del riesgo financiero, para la selección óptima de proyectos bajo incertidumbre, en el sector azucarero colombiano.

¹ A lo largo del documento se utiliza el término Riesgo Financiero para referirse a: riesgo financiero de la empresa producto de su exposición al riesgo de mercado.

Objetivos Específicos

- Definir y estudiar las variables de insumo y de salida relevantes en el modelo de evaluación de riesgo de la empresa.
- Determinar y estimar las relaciones de dependencia entre los factores de riesgo (variables de insumo).
- Calcular el VeR y el ES de la variable de salida relevante para la empresa.

1.3. Estructura de la Tesis

El trabajo de investigación realizado está estructurado de la siguiente manera:

- **Capítulo 2:** se presenta un resumen del contexto del mercado de azúcar a nivel internacional y nacional.
- **Capítulo 3:** se expone el marco teórico relevante en el contexto de la selección óptima portafolios de inversión y de proyectos.
- **Capítulo 4:** se presenta el estado del arte a nivel internacional y nacional sobre modelación del riesgo en sectores financieros y no financieros.
- **Capítulo 5:** se describe la metodología aplicada a una empresa del sector azucarero, metodología basada en lo propuesto por Uribe, Ulloa y Manotas (2015).
- **Capítulo 6:** se realiza un análisis descriptivo de los datos utilizados en la aplicación empírica de la metodología.
- **Capítulo 7:** se presentan los resultados obtenidos de la construcción del indicador de factibilidad relevante para la empresa.
- **Capítulo 8:** se concluye el estudio realizado.
- **Capítulo 9:** se realiza una breve discusión de los resultados encontrados, y se presentan posibilidades de estudios futuros, que permitan la construcción de indicadores de factibilidad todavía más robustos.
- **Capítulo 10:** se presentan las referencias bibliográficas.
- **Capítulo 11:** por último, se presentan los anexos del trabajo de investigación.

2 CONTEXTO DEL MERCADO DEL AZÚCAR

2.1 Mercado de Azúcar Internacional

2.1.1 Producción y Precios en el 2013

El mercado mundial de *commodities* en el año 2013 se caracterizó por presentar una caída en los precios como resultado de la contracción en la demanda, debido principalmente a la reducción en la tasa de crecimiento de las economías asiáticas. Por el contrario, en los años 2011 y 2012 los precios fueron altos, lo que generó un aumento en la oferta de *commodities* en el 2013.

Específicamente en el mercado de azúcar, en el año 2013, la producción mundial fue de 173 millones de toneladas y, los inventarios crecieron un 11%, lo que generó también presión a la baja en los precios internacionales.

Aproximadamente 100 países intervienen en la producción mundial de azúcar, pero la producción en 2013 estuvo concentrada en 10 de ellos, que presentaron una participación del 77,81% en la producción mundial. Los tres países que presentaron la mayor producción en este año fueron Brasil (34,6%), India (28,6%) y la Unión Europea (19,2%). La participación de Colombia fue sólo del 1,15%, razón por la que Colombia es un país tomador de precios en este mercado. (Ver Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Principales Países Productores de Azúcar, 2011-2013
Millones de Toneladas Métricas

País	2011/2012	2012/2013	Participación 2012/2013
Brasil	34,6	40,9	22,35%
India	28,6	27,3	14,92%
Unión Europea	19,2	17,6	9,62%
China	12,5	14,2	7,76%
Tailandia	10,7	10	5,46%
Estados Unidos	10,4	10,7	5,85%
México	5,3	7,4	4,04%
Pakistán	5,2	5,4	2,95%
Rusia	5,5	4,6	2,51%
Australia	3,6	4,3	2,35%
10 mayores	135,6	142,4	77,81%
Colombia	2,3	2,1	1,15%
Otros	36,8	38,5	21,04%
Total	174,7	183	100%

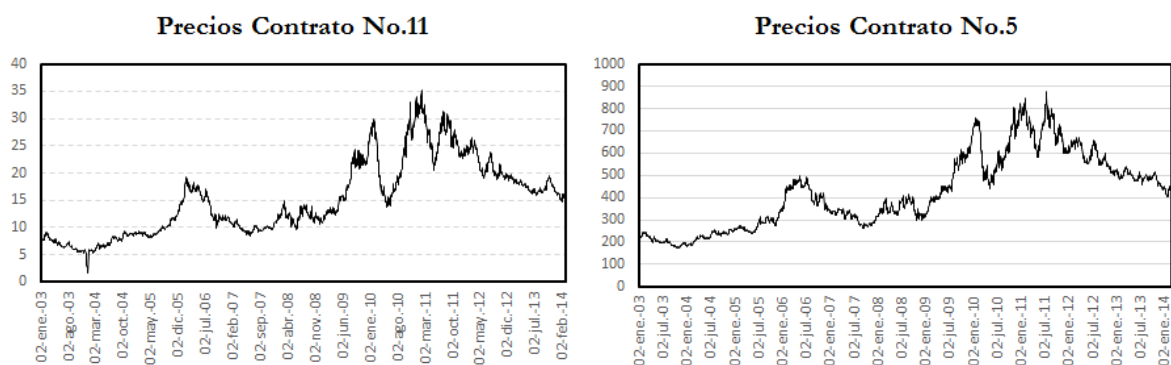
Fuente: Organización Internacional del Azúcar- Quarterly Market Outlook
Feb 2014 (ISO, 2014)

2.1.2 Contratos de Futuros de Azúcar

En las bolsas de valores de Nueva York y Londres se realizan la mayor parte de las transacciones internacionales de contratos de futuros de azúcar, negociaciones que determinan su precio internacional. En el mercado bursátil de Nueva York se negocia azúcar crudo bajo el contrato No.11, mientras que en el mercado de Londres se negocia azúcar blanco bajo el contrato No.5.

En el 2012 el precio promedio de los contratos No. 11 fue de 476,20 USD/ton, mientras que en el 2013 fue de 385,38 USD/ton, registrando una disminución del 19,07%. En el 2012 el precio promedio de los contratos No.05 fue de 588,12 USD/ton y en el 2013 fue de 490 USD/ton, presentando una caída del 16,68%. En la Figura 2.1 se presenta la evolución de los precios diarios de ambos contratos desde enero de 2003 hasta febrero de 2014.

**Figura 2.1 Evolución Precios Contratos No. 11 y No.5
Enero 2003 – febrero 2014**



Fuente: elaboración propia con datos de Bloomberg.
Contrato No.11 USDcen/lb; Contrato No.05 USD/ton

2.2 Mercado del Azúcar Nacional

2.2.1 Características del Sector

El azúcar en el país se produce a partir de procesos agroindustriales que extraen la sacarosa de la caña de azúcar. Según Cenicaña, en el 2013 el área sembrada en caña de azúcar en el Valle geográfico fue de 225.560 hectáreas. El cultivo se encuentra en 47 municipios del norte del Cauca, Valle del Cauca, Risaralda, Caldas y Quindío. El 76% de las tierras sembradas son propiedad de aproximadamente 2.700 cultivadores de caña, mientras que el 24% es propiedad de los ingenios de la región. La región tiene un total de 13 ingenios: Incauca, Carmelita, La Cabaña, Lucerna, Manuelita, María Luisa, Mayagüez, Pichichi, Providencia, Riopaila-Castilla, Risaralda, San Carlos y Tumaco.

Algunos de estos ingenios además de producir azúcar también producen alcoholes, bagazo, energía eléctrica, abonos, mieles vírgenes, jugos, melazas y preparaciones alimenticias. Adicionalmente, en el país se venden 4 tipos de azúcar: crudo, blanco, blanco especial y refinado.

La oferta de azúcar en el corto plazo es altamente inelástica, pues ésta depende de los

contratos de suministros de caña de azúcar entre ingenios y proveedores, contratos que se realizan a mediano plazo. Por tanto, la oferta nacional no responde rápidamente ante cambios en la demanda y en los niveles de importación.

Es por esta razón, que el sector requiere de mecanismos que protejan los ingresos de los productores ante cambios en los precios internacionales, mecanismos que se han hecho todavía más importantes ante la inminente entrada del país en los mercados globales a través de tratados de libre comercio. En el país se tienen dos políticas públicas que buscan garantizar el abastecimiento nacional de azúcar, el Sistema Andino de Franjas de Precios y el Fondo de Estabilización de Precios del Azúcar (FEPA).

El Sistema Andino de Franjas de Precios fue establecido desde el año 1994 favoreciendo a varios sectores agrícolas del país, entre éstos al sector azucarero, y a los consumidores. El sistema es un esquema arancelario que beneficia a los consumidores cuando el precio del bien es alto en los mercados internacionales, pues el arancel aplicado a las importaciones disminuye. Por el contrario, cuando los precios internacionales son bajos el arancel aplicado sube, favoreciendo a los productores nacionales (ASOCAÑA, 2013).

El FEPA fue creado en el año 2000 y es un instrumento que funciona en forma de cámara de compensación, administrado por Asocaña. El Fondo cobra cesiones de estabilización a los productores y exportadores que venden el azúcar en el mercado a un precio por encima del precio de referencia del FEPA. Por el contrario, el Fondo paga compensaciones cuando el precio de mercado es inferior a su precio de referencia².

Estos dos mecanismos también favorecen a los productores de panela, pues el azúcar y la panela son bienes sustitutos cuando el diferencial de precios es alto. Bajos niveles en los precios del azúcar afectan negativamente a las más de 350.000 familias cuyo sustento es la actividad panelera, puesto que los consumidores sustituyen la panela por azúcar o se realizan actividades ilícitas como derretir azúcar para producir panela.

Por último, es importante resaltar la participación de la Comercializadora Internacional de Azúcares y Mieles S.A (CIAMSA) en el sector. CIAMSA es una comercializadora privada que le brinda a los ingenios sus servicios comerciales y logísticos para la exportación de productos. En ocasiones los ingenios contratan a CIAMSA o a otras comercializadoras exclusivamente como operadores logísticos, por lo que la comercializadora no corre ningún riesgo cambiario o de precios internacionales, pues es el ingenio quien lo asume. En otras oportunidades, CIAMSA realiza la operación comercial asumiendo en este caso los riesgos dentro de la operación comercial. Cabe aclarar que generalmente las transacciones de azúcar se realizan en bolsas de futuros, lo que mitiga en parte el riesgo del precio.

2.2.2 Cadena Productiva del Azúcar, Confitería y Chocolatería en Colombia

La producción de azúcar en Colombia hace parte de la cadena productiva de Azúcar, Confitería y Chocolatería. Las producciones de azúcar y de cacao hacen parte de los

² El precio de referencia del FEPA se calcula como un promedio ponderado de los diferentes precios a los que los ingenios venden el azúcar en un determinado mes.

primeros eslabones de la cadena.

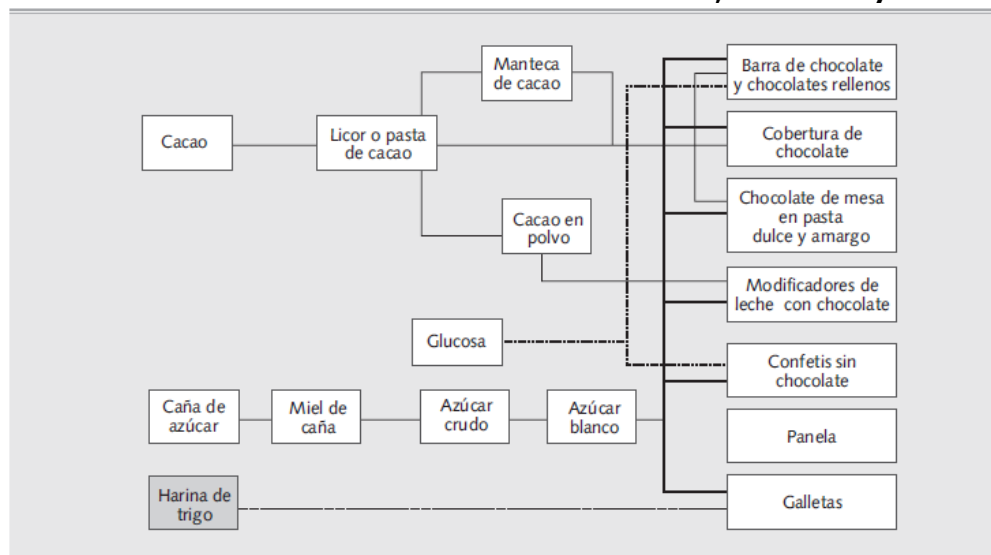
El proceso productivo del azúcar inicia con la extracción de sacarosa, sustancia que se puede obtener de la caña de azúcar o de la remolacha azucarera. En el país, como se mencionó anteriormente, la sacarosa se obtiene de la caña.

Este proceso llevado a cabo por los productores de caña consta de cinco pasos. A continuación se explica cada uno brevemente (DNP, 2004):

- Paso 1: se pica la caña en molinos para extraer la sacarosa, obteniendo el bagazo y el jugo bruto. El bagazo no continúa en el proceso productivo, pero éste se puede usar como materia prima en la producción de papel o como combustible industrial.
- Paso 2: se clarifica y se filtra el jugo bruto para separarlo de la cachaza. La cachaza es usada como abono en las plantaciones.
- Paso 3: se pasa el jugo por los evaporadores y se obtiene jarabe, que pasa al tacho donde se cristaliza la sacarosa.
- Paso 4: se separan los cristales de los cristales de miel utilizando centrífugas. En este paso se obtiene el azúcar crudo, que puede ser vendido o continuar en el proceso.
- Paso 5: se refina y se seca el azúcar crudo para la obtención de azúcar blanco y refinado.

Los anteriores pasos corresponden a 4 de los 16 eslabones que comprenden la cadena productiva (Ver Figura 2.2).

Figura 2.2 Estructura de la Cadena Productiva de Azúcar, Confitería y Chocolatería



Fuente: Cadenas Productivas Estructura, Comercio Internacional y Protección (DNP, 2004).

2.2.3 Comportamiento del Sector en el 2013

La economía colombiana creció un 4,3% en el 2013, específicamente el sector agropecuario tuvo un crecimiento del 5,2%, debido principalmente al mejoramiento de las condiciones climáticas del país. Este sector representó el 6,21% del PIB y el 17%

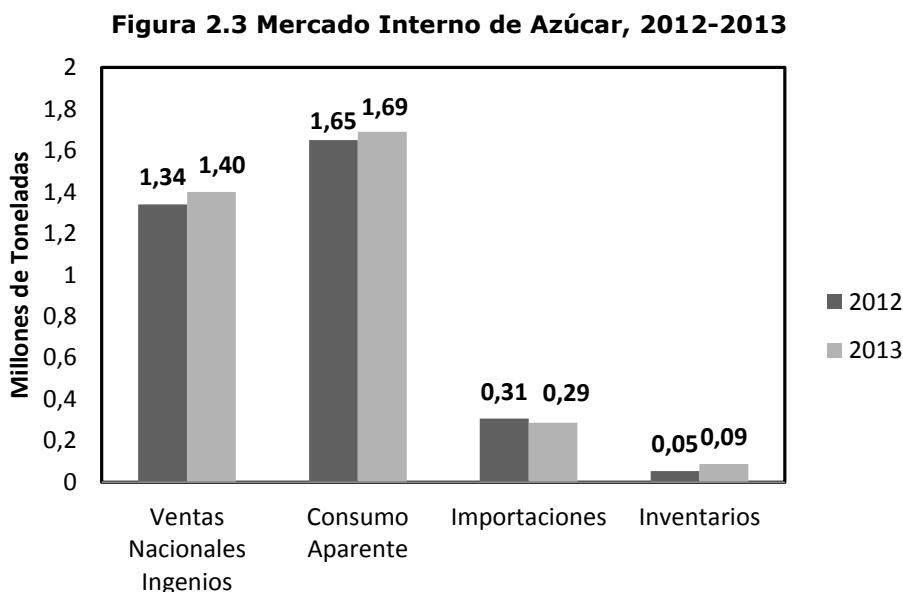
en la participación en la generación de empleo en el país, de ahí la relevancia del sector para la economía colombiana (ASOCAÑA, 2014).

Sin embargo, en años más recientes los ingresos de los productores del sector agropecuario se han visto afectados negativamente por diversos factores que influyen en su competitividad. Entre estos factores se encuentra que Colombia ha tenido una menor devaluación real de su moneda, en comparación con países competidores como Brasil. La falta de infraestructura vial y ferroviaria, y los altos precios de los insumos también han afectado negativamente la competitividad del agro colombiano.

En cuanto al mercado de azúcar del país, este sector tuvo una producción en el 2013 de 2,13 millones de toneladas de azúcar, registrando un incremento anual de 2,4% con relación al 2012. El sector azucarero genera más de 180.000 empleos en los primeros eslabones de su cadena productiva.

El consumo nacional fue de 1,65 millones de toneladas, registrando un incremento del 2,6% con relación al consumo registrado en el 2012. El 84,84% del consumo fue abastecido por los productores nacionales, que incrementaron sus ventas en un 4,6% en este año, y el 15,16% restante fue abastecido por importaciones de azúcar.

El volumen de importaciones en 2013 fue de 286.974 toneladas y los inventarios crecieron significativamente debido al alto volumen importado. Los inventarios pasaron de 54.000 toneladas en 2012 a 87.000 toneladas en 2013, presentando un incremento del 60,5% (ASOCAÑA, 2014).

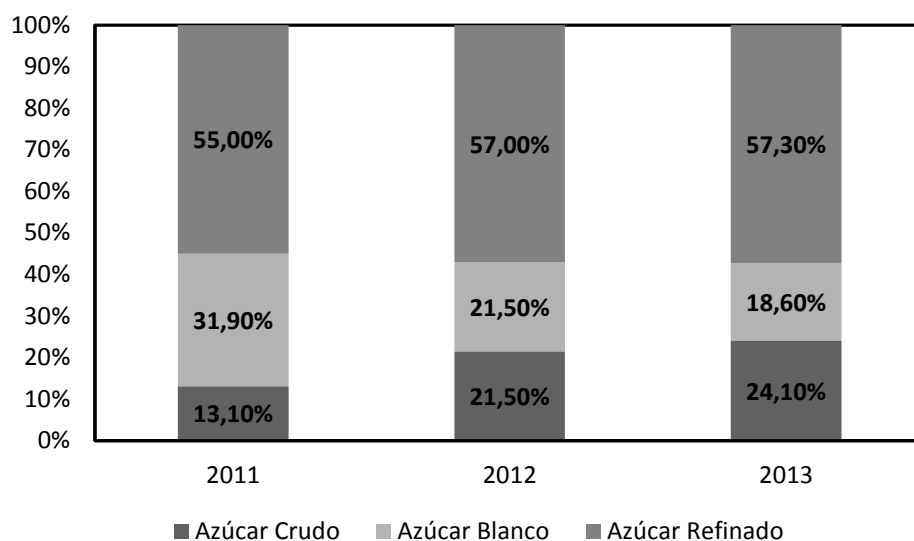


Fuente: elaboración propia con datos del Informe Anual Asocaña, (2014)

El volumen de exportaciones disminuyó en un 6,7%, pasando de 720.569 toneladas en 2012 a 672.198 toneladas en 2013. Los principales destinos de exportación fueron Perú (18,23%), Chile (16,74%), Haití (13,36%), Estados Unidos (6,84%), Costa de Marfil (6,25%), Canadá (5,67%) y Tunicia (4,93%) (ASOCAÑA, 2014).

La composición de las exportaciones en 2013 fue de 24,1% de azúcar crudo, 18,6% de azúcar blanco y 57,3% de azúcar refinado (Ver Figura 2.4).

Figura 2.4 Composición de las Exportaciones 2011, 2012, 2013



Fuente: elaboración propia con datos del Informe Anual Asocaña, (2014)

Por último, es importante resaltar que el sector del azúcar en Colombia se caracteriza también por su generación de energía eléctrica y de bioetanol. La cogeneración de energía eléctrica es de suma importancia en la operación agroindustrial del país. En 2013 la capacidad instalada de cogeneración del sector azucarero fue de 187 MV y, se espera que esta capacidad aumente a 360 MV en 2017. Además, el sector vendió a la Red de Interconexión Eléctrica Nacional un total de 50 MV. En cuanto a la producción de bioetanol, en 2013 se registró la mayor producción con 397,9 millones de litros (ASOCAÑA, 2014).

3 MARCO TEÓRICO

La toma de decisiones bajo incertidumbre es un tópico que ha sido ampliamente estudiado en la literatura de la economía financiera. Específicamente, se ha estudiado el problema de la selección óptima de portafolios, donde el primer modelo de diversificación eficiente fue propuesto por Markowitz (1952). Él fue laureado posteriormente junto a William F. Sharpe y Merton H. Miller con el Premio Nobel en Ciencias Económicas por sus trabajos en economía financiera.

La diversificación eficiente permite a los inversionistas obtener un portafolio que maximice sus retornos esperados dado un nivel de riesgo, o minimice el riesgo dado un nivel de retorno esperado. En las secciones 3.1, 3.2 y 3.3 se expone la teoría del portafolio tomando como base lo presentado en Bailey (2005).

Uno de los supuestos de la teoría de media-varianza de Markowitz es que los retornos se distribuyen siguiendo una distribución gaussiana. Sin embargo, existe evidencia empírica de que en la mayoría de los casos los retornos de las series financieras no se distribuyen siguiendo este tipo de distribución, por el contrario presentan colas pesadas y son leptocúrticas. De esta manera, el supuesto del modelo es bastante restrictivo.

Lo anterior se evidencia aún más cuando el objetivo es seleccionar un portafolio de proyectos, y no de activos financieros. En este contexto se ha demostrado que el criterio de media-varianza no es apropiado para la selección de un portafolio óptimo de proyectos. En la sección 3.4 se presenta la teoría y algunos aspectos metodológicos de este problema, partiendo de las siguientes características de los proyectos de inversión que los diferencian de los activos financieros:

- Los proyectos no son divisibles.
- Los proyectos del sector real tienen relacionados más criterios de decisión.
- Los proyectos de inversión son usualmente irreversibles.

3.1 Decisiones bajo Incertidumbre

3.1.1 Riesgo versus Incertidumbre

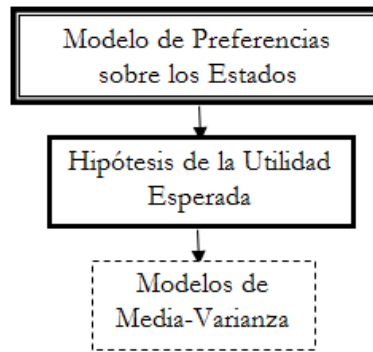
Es relevante diferenciar entre riesgo e incertidumbre. Knight (1921) define el riesgo como eventos desconocidos a los que se les puede asignar una probabilidad de forma objetiva (p.e. un juego de azar). Por el contrario, la incertidumbre se presenta cuando no es posible asignar una probabilidad objetiva a la ocurrencia de ciertos eventos. Los eventos en presencia de incertidumbre no se pueden repetir de forma controlada, es decir no tienen frecuencias relativas (por ejemplo una guerra, el cambio climático).

Siguiendo a Bailey (2005) se supone que aunque los inversionistas se encuentran en situaciones de incertidumbre ante muchos de los estados de la naturaleza, ellos toman decisiones como si asignaran probabilidades ante eventos inciertos. Las probabilidades que asignan las construyen con base a sus creencias, es decir son grados subjetivos de sus expectativas. Lo anterior se cumple si los agentes actúan de acuerdo al conjunto de axiomas expuesto en la sección 3.1.3.

De esta manera, el estudio de las decisiones bajo incertidumbre en el análisis financiero se encuentra en un punto intermedio entre el cálculo de probabilidades de ocurrencia de eventos a partir de datos históricos, y la imposibilidad de realizar predicciones de eventos inciertos.

A continuación se presentan tres modelos que han sido propuestos para el estudio de la toma de decisiones de portafolio financiero bajo incertidumbre. Se presentan del más general al más específico (Ver Figura 3.1). El modelo de la hipótesis de la utilidad esperada puede interpretarse como un caso especial del modelo de preferencias sobre los estados de la naturaleza. A su vez el modelo de media-varianza es un caso específico del modelo de la hipótesis de la utilidad esperada.

Figura 3.1 Modelos para la Toma de Decisiones bajo Incertidumbre



Fuente: elaboración propia.

3.1.2 Modelo de Preferencias sobre los Estados

Esta aproximación se basa en los siguientes tres aspectos:

- **Estados del Mundo:** existen l posibles estados del mundo, donde cada estado es representado por un evento particular S_k , tal que los l eventos están representados por:

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_l\}$$

- **Acciones:** denotadas por a , describen los aspectos relevantes de las decisiones que son tomadas antes de que el estado del mundo se materialice.
- **Consecuencias:** denotadas por c , expresan el resultado de una acción correspondiente a cada estado del mundo.

Las consecuencias de cada acción están representadas por $c = f(S_k, a)$. Así, $f(\cdot)$ mapea la cantidad de activos comprados (acciones) con el pago de cada uno de éstos en cada estado del mundo (consecuencias). El pago de cada uno de los activos determina la riqueza final del inversionista en el estado k , denotada por W_k .

El modelo de preferencias sobre los estados supone que cada inversionista tiene una función de utilidad con la que jerarquiza las consecuencias de sus acciones. Por tanto, cada agente tiene una función de utilidad expresada por:

$$U = U[f(s_1, a), f(s_2, a), \dots, f(s_l, a)] \quad (3.1)$$

El problema del inversionista consiste en maximizar su utilidad escogiendo una acción factible, es decir, adquiriendo un portafolio que sea comprable con su riqueza inicial (A). La restricción presupuestaria, o su restricción de riqueza inicial está dada por:

$$p_1x_1 + p_2x_2 + \dots + p_nx_n = A \quad (3.2)$$

Donde x_i denota las unidades del activo i compradas y p_i es su precio.

Si v_{ki} es el pago que genera el activo i si se materializa el estado del mundo k , la riqueza en el estado k es igual a:

$$W_k = v_{k1}x_1 + v_{k2}x_2 + \dots + v_{kn}x_n = f(s_k, a) \text{ con } k = 1, 2, \dots, l \quad (3.3)$$

De esta manera, el problema del inversionista se reduce a escoger $x_1, x_2, \dots, x_n$ para maximizar $U = U(W_1, W_2, \dots, W_l)$ sujeto a $p_1x_1 + p_2x_2 + \dots + p_nx_n = A$. En palabras, se tiene como resultado una decisión de portafolio donde las cantidades de riqueza invertidas en cada activo dependen de las preferencias de los agentes y de su riqueza inicial.

Este modelo es útil desde una perspectiva teórica, sin embargo es difícil generar hipótesis falseables a partir de él, por lo que la teoría se ha especializado al restringir el rango de preferencias con las cuales los inversionistas toman sus decisiones (Bailey, 2005).

3.1.3 Hipótesis de la Utilidad Esperada

Una forma en el que la literatura de la teoría del portafolio ha restringido el rango de preferencias con las cuales los inversionistas toman sus decisiones es mediante la Hipótesis de la Utilidad Esperada (HUE), planteada por Von Neumann Morgenstern (2007).

El modelo de la HUE asigna a cada estado del mundo una probabilidad de ocurrencia de acuerdo a las creencias de los inversionistas. El modelo permite realizar una distinción entre las creencias de los agentes sobre el estado del mundo que se va a materializar, y las preferencias de cómo los agentes ordenan las consecuencias de diferentes acciones (Bailey, 2005).

La HUE parte de que los agentes actúan de acuerdo a los siguientes axiomas:

- **Irrelevancia de las consecuencias comunes:** los agentes solo deciden sobre el subconjunto de estados para los cuales las consecuencias de una acción difieren.
- **Preferencias son independientes de las creencias:** las preferencias de los agentes no cambian según el estado del mundo en el que se ubiquen.
- **Creencias son independientes de las consecuencias:** la percepción de un agente de la probabilidad de ocurrencia de un estado del mundo no va a cambiar de acuerdo a si las consecuencias de ese estado son o no favorables para él.

El cumplimiento de estas características y de los axiomas de las preferencias en presencia de incertidumbre, implican que: i) los agentes actúan como si una probabilidad se asignará a cada evento; ii) existe una función de utilidad VNM que solo

depende de los pagos finales; iii) los agentes organizan sus acciones de acuerdo al valor esperado de la función VNM (Bailey, 2005).

Así, los agentes realizan acciones de tal forma que se maximice la utilidad esperada:

$$E[u(w)] = \pi_1 u(W_1) + \pi_2 u(W_2) + \dots + \pi_l u(W_l) \quad (3.4)$$

Donde π_k es la probabilidad que el inversionista le asigna a la materialización del estado S_k .

3.1.4 Modelo de Media-Varianza

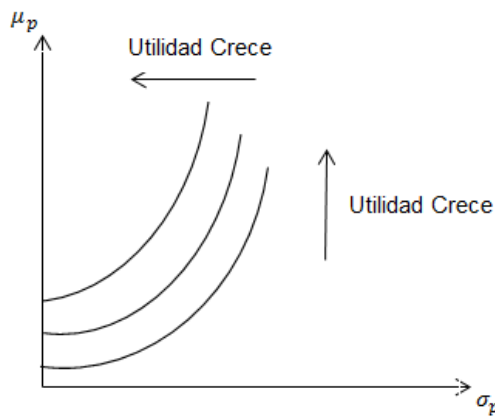
El modelo fue introducido por Markowitz (1952) para hacer más específico la hipótesis de la utilidad esperada. Si se supone una función de utilidad $U(\cdot)$ cuadrática en la riqueza, la utilidad esperada puede ser escrita como una función del valor esperado de la riqueza final (media) y la varianza de ésta, expresión que facilita el análisis de portafolios óptimos (Bailey, 2005).

$$E[u(W)] = f(E[w], \text{var}[w]) \quad (3.5)$$

Muchas veces el problema de media-varianza se expresa en términos de la tasa esperada de retorno de la riqueza, es decir en términos de $r_p = (W - A)/A$, con $\mu_p = E[r_p]$ y $\sigma_p^2 = E[(r_p - \mu_p)^2]$. El criterio de media varianza será entonces igual a $G(\mu_p, \sigma_p^2)$, donde σ_p^2 representa el riesgo del portafolio.

Para representar el *trade-off* entre riesgo y retorno, se supone que $G(\mu_p, \sigma_p^2)$ es creciente en μ_p y decreciente en σ_p^2 (Figura 3.2).

Figura 3.2 Trade-off Riesgo y Retorno



Fuente: Bailey (2005).

Una ventaja del modelo de media-varianza es que no requiere de supuestos adicionales a los del modelo de la hipótesis de la utilidad esperada. Además, el modelo es aplicable empíricamente puesto que requiere solo de la estimación de medias y

varianzas. Sin embargo, lo anterior es altamente restrictivo, pues al suponer que las variables pueden describirse enteramente por sus dos momentos muestrales (se distribuyen normal), se ignoran aspectos importantes como el sesgo y la curtosis de la distribución de los retornos.

3.2 Teoría del Portafolio: Enfoque de Media-Varianza

La teoría del portafolio se basa en el modelo de media-varianza para la construcción de portafolios óptimos. Cada inversionista actúa de acuerdo al objetivo de media-varianza, de tal forma que escoge un portafolio que maximiza:

$$G = G(\mu_p, \sigma_p^2) \quad (3.6)$$

Sujeto a la restricción presupuestaria de que el valor inicial de los activos no puede superar su riqueza inicial. Los valores de μ_p y σ_p^2 para los que G es constante se denominan curvas de indiferencia.

Siguiendo a Bailey (2005), el problema de selección óptima de portafolio puede dividirse en dos etapas:

1. Se construye una frontera de portafolio en las que se ubican aquellos portafolios para los que se minimiza σ_p^2 para cada μ_p .
2. Se escoge un portafolio de los que se encuentran en la frontera tal que se maximice la función objetivo, G , de acuerdo a las preferencias de cada inversionista.

La relevancia empírica del modelo radica en que la estimación de la media y la varianza se realiza, en la mayoría de los casos, con base en la información histórica de los precios. Se supone que todos los agentes tienen acceso a la misma información y, por tanto sus estimaciones de media y varianza son iguales.

3.2.1 Frontera Eficiente

El problema de optimización para construir el conjunto de portafolios eficientes con n activos riesgosos y un activo libre de riesgo (bono o cuenta bancaria) es el siguiente:

El agente debe escoger la proporción del portafolio invertida en cada activo, es decir escoger $a_0, a_1, \dots, a_n$, donde $a_j = p_j x_j / A$, tal que minimice:

$$\sigma_p^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j \sigma_{ij} \quad (3.7)$$

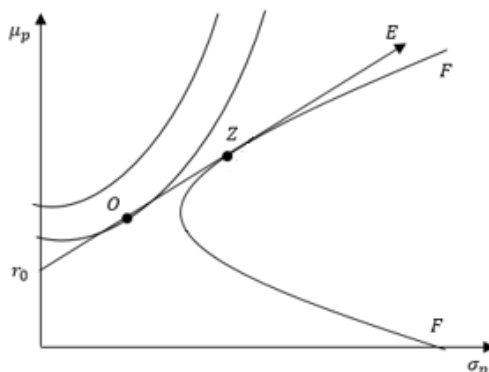
donde σ_{ij} es la covarianza entre el retorno del activo i y el retorno del activo j , sujeto a:

$$\mu_p = a_0 r_0 + \sum_{j=1}^n a_j \mu_j \quad (3.8)$$

donde r_0 es el retorno del activo libre de riesgo.

De esta manera, la frontera eficiente representa todas las combinaciones de riesgo y retorno que son óptimas para la inversión. Es decir, son producto del proceso de optimización planteado anteriormente, donde se minimiza el riesgo de un portafolio sujeto a un nivel de retorno dado, o de manera dual se maximiza el nivel de retorno esperado de un portafolio financiero sujeto a un determinado nivel de riesgo (Ver Figura 3.3).

Figura 3.3 Frontera Eficiente



Fuente: Bailey (2005)

En la medida en que se presenten mayores oportunidades de diversificación en la inversión financiera, será posible desplazar hacia la izquierda la frontera eficiente de los activos riesgosos, lo cual se debe a que la correlación de los nuevos activos financieros en el mercado con los originalmente disponibles, será menos que perfecta.

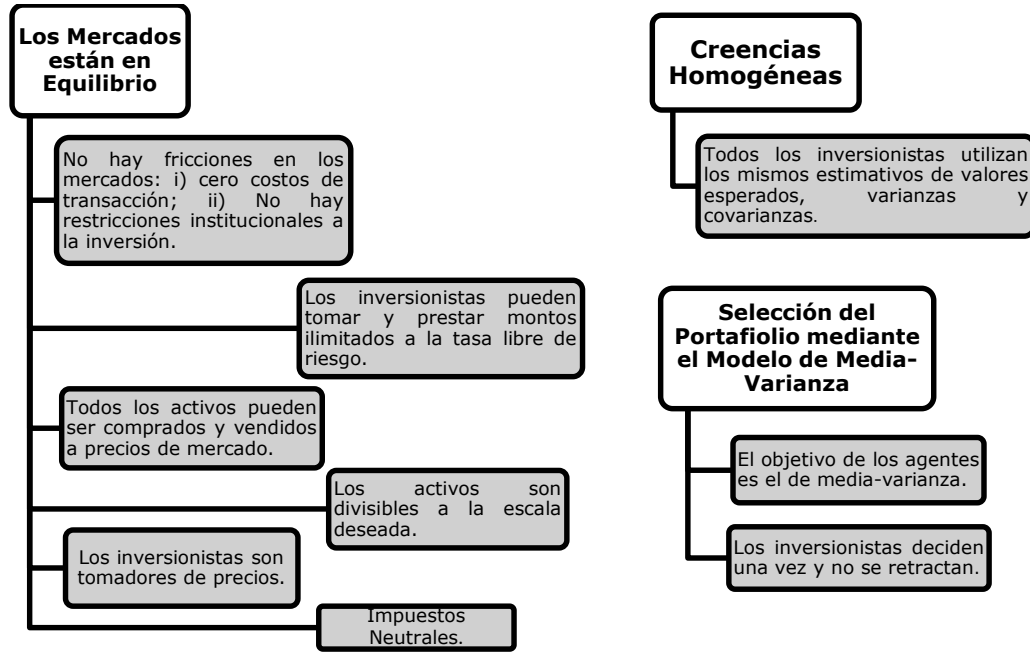
Es importante resaltar que aunque la frontera eficiente es la misma para todos los individuos, las curvas de indiferencia son distintas, pues éstas dependen de la actitud frente al riesgo de los agentes. Por tanto, el punto de corte entre las curvas de indiferencia y la frontera eficiente varía entre inversionistas.

3.3 CAPM-Capital Asset Pricing Model

El CAPM es un modelo de valoración de activos financieros, propuesto originalmente por William F. Sharpe (1964), premio Nobel de Economía en 1990. Este modelo proporciona una predicción de la relación entre el riesgo de un activo y su rentabilidad esperada, permitiendo así tener una tasa de rendimiento de referencia para evaluar posibles inversiones, y realizar previsiones en cuanto a la rentabilidad esperada de activos que aún no se han negociado en el mercado. En otras palabras, proporciona una explicación de la prima por riesgo, $\mu_j - r_0$, donde el primer término es el retorno esperado del activo j y, el segundo es la rentabilidad del activo libre de riesgo.

El CAPM es una extensión del modelo de media-varianza para un solo inversionista al mercado completo. Así, es un modelo de equilibrio en el sentido tradicional (Oferta de Activos = Demanda de Activos).

3.3.1 Supuestos



3.3.2 Equilibrio en el Mercado

De Bailey (2005), la condición que define el portafolio de equilibrio para cada inversionista es:

$$\frac{\mu_j - r_0}{\beta_{jZ}} = \mu_Z - r_0 \quad (3.9)$$

donde $\beta_{jZ} = \sigma_{jZ} / \sigma_Z^2$, para $j=1,2,\dots, n$. Además Z denota el portafolio eficiente de solo activos riesgosos.

Sean $z_1, z_2, \dots, z_n$ las proporciones de cada activo riesgoso dentro del portafolio Z, con $\sum_{j=1}^n z_j = 1$ y $z_0 = 0$, β_{jZ} debe ser el mismo para todos los inversionistas por el supuesto de creencias homogéneas. Consecuentemente, z_j también debe ser el mismo.

Se tienen en el mercado $i=1,2,\dots,m$ inversionistas. El valor de la tenencia del inversionista i del activo j es igual a $z_j \beta_i$, donde β_i es el valor total de las tenencias del inversionista i.

Así, debe cumplirse que el valor total de equilibrio del activo j (oferta) es igual al valor del activo j demandado por todos los inversionistas:

$$p_j X_j = \sum_{i=1}^m z_j B_i = z_j \sum_{i=1}^m B_i = z_j B \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, n \quad (3.10)$$

donde $p_j X_j$ es el valor total de mercado del activo j , y B es el valor de todas las tenencias de activos riesgosos.

De esta manera, el equilibrio de mercado implica:

$$z_j = \frac{p_j X_j}{B} = m_j \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, n \quad (3.11)$$

Los precios en el mercado se ajustan de forma tal que la proporción de cada activo riesgoso en el portafolio de cada inversionista, iguala al total de la participación de ese activo en el mercado. Es decir, z_j es igual a la proporción del activo j en el portafolio de mercado (m_j).

El portafolio de mercado (M) es aquel para el cual el valor de cada activo se mantiene en proporción con su valor de mercado. Todos los inversionistas tienen a M como su portafolio riesgoso óptimo, y solo difieren en la cantidad invertida en él comparada con la inversión en el activo libre de riesgo.

De la ecuación fundamental del CAPM en términos del portafolio de mercado M se tiene que:

$$\frac{\mu_j - r_0}{\beta_j} = \mu_M - r_0 \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, n \quad (3.12)$$

Reorganizando esta predicción del modelo se obtiene:

$$\mu_j = r_0 + (\mu_M - r_0)\beta_j \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, n \quad (3.13)$$

La ecuación (14) se le conoce como la **Ecuación del CAPM** y puede interpretarse como: i) μ_j es una función de r_0 y μ_M , dado β_j ; ii) μ_j es una función de β_j , dados r_0 y μ_M (Bailey, 2005).

Es importante resaltar que β_j es una medida de la sensibilidad del activo j a los factores sistemáticos o de mercado. Así, el CAPM predice que la prima por riesgo de un activo es proporcional al beta, es decir, al riesgo sistemático del mercado.

3.4 Teoría de la Selección Óptima de un Portafolio de Proyectos

La teoría de la selección óptima de portafolios de proyectos parte de la teoría de portafolios de activos financieros expuesta anteriormente, para estudiar el problema de seleccionar diferentes posibilidades de inversión en proyectos dada una restricción presupuestaria.

El problema de la selección de portafolios de proyectos (PPS por sus siglas en inglés) ha sido un tema altamente estudiado en la literatura de la ingeniería industrial. Lo anterior se debe a que es de gran importancia para muchas organizaciones en su rentabilidad la selección óptima y manejo de proyectos. Los proyectos pueden ser de todo tipo, desde la investigación y desarrollo de nuevos productos hasta la

implementación de nuevos procesos y servicios. Usualmente, se tienen más proyectos disponibles para ser elegidos que los que se pueden financiar.

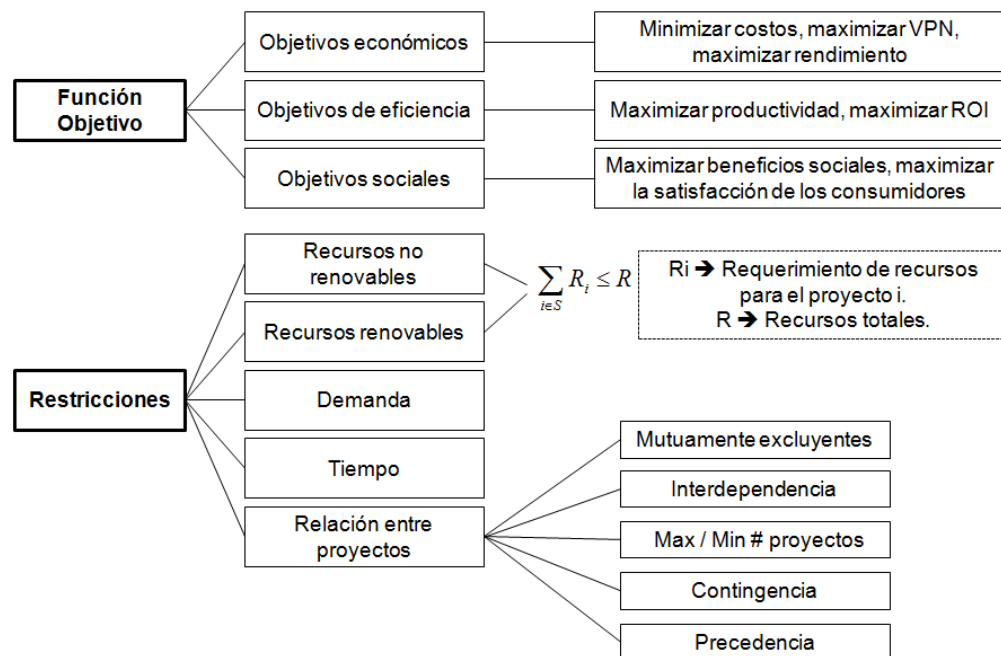
El problema de PPS puede ser expresado como un proceso de selección de un subconjunto de proyectos de un conjunto más grande de proyectos alternativos, con el propósito de maximizar su retorno, teniendo en cuenta las restricciones presupuestarias. $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ denota una colección de proyectos alternativos, a cada proyecto alternativo le corresponde un conjunto de X objetivos o metas. Una función $P \rightarrow R$ mapea el resultado del proyecto P_i en la meta x .

El conjunto de potencia de P es denotado por $2^P = \{\emptyset, \{p_1\}, \dots, \{p_n\}, \{p_1, p_2\}, \dots, \{p_1, \dots, p_n\}\}$. Suponiendo un conjunto Q , tal que $Q \in 2^P$, se tiene que Q contiene todas las posibles soluciones factibles. Para un portafolio factible S ($S \in Q$) su valor objetivo en la meta x es $O_x(S)$. Así, el modelo básico del problema de PPS se puede escribir de la siguiente manera:

$$\text{Optimizar } O(S) = (O_1(S), O_2(S), \dots, O_x(S)) \text{ sujeto a } S \in Q \quad (3.14)$$

En la Figura 3.4 se presentan las principales características del problema de PPS derivadas de la optimización planteada en la ecuación (3.16).

Figura 3.4 Principales Características del Problema de PPS



Fuente: Manotas (2013).

En Archer y Ghasemzadeh (1999) los autores proponen una metodología para la selección del portafolio de proyectos óptimo para una empresa. Los autores proponen dividir el problema en tres fases: 1) consideraciones estratégicas; 2) evaluación individual de cada proyecto; 3) selección del portafolio.

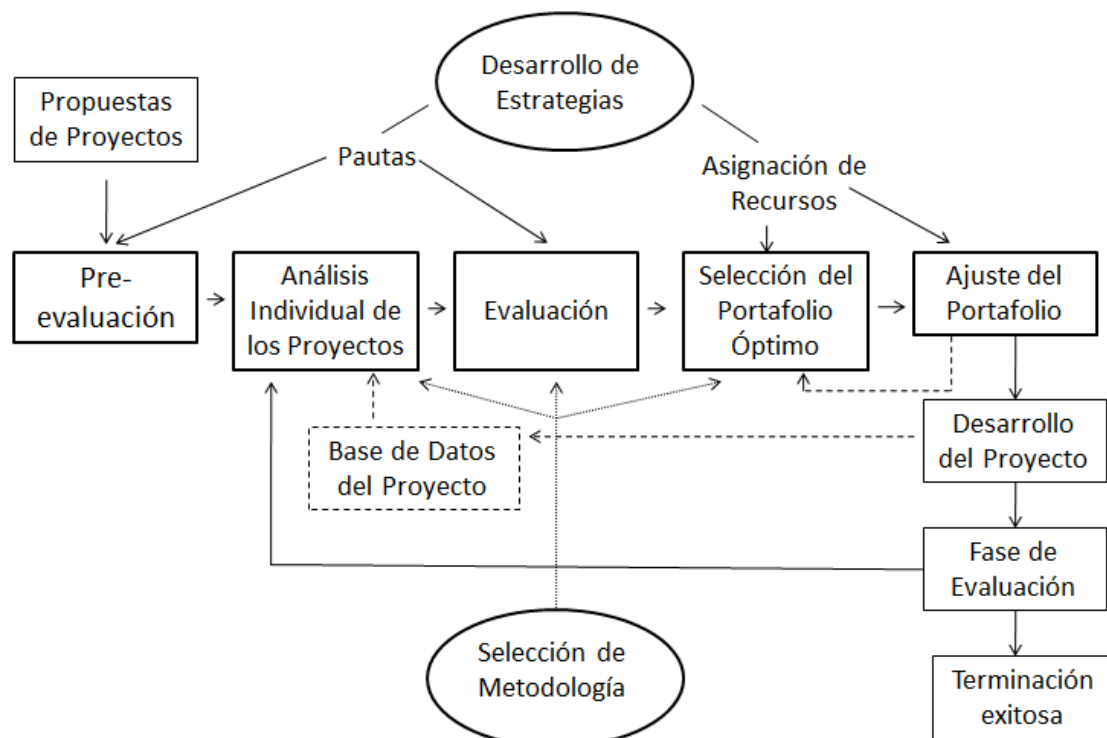
La etapa de consideraciones estratégicas se basa en la determinación de un objetivo estratégico y de un presupuesto financiero para el portafolio. Esta evaluación estratégica se llama a cabo de acuerdo a factores externos e internos de la empresa.

En la segunda etapa, se evalúan los proyectos de manera independiente, para determinar cuál es la contribución en términos de retornos de cada proyecto. Para llevar a cabo esta fase, en la literatura se utilizan distintos métodos como los del retorno económico (VPN, TIR, uso del modelo CAPM), técnicas costo-beneficio, medición del riesgo asociado a cada proyecto, y estudios de mercado.

En la tercera etapa se busca seleccionar el portafolio a partir de un ranking de los proyectos. Lo anterior se realiza a partir de comparaciones simultáneas, como la comparación de parámetros de los proyectos y la interacción entre ellos. Algunas de las técnicas utilizadas para seleccionar el portafolio óptimo son: aproximación mediante el uso de perfiles; aproximaciones comparativas; modelos de puntajes por criterios; matrices de portafolios; modelos de optimización entera.

En la Figura 3.5 se ilustra la metodología general para seleccionar un portafolio de proyectos propuesta por Archer y Ghasemzadeh (1999).

Figura 3.5 Metodología General para Seleccionar un Portafolio de Proyectos



Fuente: Archer y Ghasemzadeh (1999).

4 ESTADO DEL ARTE

El paso desde un mundo determinístico hacia un ambiente de decisiones bajo incertidumbre (estocástico), ha sido ampliamente explorado en la literatura económico-financiera tradicional en el contexto de los modelos de valoración de activos como los propuestos por Markowitz (1952, 1959), Black (1972), Sharpe (1964), o los modelos en tiempo continuo basados en movimientos geométricos brownianos, tal y como son planteados por Merton (1992).

Por otra parte, su incorporación dentro de otros ámbitos en la gestión de la empresa, más allá del manejo óptimo de los portafolios de inversión de los que ésta disponga, ha sido también variada, pero más reciente. Muchas de las técnicas disponibles actualmente en la literatura para lograr este objetivo son condensadas en trabajos como los realizados por Mun (2008) y King y Wallace (2012), quienes presentan aplicaciones de la programación estocástica a diversos ámbitos de operación de la empresa. Éstos incluyen el análisis de crédito, el análisis de deuda, la valoración de derivados exóticos, el pronóstico de variables claves de operación, la valoración de proyectos de bioingeniería, entre otros.

Específicamente, propuestas para el análisis y modelación de la incertidumbre en el contexto de la selección óptima de proyectos de las empresas, sobre la que se basa esta investigación, se presentan en estudios como los de Manotas (2009) y Manotas y Toro (2009). El primero realiza un análisis óptimo de la selección económica de proyectos bajo incertidumbre y, en el segundo los autores proponen el concepto de VPN en riesgo, como una extensión natural del VeR, con aplicaciones al sector azucarero.

Sin embargo, la aplicación de técnicas econométricas avanzadas para la construcción de indicadores de factibilidad robustos, mediante la modelación de la incertidumbre, para la evaluación de proyectos aún es muy incipiente en la literatura. En Uribe *et al.* (2015), los autores proponen una metodología para la construcción de un indicador de factibilidad de este tipo. Este indicador es el VeR, indicador que construyen los autores haciendo uso técnicas econométricas como la modelación de la de volatilidad condicional autoregresiva de las series, así como la modelación multivariada a través de cópulas de las relaciones de dependencia entre éstas y, de la simulación de escenarios mediante técnicas de Monte Carlo. Los autores aplican su metodología empíricamente a una empresa exportadora del sector aurífero colombiano.

En cuanto a la aplicación de técnicas econométricas avanzadas y de ingeniería financiera para la modelación del riesgo (más no en el contexto de selección óptima de proyectos de inversión) se ha tenido una alta productividad en la literatura reciente. La mayoría de los artículos están encaminados en modelar el riesgo mediante la construcción de un VeR, con aplicación en los precios de la electricidad, en los permisos de emisión de carbono (EUA por sus siglas en inglés) o en precios de derivados.

Xiong y Zou (2014) realizan una revisión de la literatura de metodologías para modelar la volatilidad de los precios de la electricidad. En general, se encuentran en la literatura cuatro enfoques para la modelación de la volatilidad de distintas series de precios,

estos son: el enfoque paramétrico, el enfoque no paramétrico, el enfoque semi-paramétrico y el enfoque computacional.

El enfoque paramétrico requiere de supuestos sobre la distribución estadística que siguen los datos. Las metodologías más utilizadas dentro de este enfoque son los modelos GARCH (varianza heteroscedástica, condicional y autorregresiva) y el cálculo del VeR con la metodología EWMA (*Exponential Weighted Moving Average*) propuesta por RiskMetrics. Chevallier (2011), Feng, Zou, y Wei (2011), Zhang, Yang, y Zhang (2013), Hai y Yang (2014) modelan la volatilidad en los precios del carbono (EUAs) mediante este enfoque. En cuanto a los precios de la electricidad, Cifter (2013) también los modela con una aproximación paramétrica.

El enfoque no paramétrico se basa en los datos históricos o en simulaciones para medir el riesgo, por lo que es de fácil implementación. Dentro de este enfoque se encuentran las técnicas de Simulación Histórica y Simulación de Monte Carlo. En Manotas (2009) se hace uso de este enfoque para medición del riesgo de variables de interés en una empresa de servicios públicos.

El enfoque semi-paramétrico no requiere de supuestos estrictos sobre la distribución de los datos, pero mantiene las ventajas de los métodos paramétricos más utilizados. Los trabajos de Feng, Wei y Wang (2012), Wang y Wang (2014), Yang y Lin (2011) se encuentran dentro de este enfoque. Los autores hacen uso de modelos GARCH, TVE (Teoría del Valor Extremo) y cópulas para modelar la volatilidad de los precios los precios del carbono, de la electricidad y de futuros de caucho.

El enfoque computacional se basa en técnicas de análisis de Fourier, análisis Wavelet y descomposición empírica de modo (EMD por sus siglas en inglés). Yang y Lin (2011) y Wang, He, y Zou (2014) también aplican algunas de estas técnicas.

La metodología utilizada en esta investigación radica en el enfoque semi-paramétrico. Se considera un enfoque adecuado porque los factores de riesgo tienen una frecuencia diaria. Los hechos estilizados de las series financieras, como agrupaciones de volatilidad y colas pesadas, se tienen en cuenta por el uso de modelos ARIMA-DCC-GARCH y teoría de valor extremo. Sin embargo, los efectos de los factores de riesgo no deben cuantificarse por separado, ya que están correlacionados (lineal y no linealmente). Por lo tanto, el co-movimiento de los factores es lo que debe ser considerado. El uso de cópulas permite modelar la distribución multivariada de los factores de riesgo, con el fin de obtener sus relaciones de dependencia.

De esta manera, la contribución de este estudio es la aplicación de técnicas econométricas avanzadas, que a pesar de que se han explorado en otras áreas de aplicación, no se han utilizado en la medición de riesgos financieros para la evaluación de factibilidad de proyectos de inversión, evaluaciones que se hacen con indicadores robustos como el valor en riesgo³.

En cuanto a la modelación de la incertidumbre, más no aplicada al contexto de la

³ Es importante resaltar que más allá de un aporte metodológico, el presente estudio busca un aporte aplicado al sector azucarero, ilustrando mediante el caso de estudio de una empresa la forma en que los factores de riesgo más relevantes dentro de la operación financiera de ésta pueden ser incorporados en la toma de decisiones. Lo anterior, implica el análisis específico de un sector económico, que permita adaptar las metodologías de riesgo de mercado existentes a un contexto empresarial nacional.

empresa, se encuentran los trabajos de Uribe y Ulloa (2011) y Uribe (2011) que se encuentran dentro del enfoque semi-paramétrico. Estos autores identifican varias técnicas de medición del riesgo financiero, basados en distintas aproximaciones estadísticas, como las cópulas y la TVE.

Por último, dentro de la literatura se encuentran estudios como el de Abken (2000), en el cual se calcula un VeR para portafolios de inversión mediante simulación de escenarios. Esta simulación se realiza con la metodología de Monte Carlo, con el objetivo de incorporar la incertidumbre y factores de riesgo que afectan el portafolio.

En el Anexo 11.1 se presenta un cuadro resumen de los artículos anteriormente mencionados, haciendo énfasis en el tipo de enfoque que llevan a cabo los autores para la modelación del riesgo.

En el Anexo 11.2 se presenta una comparación de los artículos mencionados. La comparación se lleva a cabo para analizar las metodologías que se han utilizado en la literatura de interés. Las metodologías más utilizadas para la modelación del riesgo son los modelos ARMA-GARCH y la teoría del valor extremo, metodologías utilizadas en el presente trabajo. En cuanto al uso de cópulas en el contexto del sector no financiero, éstas son sólo utilizadas en Zhang, Yang y Zhang (2013). Sin embargo, el trabajo no es aplicado en el contexto de evaluación de proyectos. Las cópulas también son aplicadas en Uribe y Ulloa (2011), Uribe (2011) y Uribe *et al.* (2015), artículos tomados como referencia metodológica en el presente trabajo.

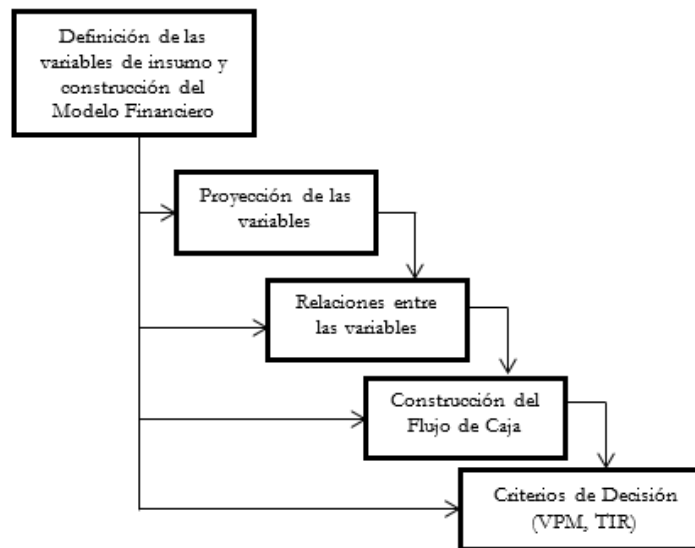
5 METODOLOGÍA

Seguando a Manotas (2009) la construcción del modelo de evaluación de riesgo de una empresa comienza con la definición de las variables de insumo, las cuales condicionarán los resultados factibles del modelo. Las variables de insumo pueden ser externas (macroeconómicas, de mercado, sectoriales, etc.) o internas (políticas de inventarios, niveles de eficiencia, asuntos de producción, etc.).

Además, se debe determinar una variable de salida la cual es endógena a la empresa, como los ingresos, egresos, EBITDA (*Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation, and Amortization*), etc. Esta variable se escoge de acuerdo a su exposición a los factores de riesgo, es decir a las variables insumo.

Posteriormente es necesario establecer las relaciones entre las variables, con lo cual será posible definir los flujos de caja futuros del proyecto. Una vez conocido el flujo de caja es posible implementar criterios de decisión tales como el VPN, la TIR, la TIR modificada, entre otros (ver Figura 5.1).

Figura 5.1 Proceso de Construcción del Modelo



Fuente: tomado de Manotas (2009)

En el presente estudio se tendrán en cuenta factores de riesgo externo, específicamente macroeconómico y financiero. Por ejemplo, el tipo de cambio, precios *spot* y futuros de *commodities*. Para determinar la relación entre los factores de riesgo se sigue la metodología expuesta por McNeil, Frey, y Embrechts (2005) obteniendo la relación entre éstos mediante el uso de TVE y cópulas.

La aplicación de cópulas, TVE y técnicas tradicionales en la econometría de series de tiempo, como lo son los modelos autoregresivos de medias móviles integrados (ARIMA), para el pronóstico de factores de riesgo, en la evaluación de proyectos fue propuesto por Uribe *et al.* (2015). Esta propuesta se basa en que el manejo óptimo de la incertidumbre requiere de la identificación y cuantificación de las exposiciones al riesgo que tiene la empresa mediante técnicas econométricas apropiadas.

El primer paso para establecer las relaciones entre las series de los factores de riesgo es filtrar los retornos logarítmicos para considerar algunos de los hechos estilizados de las series financieras, como la heterocedasticidad y autocorrelación, y haciendo uso de modelos ARIMA-DCC (correlación dinámica condicional)-GARCH.

Siguiendo a Engle (2002) los retornos tienen la siguiente forma:

$$r_t = f((r_t|\Psi_{t-1})) + \varepsilon_t \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (5.1)$$

donde $f(\cdot)$ es una función ARMA y Ψ_t es el conjunto de información disponible en el período t .

Además la matriz de varianza-covarianza condicional entre los retornos está dada por:

$$H_t = Var(\varepsilon_t|\Psi_{t-1}) \quad (5.2)$$

donde H_t es una matriz simétrica y positiva definida.

De esta manera, si $h_{ij,t}$ denota al elemento ij de H_t y r_{it} denota al elemento i -ésimo de los retornos r_t , entonces la correlación entre r_{it} y r_{jt} está dada por la ecuación (5.3):

$$\rho_{ij,t} = \frac{h_{ij,t}}{\sqrt{h_{ii,t}h_{jj,t}}} \quad (5.3)$$

con $\rho_{ij,t} \in [-1,1]$ y cada elemento de la diagonal de H_t sigue un proceso GARCH univariado propuesto por Engle (1982) y Bollerslev (1986):

$$h_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^q \alpha_i \varepsilon_{t-1}^2 + \sum_{j=1}^p \beta_j h_{t-j} \quad (5.4)$$

donde $\alpha_0 > 0$; $\alpha_i, \beta_j \geq 0, i = 1, \dots, q, j = 1, \dots, p$; $\sum_{i=1}^q \alpha_i + \sum_{j=1}^p \beta_j < 1$ para cada una de las series $i = 1, \dots, N$.

Así, la matriz de varianza-covarianza condicional, H_t , puede escribirse de la siguiente manera:

$$H_t = D_t P_t D_t \quad (5.5)$$

donde D_t es la matriz de varianza y es igual a $diag\{h_{11,t}^{1/2}, \dots, h_{NN,t}^{1/2}\}$ y P_t es la matriz de correlaciones dinámicas condicionales.

La estimación de los parámetros del modelo se realiza mediante el método de cuasimáxima verosimilitud en dos etapas: primero, se estima la matriz de varianzas condicionales y, segundo, se estima la matriz de correlaciones condicionales.

Una vez estimada la matriz de varianza-covarianza condicional dinámica, se obtienen los residuales estandarizados que son iguales a z_t , donde:

$$z_{i,t} = \frac{\varepsilon_{it}}{\sqrt{h_{ii,t}}} \quad \forall i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (5.6)$$

Una vez las series sean filtradas se construye una pseudo-muestra para cada una, con la que se estiman las distribuciones marginales y de densidad de las series mediante un enfoque semiparamétrico basado en la TVE. Esta estimación de las distribuciones marginales y de densidad también considera el hecho estilizado de que las series financieras usualmente tienen funciones de distribución con colas pesadas.

Así, la pseudo-muestra es igual a:

$$F_i(z_i) = u_i \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (5.7)$$

$F_i(\cdot)$ se estima semiparamétricamente: en la parte central se estima una función de distribución empírica y se usa la metodología de la TVE de picos sobre el umbral (POT por sus siglas en inglés) para estimar los parámetros de las colas (McNeil *et al.*, 2005).

La metodología de POT plantea que las observaciones extremas, es decir, los retornos que se encuentran en las colas, siguen una Distribución Pareto Generalizada (GPD por sus siglas en inglés), expuesta en la ecuación (5.8) (siguiendo a Fisher y Tippet (1928) y a Gnedenko (1943)):

$$G_{\xi,\beta}(x) = \begin{cases} 1 - (1 + \xi x/\beta)^{-1/\xi} & \text{si } \xi \neq 0 \\ 1 - \exp(-x/\beta) & \text{si } \xi = 0 \end{cases} \quad (5.8)$$

donde β es un parámetro de escala, ξ es un parámetro de las colas y $x = z_i - v_i$; donde z_i son los residuales estandarizados obtenidos en la ecuación (5.6) y v_i es el umbral escogido. En el presente estudio se utiliza un umbral del 95 por ciento (5 por ciento).

Para determinar si la pseudo-muestra, u_i , se ajusta de manera adecuada a los datos se estima el estadístico de Kolmogorov-Smirnov (KS), con el cual se prueba si u_i se distribuye de manera uniforme entre cero y uno.

Posteriormente, se procede a determinar las relaciones de dependencia entre las series mediante cópulas. Formalmente, una cópula de dimensión N , es una función de distribución en $[0,1]^N$ con distribuciones marginales uniformes estándar. Sea $C(u) = C(u_1, \dots, u_N)$, donde C es una función de distribución estándar (dfs por sus siglas en inglés) multivariada que es una cópula, se tiene que $C: [0,1]^N \rightarrow [0,1]$ (McNeil *et al.*, 2005).

Para entender la importancia de las cópulas en el estudio de datos multivariados es importante remitirse al teorema de Sklar. Este plantea que toda función de distribución multivariada contiene cópulas y, toda cópula puede ser usada junto con su dfs univariada para construir dfs multivariadas (McNeil *et al.*, 2005). En otras palabras, el teorema plantea que si F es la función de distribución conjunta con marginales

$F_1, \dots, F_N$, entonces existe una cópula tal que para todo $z_i \in \mathbb{R} = [-\infty, \infty], i = 1, \dots, N$, se cumple que:

$$F(z_1, \dots, z_N) = C(F_1(z_1), \dots, F_N(z_N)) \quad (5.9)$$

De esta manera si $C(\cdot)$ existe, esta función contiene toda la estructura de dependencia de las series.

En el presente estudio se hace uso de cinco tipos de cópulas. En la siguiente tabla se presentan las funciones cópulas y sus parámetros, para el caso bivariado⁴.

Tabla 5.1 Cópulas Bivariadas

Nombre de la Cópula	Función Cópula	Parámetros
<i>Clayton</i>	$\left\{ \left[(u_1^{-\theta} - 1)^\delta + (u_2^{-\theta} - 1)^\delta \right]^{1/\delta} + 1 \right\}^{-1/\theta}$	$\theta \in (0, \infty)$
<i>Gumbel</i>	$\exp \left\{ - \left[(-\log[u_1])^\theta + (-\log[u_2])^\theta \right]^{1/\theta} \right\}$	$\theta \in [1, \infty)$
<i>Frank</i>	$-\frac{1}{\theta} \log \{ [\eta - (1 - \exp(-\theta u_1))(1 - \exp(-\theta u_2))] / \eta \}$	$\theta \in (0, \infty)$ $\eta = 1 - e^{-\theta}$
<i>Normal</i>	$\int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(u_1)} \int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(u_2)} \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\theta^2}} \exp \left(-\frac{x^2 - 2\theta xy + y^2}{2(1-\theta^2)} \right) dx dy *$	θ , matriz de correlación.
<i>t- student</i>	$\int_{-\infty}^{t_v^{-1}(u_1)} \int_{-\infty}^{t_v^{-1}(u_2)} \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\theta^2}} \left(1 + \frac{x^2 - 2\theta xy + y^2}{v(1-\theta^2)} \right) dx dy **$	θ , matriz de correlación. v , grados de libertad.

$\Phi^{-1}(\cdot)$: Inversa de la distribución normal estándar. $t_v^{-1}(\cdot)$: Inversa de la distribución t con v grados de libertad. Fuente: McNeil, *et al.*(2005).

Para determinar la cópula que mejor se ajusta a los datos se hace uso de los cuatro criterios de información propuestos por Joe (1997) y Zivot y Wang (2006) para la comparación entre cópulas. Estos criterios son: el logaritmo de máxima verosimilitud, AIC de Akaike, Bayesiano (BIC por sus siglas en ingles), y el criterio de Hannan-Quinn (HQC). Los cuales se definen de la siguiente manera:

$$\log^*(\theta|u_1 \dots u_n) = \sum_{t=1}^T \log c(u_1 \dots u_n) \quad (5.10)$$

$$AIC = \log^* - P \quad (5.11)$$

⁴ En el caso de tener más de dos factores de riesgo se hace uso de cópulas multivariadas.

$$BIC = -2\log^* + P * \log(T) \quad (5.12)$$

$$HQ = -2\log^* + 2P * \log(\log(T)) \quad (5.13)$$

Donde θ es el vector de parámetros estimados de la cópula, $c(u_1 \dots u_n)$ es la función de densidad de la cópula, P es el número de parámetros estimados y T el número de datos.

Una vez seleccionada la mejor cópula, se simulan m escenarios mediante la técnica de Monte Carlo basados en los parámetros estimados de la cópula. La simulación genera como resultado la distribución marginal de cada factor (u_i), sin embargo esta distribución por construcción se distribuye uniforme entre cero y uno. Por tanto, se deben realizar las operaciones inversas de cada uno los pasos llevados a cabo para modelar las cópulas, para obtener la distribución marginal de cada factor en términos de retornos.

Lo anterior implica que se debe obtener la función de distribución inversa de la GPD en las colas y, la inversa de la distribución empírica de cada una de las distribuciones marginales. De este proceso se obtienen las distribuciones marginales de los retornos estandarizados, r_i , factores de riesgo que siguen la misma distribución multivariada.

$$r_i = F^{-1}(u_i) \quad (5.14)$$

Por último, se calcula el VeR de la variable de salida escogida, la cual se ve afectada por los factores de riesgo simulados mediante el uso de cópulas y TVE. El VeR es un método que permite modelar la incertidumbre de la empresa, al cuantificar mediante técnicas estadísticas la exposición al riesgo de mercado al que ésta se enfrenta.

Teóricamente, el VeR es una medida de la máxima pérdida esperada de un portafolio de activos en un determinado periodo, a un nivel de confianza α dado (ver Christoffersen (2004)). En el presente estudio el portafolio está compuesto por una ponderación de los retornos, r_i , simulados. Con estos retornos se construye una distribución de pérdidas que es igual a los retornos simulados ordenados de mayor a menor multiplicados por -1.

En este trabajo se calcula el VeR teniendo en cuenta tres factores de riesgo, el precio de los contratos de futuros de la Bolsa de NY (Contrato No.11 – azúcar crudo) y de Londres (Contrato No.05 – azúcar blanco), y la TRM (Tasa Representativa del Mercado). Además, la utilidad bruta es la variable de salida la cual se ve afectada por los factores de riesgo. Así, el VeR de la utilidad bruta es igual a:

$$VeR_{(1-\alpha)} = k * \{[Volumen Nacional * Precio Interno] + [\sum_{i=1}^2 w_i (\mu_i + \sigma_i r_i (1 - \alpha))] * precio_i\} * [\mu_{TRM} + \sigma_{TRM} r_{TRM} (1 - \alpha)] TRM * Volumen Exportado \quad (5.15)$$

$i = \text{precio contrato No 11, precio contrato No.05}$

Donde μ_i es la media pronosticada para el siguiente período de los retornos del factor de riesgo i , estimada mediante el uso de un modelo ARIMA. σ_i es el pronóstico de la desviación estándar del retorno del factor i , estimada mediante un modelo DCC-GARCH. $r_i(1 - \alpha)$ es el retorno ubicado en la posición $1 - \alpha$ de la distribución de pérdidas del factor de riesgo i . w_i es la proporción de las exportaciones de azúcar,

crudo o blanco, sobre el total de las exportaciones. $Precio_i$ es el precio del último día de la serie del factor de riesgo i . μ_{TRM} es el pronóstico de la media del siguiente período de la TRM. σ_{TRM} es el pronóstico de la desviación estándar de la TRM. $r_{TRM}(1 - \alpha)$ es igual al retorno de la serie de TRM ubicado en la posición $1 - \alpha$ de la distribución de pérdidas. TRM es el valor de la tasa de cambio del último día de la serie.

De esta manera, el término $\{[\sum_{i=1}^2 w_i(\mu_i + \sigma_i r_i(1 - \alpha)) * precio_i] * [\mu_{TRM} + \sigma_{TRM} r_{TRM}(1 - \alpha)] TRM * Volumen Exportado\}$ corresponde a los ingresos de la empresa derivados de la exportación de azúcar en el mercado internacional, ingresos que son riesgosos pues dependen del comportamiento de los tres factores de riesgo.

El término $(Volumen Nacional * Precio Interno)$ corresponde a los ingresos de la empresa derivados de la venta nacional de azúcar, ingresos que se suponen libre de riesgo pues el precio que reciben los ingenios está regulado por el FEPA. Lo anterior no implica que el precio interno sea fijo, pues éste depende del comportamiento del mercado interno, sin embargo el precio que perciben los ingenios es relativamente estable en el corto plazo debido a las compensaciones realizadas por el FEPA. De esta manera, el cálculo del VeR es un pronóstico condicional al precio interno promedio del año anterior.

Por último, k es la proporción $[1 - (Costo de Ventas/Ingresos Operacionales)]$.

Como los factores de riesgo tienen una frecuencia diaria, el VeR de la utilidad bruta de la empresa analizada sería un VeR con una frecuencia diaria. Para obtener un VeR en una frecuencia mensual⁵, es necesario dividir los volúmenes de ventas nacionales y de exportaciones entre 12, además siguiendo a Melo y Granados (2011), se debe multiplicar la media pronosticada por 20 y la desviación estándar por $\sqrt{20}$. De esta manera, el VeR mensual de la utilidad bruta sería igual a:

$$VeR_{(1-\alpha)} = k * \{[(Volumen Nacional/12) * Precio Interno] + [\sum_{i=1}^2 w_i (20\mu_i + \sqrt{20}\sigma_i r_i * (1 - \alpha)) * precio_i] * [20\mu_{TRM} + \sqrt{20}\sigma_{TRM} r_{TRM}(1 - \alpha)] TRM * Volumen Exportado/12\} \quad (5.16)$$

$i = \text{precio contrato No 11, precio contrato No. 05}$

Es importante resaltar que mientras el VeR estima lo máximo que se espera perder (en este caso sería la mínima utilidad bruta) si un evento de pérdidas extremas no ocurre, es decir la peor pérdida esperada en caso de una relativa regularidad financiera, el ES (*Expected Shortfall*) indica cuánto se espera perder si un evento extremo efectivamente ocurre (más allá del nivel de confianza del VeR, en las colas de la distribución). El ES se define como el valor esperado de las pérdidas, L , en caso tal que éstas sean superiores al VeR:

$$ES = E[L|L > VeR] \quad (5.17)$$

Finalmente, es importante resaltar que las variables de volumen y precio interno debieron ser incluidas en el proceso de simulación, para el posterior cálculo de VeR a partir de las ecuaciones 5.15 y 5.16. Sin embargo, no fue posible incluirlas debido a que la información de estas variables se encuentra en una frecuencia diferente a la de

⁵ Se trabaja con una frecuencia mensual porque cada mes se realizan los consolidados de las utilidades obtenidas en el ejercicio de las empresas.

los factores que efectivamente se simularon y pronosticaron. Por tanto, no tener en cuenta estas fuentes adicionales de aleatoriedad dentro del cálculo del VeR es un limitante del presente estudio, y sería adecuado trabajar al respecto en estudios futuros.

6 DATOS Y ANÁLISIS DESCRIPTIVO

Como se mencionó en la sección anterior, los tres factores de riesgo que se simularon son los precios del contrato de futuros No. 05 de la Bolsa de Futuros de Londres (LIFFE), los precios del contrato de futuros No. 11 de la Bolsa de Nueva York en el *Intercontinental Exchange* (ICE) y la TRM. La frecuencia de los datos es diaria y el período de análisis es del 03 de enero de 2003 al 28 de febrero de 2014.

El contrato No. 05 es el contrato de referencia mundial para la comercialización de azúcar blanco. El contrato otorga un precio a la entrega física de 50 toneladas de azúcar blanco, FOB (*Free on Board*)-puerto de carga convenido (Ver Figura 6.1).

El contrato No. 11 es el contrato de referencia mundial para la comercialización de azúcar crudo. El contrato otorga un precio a la entrega física de 112.000 libras de azúcar crudo, FOB-puerto de carga convenido (Ver Figura 6.2).

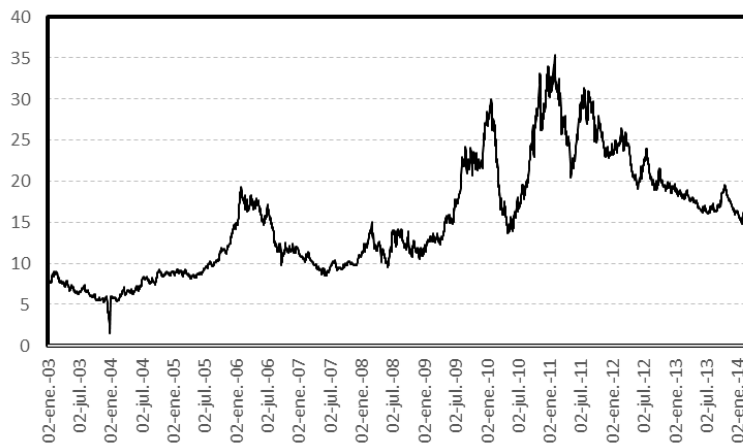
En las Figura 6.1, Figura 6.2 y Figura 6.3 se presentan los precios de los tres factores de riesgo. En las tres series se puede observar que posiblemente no son estacionarias en media, pues las series no fluctúan sobre su valor medio. Además, las series presentan tendencias. Por tanto, se deben realizar pruebas de raíz unitaria para determinar el orden de integración de las series, y determinar si es necesario diferenciarlas para que sean estacionarias en media.

Figura 6.1 Precios del Contrato No. 05



Fuente: elaboración propia con datos tomados de Bloomberg.

Figura 6.2 Precios del Contrato No. 11



Fuente: elaboración propia con datos tomados de Bloomberg.

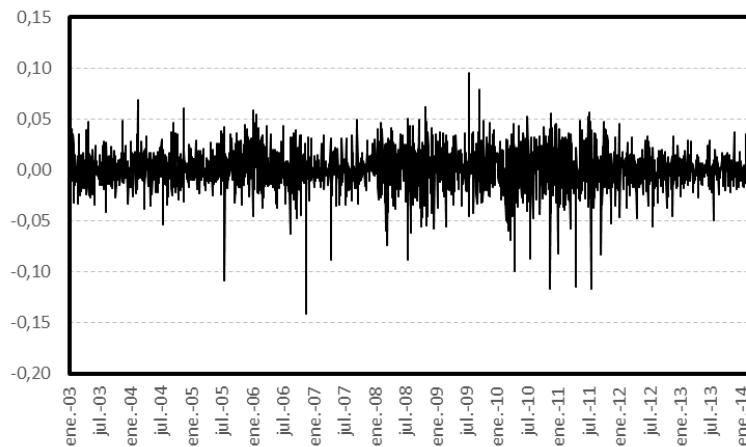
Figura 6.3 TRM



Fuente: elaboración propia con datos tomados del Banrep.

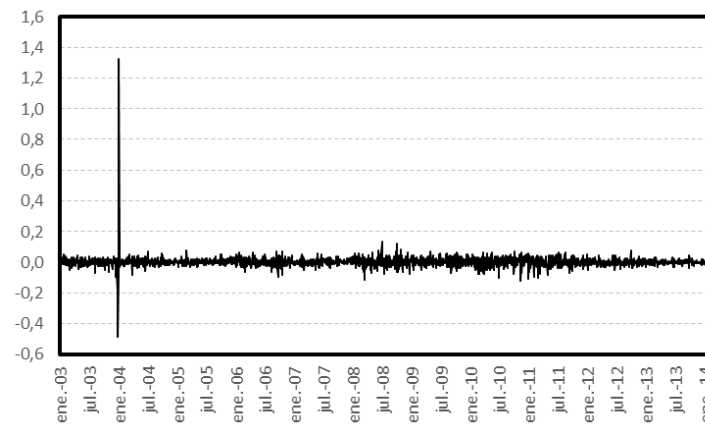
En las Figura 6.4, Figura 6.5 y Figura 6.6 se presentan los retornos de los precios de los tres factores de riesgos tenidos en cuenta en este estudio. Es posible observar que las series presentan los hechos estilizados de las series financieras como conglomerados de volatilidad y heterocedasticidad.

Figura 6.4 Retornos de los Precios del Contrato No. 05



Fuente: elaboración propia con datos tomados de Bloomberg.

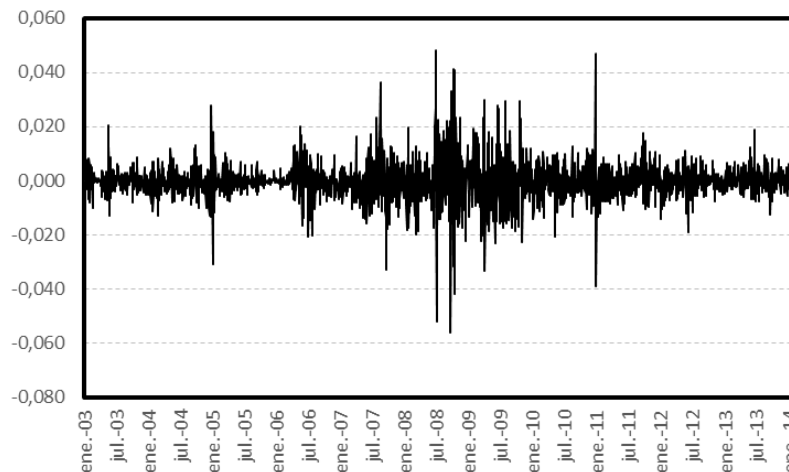
Figura 6.5 Retornos de los Precios del Contrato No. 11⁶



Fuente: elaboración propia con datos tomados de Bloomberg.

⁶ Alrededor de enero de 2004 la serie presenta un dato atípico, por lo que se realizaron las estimaciones con y sin éste. No se encontraron diferencias relevantes en los parámetros estimados por TVE, ni en los parámetros estimados de las cópulas. De esta manera, se presentan los resultados de las estimaciones incluyendo el dato atípico.

Figura 6.6 Retornos TRM



Fuente: elaboración propia con datos tomados del Banrep.

Además, en la Tabla 6.1 se presentan las estadísticas descriptivas de los retornos de los factores de riesgo. Las series de los dos contratos y del tipo de cambio son leptocúrticas, sesgadas y no normales, características también típicas de las series financieras, que son tenidas en cuenta en la metodología al hacer uso de TVE.

Tabla 6.1 Estadísticas Descriptivas Retornos de los Factores de Riesgo

	Contrato No. 5	Contrato No. 11	TRM
Media	0,000289	0,000276	-0,00012
Mediana	0,000518	0,000000	0,000000
Máximo	0,094676	1,321756	0,048047
Mínimo	-0,141079	-0,485508	-0,056219
Desviación Estándar	0,018344	0,035491	0,006691
Sesgo	-0,722363	17,5881	0,126738
Curtosis	8,423638	711,8568	12,80353
Jarque-Bera	3.620,23	57.885.287	11.051,94
Probabilidad	0,00000	0,00000	0,00000
Observaciones	2.758	2.758	2.758

Fuente: elaboración propia con datos tomados Bloomberg y del Banrep.

7 RESULTADOS

Como se mencionó en el análisis descriptivo, las series en niveles presentan indicios de no estacionariedad en media, por lo que para cada una de ellas se realizó la prueba de Dickey-Fuller Aumentada. Se hicieron tres variantes de la prueba: la primera se realiza para determinar si la serie presenta raíz unitaria, esta se lleva a cabo sin incluir intercepto ni tendencia y con la serie en niveles; la segunda se realiza para descartar la no estacionariedad en tendencia de la serie, en este caso se incluye un intercepto y un componente de tendencia; la tercera prueba se realiza para determinar si la serie tiene o no una tendencia estocástica.

Dado los resultados obtenidos de las pruebas, se puede concluir que las tres series tienen un componente de tendencia estocástica, por lo que al diferenciarlas se obtienen series estacionarias en media (Ver Tabla Tabla 7.1).

Tabla 7.1 Prueba de Raíz Unitaria Aumentada de Dickey-Fuller

Prueba ADF (Raíz Unitaria)		
Contrato No. 05		
Prueba	Estadístico t	Probabilidad
Sin Intercepto	-0,1213	0,6419
Con Intercepto	-1,7128	0,4247
Con Intercepto y Tendencia	-2,0585	0,5682
Primera Diferencia Contrato No. 05		
Prueba	Estadístico t	Probabilidad
Intercepto	-53,6283	0,0001
Contrato No. 11		
Prueba	Estadístico t	Probabilidad
Sin Intercepto	-0,3716	0,5509
Con Intercepto	-1,7876	0,3871
Con Intercepto y Tendencia	-2,1643	0,5089
Primera Diferencia Contrato No. 11		
Prueba	Estadístico t	Probabilidad
Intercepto	-53,2771	0,0001
TRM		
Prueba	Estadístico t	Probabilidad
Sin Intercepto	-1,2195	0,2047
Con Intercepto	-1,9861	0,2932
Con Intercepto y Tendencia	-1,9374	0,6344
Primera Diferencia TRM		
Prueba	Estadístico t	Probabilidad
Intercepto	-45,794	0.0001

Fuente: elaboración propia.

Una vez diferenciadas las series se procedió a modelar las series en media mediante un modelo ARIMA. Para la serie de los precios del contrato de futuros No. 05, se escogió un modelo ARIMA (1,1,1) y el pronóstico de la media de los retornos fue de 0,000295. Para la serie de los precios del contrato de futuros No. 11, se escogió un modelo ARIMA (3,1,2) y el pronóstico de la media fue de 0,000286. Para la serie de la TRM se escogió un modelo ARIMA (1,1,0), y el pronóstico de la media fue de -0.000118.

Posteriormente, se modeló la varianza de cada una de las series mediante un modelo DCC-GARCH⁷ y se obtuvieron los residuales filtrados de las series. Con los residuales filtrados se construyó una pseudo-muestra de cada una de las series, donde las colas se ajustan a una distribución Pareto Generalizada y el centro sigue una distribución empírica. En la Tabla 7.2 se presentan los parámetros de TVE de escala y forma de las colas de cada una de las distribuciones, así como el estadístico KS.

Tabla 7.2 Parámetros TVE y Estadístico KS⁸

	<i>Parámetros Cola Derecha</i>		<i>Parámetros Cola Izquierda</i>		<i>Estadístico KS</i>	
	Forma	Escala	Forma	Escala	K-S	Probabilidad
Contrato No. 05	0,5932 (0,0872)	0,5327 (0,0648)	0,2912 (0,1128)	0,0809 (0,0827)	0,0229	0,4630
Contrato No. 11	0,6644 (0,0905)	0,5980 (0,0743)	0,0057 (0,1061)	0,0235 (0,0905)	0,0258	0,3158
TRM	0,5326 (0,0772)	0,6316 (0,0723)	-0,0077 (0,0948)	0,1147 (0,068)	0,0149	0,9186

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 7.3 se presentan los parámetros estimados de cada una de las cópulas y los criterios de selección. La cópula que mejor se ajusta a los datos es la t-student, pues es la cópula que maximiza los criterios de máxima verosimilitud y AIC, y minimiza los criterios BIC y HQ.

Tabla 7.3 Tabla Resumen de las Cópulas Ajustadas a los Datos y Criterios de Selección

Cópula		Coficiente	g.I	LMV	AIC	BIC	HQ
Normal	rho.1	0,718	-	993,0	992,0	-1.978,2	-1.981,9
	rho.2	0,003					
	rho.3	0,005					
Clayton		0,291	-	192,7	191,7	-377,5	-381,3
Gumbel		1,154	-	157,6	156,6	-307,2	-311,0
Frank		1,419	-	202,3	201,3	-396,6	-400,4
t-student	rho.1	0,751	8,433	1.084,5	1.082,5	-2.153,3	-2.160,8
	rho.2	-0,001					
	rho.3	-0,002					

Fuente: elaboración propia.

⁷ En el Anexo 11.3 se presentan las pruebas de diagnóstico del modelo.

⁸ Para las tres series no existe suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula de que la pseudo-muestra se distribuye uniforme entre 0 y 1.

Después de escoger la t-student como la cópula que mejor describe las relaciones de dependencia entre los tres factores de riesgo, se simularon 1.000 escenarios mediante la técnica de Monte Carlo, basados en los parámetros estimados de la cópula. La simulación generó como resultado la distribución marginal de cada factor.

Después de realizar las operaciones inversas de cada uno los pasos llevados a cabo para modelar las cópulas, mediante la función de distribución inversa de la GPD en las colas y la inversa de la distribución empírica de cada una de las distribuciones marginales, se obtuvieron las distribuciones marginales⁹ de los retornos estandarizados, r_i , de los factores de riesgo que siguen la misma distribución multivariada.

Con los residuales estandarizados y con información hipotética de un ingenio productor de azúcar crudo y blanco, se construyó el valor en riesgo de la utilidad bruta mensual promedio al 95% de confianza. Los valores hipotéticos del ingenio se presentan a continuación:

Tabla 7.4 Información Hipotética de un Ingenio¹⁰

DATOS INGENIO	
Razón Costo-Ingresos	0,8093
Volumen Ventas Nacional (ton)	508.427
Volumen Ventas Exportación (ton)	444.229
Precio Prom Nacional (\$/ton)	721.220
Proporción exportaciones del Contrato No.05	75,90%
Proporción exportaciones del Contrato No.11	24,10%

Fuente: elaboración propia.

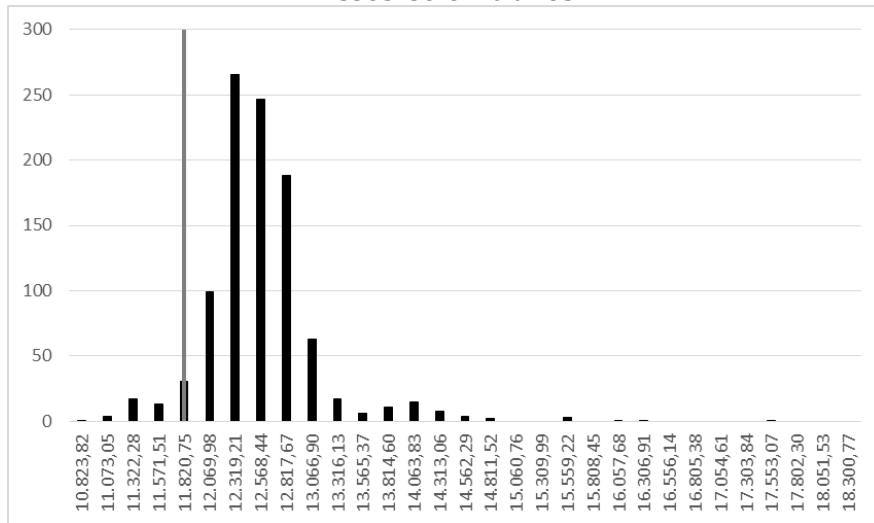
De acuerdo a estos valores y a las estimaciones realizadas, el valor en riesgo de la utilidad bruta mensual promedio al 95% de confianza es igual a \$11.642.922.983 pesos colombianos (COP). Es decir, que con un 95% de confianza se puede esperar una utilidad bruta mensual mínima de \$11.642.922.983 COP.

En la Figura 7.1 se presenta el histograma de la función de pérdidas estimado con las simulaciones. Además, se presenta el valor en riesgo calculado.

⁹ Es importante resaltar que las distribuciones marginales ya tienen en cuenta las relaciones de dependencia entre ellas, por lo que es posible proceder a calcular el valor en riesgo.

¹⁰ Las proporciones de exportación de cada uno de los contratos se obtuvieron del Informe Anual Asocaña (2014).

Figura 7.1 Valor en Riesgo al 95% de la Utilidad Bruta Mensual Promedio, Millones de Pesos Colombianos



Fuente: elaboración propia.

Además, el ES estimado fue de \$11.524.348.401 COP, es decir esta es la mínima utilidad bruta esperada en caso de que un evento extremo efectivamente ocurra.

8 CONCLUSIONES

Se realizó una aplicación de la metodología propuesta por Uribe *et al.* (2015) para la medición del riesgo financiero en el contexto de la selección óptima de proyectos de inversión. Esta metodología plantea que el manejo de óptimo de la incertidumbre requiere de la identificación y cuantificación de las exposiciones al riesgo que tiene la empresa mediante técnicas econométricas apropiadas. Entre las técnicas econométricas planteadas por los autores se encuentran: el pronóstico de factores de riesgo mediante modelos ARIMA; la modelación de la volatilidad condicional autorregresiva de los factores de riesgo; la aplicación de TVE para la modelación adecuada de las colas de la distribución de los factores; la modelación multivariada de las relaciones dependencia entre las series mediante cópulas.

La aplicación de esta metodología en una empresa hipotética del sector azucarero permitió la modelación de tres factores de riesgo que afectan su utilidad bruta. Estos factores de riesgo son los precios de futuros de azúcar de los contratos No. 11 y No. 5, y la TRM. Para modelar la dependencia multivariada entre los factores de riesgo, se modeló para cada serie su media y varianza, mediante procesos ARIMA y DCC-GARCH. Posteriormente, se construyó una pseudo-muestra mediante TVE para modelar adecuadamente las colas de la distribución, que son las de interés en las series financieras. Una vez construidas las pseudo-muestras, se procedió a estimar diferentes cópulas para determinar la que mejor se ajusta a los datos, ésta fue la t-student. Después, se simularon 1.000 escenarios mediante la técnica de Monte Carlo, basados en los parámetros estimados de la cópula t-student, de las distribuciones marginales de cada factor. Sin embargo, estas distribuciones por construcción se distribuyen uniforme entre cero y uno, por tanto se realizaron las operaciones inversas de cada uno los pasos llevados a cabo para modelar las cópulas, para obtener la distribución marginal de cada factor en términos de retornos.

Seguidamente, se estimó el valor en riesgo de la utilidad bruta operacional, variable de salida que se ve afectada por los factores de riesgo modelados. En este caso, los factores no afectan la totalidad de la utilidad bruta, sino solo aquella parte de ésta que se deriva de las exportaciones. En el caso del ingenio hipotético se supuso un volumen de ventas nacionales y un volumen de exportaciones para construir el VeR. Se encontró así, que el valor en riesgo de la utilidad bruta mensual promedio al 95% de confianza es igual a \$11.642.922.983 pesos colombianos (COP). Además, el ES estimado fue de \$11.524.348.401 COP, es decir esta es la mínima utilidad bruta esperada en caso de que un evento extremo efectivamente ocurra.

A pesar de que los datos del ingenio con los que se trabajó son hipotéticos, este ejercicio permite realizar una primera aplicación de la metodología propuesta por Uribe *et al.* (2015) en el sector azucarero. El estudio permite dejar un precedente relevante para la academia y el sector, para trabajos posteriores que cuenten con datos reales y con la orientación adecuada por parte de los empresarios.

9 DISCUSIÓN Y ESTUDIOS FUTUROS

Aunque la metodología utilizada en este trabajo de grado hace frente a gran parte de las falencias en las estrategias tradicionales de valoración de proyectos de inversión, la metodología no tiene en cuenta que los escenarios de riesgo a los que se enfrentan las empresas pueden variar en el tiempo. Es decir pueden ser dependientes del estado. En el caso de las empresas que exportan, por ejemplo, éstas se enfrentan a riesgos macroeconómicos, como el tipo de cambio y el precio de los *commodities*. Estos riesgos se comportan de manera diferente, por ejemplo, en épocas de sequía y no sequía en los lugares de mayor producción del bien. Otro ejemplo, lo constituyen las empresas que cotizan en bolsa, las cuales se enfrentan al riesgo de mercado que surge de la exposición de su portafolio al precio de diferentes índices accionarios. Estos índices evolucionan de manera diferente de acuerdo con los periodos de auge o recesión económica. Un tercer ejemplo surge particularmente en el caso de los mercados energéticos. En éstos las empresas enfrentan regímenes diferentes en el comportamiento del precio de acuerdo a situaciones climáticas o la franja horaria que se analice.

Los tres casos planteados anteriormente tienen en común que las empresas se enfrentan a diferentes escenarios de estrés financiero, escenarios que deberían ser modelados explícitamente.

Debido a las anteriores consideraciones es relevante avanzar en trabajos futuros en la comprensión teórica y empírica de los factores riesgo a los que se enfrentan las empresas. En particular es deseable expandir la comprensión de las dinámicas que subyacen a las diferentes formas de medición de riesgo a lo largo de diferentes regímenes. Lo anterior está directamente emparentando con avances teóricos recientes en la ingeniería financiera, que buscan una mejor comprensión del riesgo en escenarios de eventos extremos como las crisis (financieras, climáticas, etc), los cuales vienen acompañados generalmente de cambios de estado en los parámetros de la distribución que determina los estadísticos de riesgo.

Finalmente, estudios futuros también deben incluir la modelación y simulación de otros factores de riesgo, como el volumen de ventas y precios nacionales. Estas variables no fueron incluidas en el proceso de simulación para el cálculo del VeR del presente estudio, debido a que la información de estas variables se encuentra en una frecuencia diferente a la de los factores que efectivamente se simularon y pronosticaron.

10 REFERENCIAS

- Abken, P. (2000). An empirical evaluation of value at risk by scenario simulation, *Journal of Derivatives*, 7(4), 12–29.
- Archer, N. P., & Ghasemzadeh, F. (1999). An integrated framework for project portfolio selection, *International Journal of Project Management*, 17(4), 207–216.
- ASOCAÑA. (2013). Informe Anual 2012-2013 Asocaña. *Aspectos Generales del Sector Azucarero 2012-2013*.
- ASOCAÑA. (2014). Informe Anual 2013-2014. *Aspectos Generales del Sector Azucarero 2013-2014*.
- Bailey, R. (2005). *The economics of financial Markets*, Cambridge University Press: Nueva York.
- Black, F. (1972). Capital Market equilibrium with restricted borrowing, *The Journal of Business*, 45 (3), 444-455.
- Bollerslev, T. (1986). Generalized Autorregresive Conditional Heteroskedasticity. *Journal of Econometrics*, 31(3), 307–327.
- Chevallier, J. (2011). Detecting instability in the volatility of carbon prices. *Energy Economics*, 33(1), 99–110. <http://doi.org/10.1016/j.eneco.2010.09.006>
- Christoffersen, P. F. (2004). *Elements of Financial Risk Management*. Elsevier. <http://doi.org/10.1016/B978-012174232-4.50001-5>
- Cifter, A. (2013). Forecasting electricity price volatility with the Markov-switching GARCH model: Evidence from the Nordic electric power market, *Electric Power Systems Research*, 102, 61–67. <http://doi.org/10.1016/j.epsr.2013.04.007>
- DNP. (2004). Azúcar, confitería y chocolatería, en *Cadenas Productivas. Estructura, comercio internacional y protección*, 41–58, Bogotá.
- Engle, R. F. (1982). Autorregresive Conditional Heteroscedasticity with estimates of the variance of United Kingdom Inflation, *Econometrica*, 50(4), 987–1007.
- Engle, R. F. (2002). Dynamic Conditional Correlation: A Simple Class of Multivariate Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity Models, *Journal of Business & Economics Statistics*, 20(3), 339-350.
- Feng, Z. H., Zou, L. Le, & Wei, Y. M. (2011). Carbon price volatility: Evidence from EU ETS, *Applied Energy*, 88(3), 590–598. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.06.017>

- Feng, Z.-H., Wei, Y.-M., & Wang, K. (2012). Estimating risk for the carbon market via extreme value theory: An empirical analysis of the EU ETS, *Applied Energy*, 99, 97–108, <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.070>
- Fisher, R., & Tippett, L. H. (1928). Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample, *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 24, 180-190.
- Gnedenko, B. (1943). Sur La Distribution Limite Du Terme Maximum D'Une Serie Aleatoire, *Annals of Mathematics*, 44(3), 423–453.
- Hai, X., & Yang, B. (2014). Research on the risk measurement of EU carbon market based on VaR-GARCH models, en *WIT Transactions on Information and Communication Technologies*, 52, 1259–1264, WIT Press. <http://doi.org/10.2495/SSSIT20131702>
- ISO. (2014). Organización Internacional del Azúcar - ISO *Quarterly Market Outlook*, Febrero 2014, Londres.
- Joe, H. (1997). *Multivariate Models and Multivariate Dependence Concepts*, Chapman & Hall: Londres.
- King, A. J., & Wallace, S. W. (2012). *Modeling with Stochastic Programming*, Springer: Nueva York.
- Knight, F. (1921). *Risk, Uncertainty and Profit*, Houghton Mifflin: Boston.
- Manotas, D. F. (2009). Optimal economic project selection under uncertainty: An illustration from an utility company, *Ingeniería y Competitividad*, 11(2), 41–52.
- Manotas, D.F, & Toro, H. H. (2009). Análisis de decisiones de inversión utilizando el criterio valor presente neto en riesgo (VPN en riesgo). *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 49, 199–213.
- Manotas, D. F. (2013). *Optimization of investment portfolio in power generation technologies in a low-carbon economy*, Tesis de Doctorado, Cali, Colombia, Universidad del Valle.
- Markowitz, H. (1952). Portfolio Selection, *The Journal of Finance*, 7(1), 77–91.
- Markowitz, H. (1959). *Portfolio Selection. Efficient Diversification of Investments*, John Wiley: Nueva York.
- McNeil, A., Frey, R., & Embrechts, P. (2005). *Quantitative Risk Management: concepts, techniques and tools*, Princeton University Press: Nueva York, <http://doi.org/10.1198/jasa.2006.s156>
- Melo, L. F., & Granados, J. C. (2011). Regulación y Valor en Riesgo, *Ensayos sobre Política Económica*, 29(64), 110–177.

- Merton, R.C (1992). *Continuous Time Finance*, Malden Mass and Oxford, Blackwell.
- Mun, J. (2008). *Advanced Analytical Models*, John Wiley & Sons: Nueva Jersey.
- Sharpe, W. F. (1964). Capital Asset Prices: A Theory of Market equilibrium under conditions of risk, *The Journal of Finance*, 19(3), 425–442.
- Uribe, J. M. (2011). Contagio financiero: Una metodología para su evaluación mediante coeficientes de dependencia asintótica, *Lecturas de Economía*, 75, 29-57.
- Uribe, J. M., & Ulloa, I. M. (2011). Revisando la Hipótesis de los Mercados Eficientes: Nuevos Datos, Nuevas Crisis y Nuevas Estimaciones, *Cuadernos de Economía*, 30(55), 127–154.
- Uribe, J. M., Ulloa, I. M., & Manotas, D. F. (2015). A Methodological Proposal to Incorporate Market Risk into Real Sector Financial Projections (Mimeo), Universidad del Valle.
- Von Neumann, J. & Morgenstern, O. (2007). *Theory of Games and Economic Behavior*, Princeton University Press.
- Wang, H., He, K., & Zou, Y. (2014). EMD Based Value at Risk Estimate Algorithm for Electricity Markets, en *2014 Seventh International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization* (pp. 445–449), IEEE, <http://doi.org/10.1109/CSO.2014.91>
- Wang, J., & Wang, R. (2014). Evaluating electricity price volatility risk in competitive environment based on ARMAX-GARCHSK-EVT model, *International Journal of Computer Applications in Technology*, 50(3/4), 174-179. <http://doi.org/10.1504/IJCAT.2014.066722>
- Xiong, S. F., & Zou, X. Y. (2014). Value at risk and price volatility forecasting in electricity market: A literature review, *Power System Protection and Control*, 2014-02.
- Yang, J., & Lin, P. (2011). Dynamic risk measurement of futures based on wavelet theory, en *2011 Seventh International Conference on Computational Intelligence and Security* (pp. 1484–1487), IEEE, <http://doi.org/10.1109/CIS.2011.331>
- Zhang, C., Yang, Y., & Zhang, T. (2013). The integrated measurement of carbon finance market risk based on Copula model, en *Intelligent Systems and Decision Making for Risk Analysis and Crisis Response - Proceedings of the 4th International Conference on Risk Analysis and Crisis Response, RACR 2013* (pp. 561–566).
- Zivot, E., & Wang, J. (2006). *Modeling Financial Time Series with S-PLUS*, Springer.

11 ANEXOS

Anexo 11.1 Cuadro Resumen Literatura de Modelación del Riesgo Financiero

Trabajo	Modelación del Riesgo	Enfoque Paramétrico/Semi-Paramétrico/No Paramétrico/Computacional
Manotas y Toro (2009)	Medición del riesgo para la valoración de proyectos.	Los autores estiman un VPN en riesgo mediante técnicas paramétricas para seleccionar proyectos de inversión. La técnica se aplica a la selección de tecnologías y a decisiones sobre renovación de cultivos de azúcar.
Manotas (2009)	Selección óptima de un portafolio de proyectos de inversión bajo incertidumbre.	El autor mide el riesgo en variables de interés por medio de métodos no paramétricos (basados en datos históricos) o métodos paramétricos (realizando supuestos sobre la distribución de las variables).
Xiong y Zou (2014)	Revisión de la literatura de estimación de la volatilidad en los precios de la electricidad.	El cálculo del VeR y el pronóstico de la volatilidad en los precios de la electricidad se ha llevado a cabo mediante dos enfoques: paramétrico y semi-paramétrico. En el primero se encuentran los muy utilizados modelos GARCH, y en el segundo la TVE.
Chevallier (2010)	Identificación de la presencia de datos atípicos en los precios del carbono.	El autor estima tres medidas de la volatilidad de los EUAs con datos diarios (EGARCH), datos intradiarios y precios de las opciones.
Feng, Zou y Wei (2011)	Medición de la volatilidad de los precios del carbono bajo el EU ETS.	Los autores realizan la medición de la volatilidad en los precios mediante modelos ARMA y la Teoría del Caos.
Cifter (2013)	Predicción del comportamiento del precio de la electricidad en el mercado nórdico.	El autor realiza una estimación de la volatilidad de los precios de la electricidad haciendo uso de modelos MS-GARCH.
Zhang, Yang y Zhang (2013)	Medición del riesgo financiero del mercado de carbono.	Los autores toman como base empresas chinas para calcular la dependencia entre dos factores de riesgo (precio del carbón y tipo de cambio) mediante cópulas. Posteriormente calculan un VeR.
Hai y Yang (2014)	Medición de la volatilidad de los precios spot y futuros de los EUAs.	Los autores estiman modelos GARCH para calcular un VeR del precio spot y futuro de los EUAs, haciendo uso de diferentes distribuciones.
Feng, Wei y Wang	Estimación del riesgo de mercado	Los autores hacen uso de un enfoque semi-paramétrico (modelos GARCH y TVE) para medir la volatilidad de los

(2012)	del carbono.	precios del carbono.
Wang y Wang (2014)	Medición del riesgo de la volatilidad en los precios de la electricidad.	Los autores estiman un VeR mediante el enfoque semi-paramétrico. La modelación del riesgo la llevan a cabo en dos etapas. En la primera etapa se filtran los residuales mediante un modelo ARMAX-GARCHSK; en la segunda etapa se modelan las colas de la distribución mediante TVE.
Yang y Lin (2011)	Medición del riesgo en los precios de los contratos de caucho en empresas chinas.	Los autores estiman un VaR haciendo uso de modelos GARCH para filtrar las series y de TVE para modelar las colas de la distribución. Para determinar el umbral hacen uso del análisis Wavelet.
Wang, He y Zou (2014)	Estimación de un VeR en cinco mercados de electricidad australianos.	Los autores utilizan el algoritmo EMD para descomponer las series de tiempo de precios en funciones de modo y un componente residual. Con lo anterior se calcula el VeR con la metodología de RiskMetrics EWMA.
Uribe y Ulloa (2011)	Revisión de la hipótesis de los mercados eficientes.	Los autores estiman cópulas para contrastar empíricamente la hipótesis de la eficiencia en diferentes mercados de acciones.
Uribe (2011)	Detección de contagio financiero.	El autor estima coeficientes de dependencia asintótica mediante cópulas, para determinar la existencia de contagio en los principales mercados financieros colombianos.
Uribe, Manotas y Ulloa (2015)	Modelación de la incertidumbre en el sector empresarial aplicado a una empresa del sector aurífero.	Los autores construyen un indicador de factibilidad para la selección de proyectos de inversión en el sector. Este indicador es el VeR y se construye haciendo uso de modelos ARMA-GARH, TVE, cópulas y simulación mediante técnicas de Monte Carlo.
Abken (2000)	Estimación del riesgo en portafolios de derivados de tasas de interés con múltiples tipos de cambio.	El autor realiza una simulación de escenarios mediante la técnica de Monte Carlo para la construcción del VeR de los portafolios.

Fuente: elaboración propia.

Anexo 11.2 Comparación Estado del Arte

Trabajo	Sector Financiero	Sector No Financiero					Metodología Modelación del Riesgo							Evaluación Proyectos Inversión
		Electricidad	Carbono	Caucho	Azúcar	Oro	ARMA-GARCH	TVE	MS*	Análisis Wavelet	Algoritmo EMD	Cóputas	Monte Carlo	
Manotas y Toro (2009)	x	x	x	x	✓	x	x	x	x	x	x	x	x	✓
Manotas (2009)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓
Xiong y Zou (2014)	x	✓	x	x	x	x	✓	✓	x	x	x	x	x	x
Chevallier (2010)	x	x	✓	x	x	x	✓	x	x	x	x	x	x	x
Feng, Zou y Wei (2011)	x	x	✓	x	x	x	✓	x	x	x	x	x	x	x
Cifter (2013)	x	✓	x	x	x	x	✓	x	✓	x	x	x	x	x
Zhang, Yang y Zhang (2013)	x	x	✓	x	x	x	✓	✓	x	x	x	✓	x	x
Hai y Yang (2014)	x	x	✓	x	x	x	✓	x	x	x	x	x	x	x
Feng; Wei y Wang (2012)	x	x	✓	x	x	x	✓	✓	x	x	x	x	x	x

Trabajo	Sector Financiero	Sector No Financiero					Metodología Modelación del Riesgo							Evaluación Proyectos Inversión
		Electricidad	Carbono	Caucho	Azúcar	Oro	ARMA-GARCH	TVE	MS*	Análisis Wavelet	Algoritmo EMD	Cóputas	Monte Carlo	
Wang y Wang (2014)	x	✓	x	x	x	x	✓	✓	x	x	x	x	x	x
Yang y Lin (2011)	x	x	x	✓	x	x	✓	✓	x	✓	x	x	x	x
Wang, He y Zou (2014)	x	✓	x	x	x	x	x	x	x	x	✓	x	x	x
Uribe y Ulloa (2011)	✓	x	x	x	x	x	✓	✓	x	x	x	✓	x	x
Uribe (2011)	✓	x	x	x	x	x	✓	✓	x	x	x	✓	x	x
Uribe et al., (2015)	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	x	x	x	✓	✓	✓
Abken (2000)	✓	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓	x

*Markov-Switching. Fuente: elaboración propia.

Anexo 11.3. Pruebas de Diagnóstico del Modelo DCC-GARCH

Anexo 11.3.1 Pruebas Univariadas de No Autocorrelación Serial: Prueba de Box-Pierce y Ljung-Box

Residuales Modelo Contrato No. 05		
Rezago	Estadístico Q	Probabilidad
5	1,184	0,757
10	2,545	0,960
15	9,211	0,757
20	12,367	0,828
Residuales Modelo Contrato No. 11		
Rezago	Estadístico Q	Probabilidad
5	4,830	0,185
10	7,057	0,530
15	16,201	0,238
20	16,880	0,531
Residuales Modelo TRM		
Rezago	Estadístico Q	Probabilidad
5	11,210	0,024
10	14,036	0,121
15	19,669	0,141
20	22,070	0,281

Fuente: elaboración propia.

Anexo 11.3.2 Prueba Multivariada de No Autocorrelación Serial: Prueba de Portmanteau

Rezago	Estadístico Q	Probabilidad	G.L
3	11,98272	0,2143	9
4	20,80925	0,2891	18
5	29,49100	0,3375	27
6	40,56201	0,2761	36
7	51,38524	0,2379	45
8	59,48665	0,2827	54
9	77,17221	0,1080	63
10	101,1509	0,0133	72

Fuente: elaboración propia.

Anexo 11.3.3 Pruebas de Efectos ARCH: Prueba LM de Engle

Residuales Modelo Contrato No. 05		
		Probabilidad
Estadístico F	0,056	0,813
R-cuadrado	0,056	0,813
Residuales Modelo Contrato No. 11		
		Probabilidad
Estadístico F	0,211	0,646
R-cuadrado	0,211	0,646
Residuales Modelo TRM		
		Probabilidad
Estadístico F	0,155	0,694
R-cuadrado	0,155	0,694

Fuente: elaboración propia.

Anexo 11.3.4 Pruebas de Efectos "Leverage": Prueba de Engle-Ng

Residuales Modelo Contrato No. 05		
	Estadístico t	Probabilidad
Sesgo de Signo	0,887	0,375
Sesgo de Signo Negativo	1,332	0,183
Sesgo de Signo Positivo	0,597	0,550
Efecto Conjunto	2,141	0,544
Residuales Modelo Contrato No. 11		
	Estadístico t	Probabilidad
Sesgo de Signo	1,420	0,156
Sesgo de Signo Negativo	3,713	0,000
Sesgo de Signo Positivo	1,150	0,250
Efecto Conjunto	15,615	0,001
Residuales Modelo Contrato TRM		
	Estadístico t	Probabilidad
Sesgo de Signo	0,592	0,554
Sesgo de Signo Negativo	1,919	0,055
Sesgo de Signo Positivo	0,611	0,542
Efecto Conjunto	4,591	0,204

Fuente: elaboración propia.