



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

**Riesgo de mercado: Aplicación
de modelos del *VaR* en el
Mercado Cambiario en el periodo
2012-2020**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

A C T U A R I O

P R E S E N T A

ABIGAIL HERNANDEZ PÁRAMO

Tutor

M. en F. Jorge Luis Reyes García

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., 2022





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mis padres y hermana...

Agradecimientos

A mi tutor M. en F. Jorge Luis Reyes García por su ayuda, paciencia y dedicación. Sus consejos me guiaron desde el inicio y hasta el final de mi proyecto.

A los miembros del jurado por tomarse el tiempo de leer el presente trabajo y por los comentarios y correcciones realizadas: M. En C. Luis Eduardo Pavón Tinoco, Act. José Antonio Reyes León, Act. Sandra Devi Gutiérrez Ugalde y Act. Juan Francisco Carmona Sánchez.

A mi querida Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ciencias.

A mis padres, Martín Hernández y Graciela Páramo, por su dedicación, apoyo y constancia en mi vida. Por creer en mí y brindarme todo lo que necesitaba para salir adelante. Gracias por formarme y guiarme en el camino y gracias por su amor incondicional.

A mi hermana, Elizabeth Hernández, por ser mi motivación para realizarme y ser la mejor versión de mí. Por ser luz en mi vida y brindarme un apoyo y amor incondicional. Mi camino no sería el mismo sin tu presencia.

A todos mis amigos, por estar en mi vida y brindarme momentos maravillosos. Los logros se sienten mejor cuando los festejo con ustedes.

Índice

Introducción	xii
Capítulo 1. Riesgo de mercado.....	1
1.1 Riesgo	1
1.1.1 Falacias relacionadas con el riesgo	1
1.2 Clasificación de riesgos	3
1.3 Administración de riesgos.....	7
1.4 Regulación para la administración del riesgo.....	10
1.5 Riesgo de mercado.....	12
1.5.1 Clasificación del riesgo de mercado.....	14
1.5.2 Basilea y el riesgo de mercado	16
1.5.3 Métodos de medición del riesgo de mercado	17
1.5.4 Value at Risk (<i>VaR</i>).....	20
1.5.4.1 Definición del <i>VaR</i>	20
1.5.4.2 Definición estadística.....	23
Capítulo 2. Metodologías para el cálculo del <i>VaR</i>	25
2.1 Método paramétrico	26
2.1.1 Extrapolación temporal	27
2.1.2 Basilea y el Valor en Riesgo	30
2.1.3 El <i>VaR</i> en carteras con más de un activo.....	31
2.2 Simulación histórica	36
2.2.1 Simulación histórica ponderada	40
2.3 Simulación Monte Carlo	43
2.4 Pruebas de tensión (Stress-testing).....	50
2.4.2 Aproximaciones mecánicas	53
2.5 Back-testing	55
2.6 <i>VaR</i> Condicional	60
Capítulo 3. Aplicación del <i>VaR</i> al mercado cambiario	63

3.1 Mercado cambiario (FOREX)	63
3.2 COVID-19 en México.....	68
3.2.1 Impacto económico del COVID-19 y la paridad USD/MXN	68
3.3 Aplicación del <i>VaR</i>	71
3.3.1 <i>VaR</i> simulación histórica	73
3.3.2 <i>VaR</i> simulación Montecarlo.....	75
3.3.3 Backtesting	77
3.3.4 <i>VaR</i> 90 días. Fronteras superior e inferior.....	79
3.3.5 <i>VaR</i> condicional	81
3.3.6 Escenarios de estrés	82
Capítulo 4. Conclusiones	88
Glosario	xciii
Bibliografía.....	xcvi

Esquemas

Esquema 1. Diferencias entre riesgo e incertidumbre	2
Esquema 2. Clasificación de los riesgos financieros	5
Esquema 3. Proceso de la administración de riesgos	8
Esquema 4. Clasificación del riesgo de mercado.....	14
Esquema 5. Método estándar para la medición del riesgo de mercado	16
Esquema 6. Parámetros utilizados en el cálculo del Valor en Riesgo	21
Esquema 7. Metodologías para el cálculo del VaR	25
Esquema 8. Clasificación de las técnicas de Stress-Testing.....	51
Esquema 9. Principales grupos participantes en el mercado cambiario	64
Esquema 10. Factores que influyen en el valor del tipo de cambio de un país.....	67

Tablas

Tabla 1. Acontecimientos históricos generadores de volatilidad en el sistema financiero	13
Tabla 2. Horizonte temporal usados por diferentes usuarios en el cálculo del VaR	21
Tabla 3. Valores asignados de acuerdo al VaR por simulación histórica para diferentes tamaños de muestra y niveles de confianza	38
Tabla 4. Pesos asignados a las observaciones mediante el modelo de Simulación Histórica Ponderada	42
Tabla 5. Intervalos de aceptación de la hipótesis nula con 5% de nivel de significancia	58
Tabla 6. Código ISO para las principales monedas internacionales.....	65
Tabla 7. Participación de las diferentes divisas en el mercado cambiario de 2010 a 2019	66
Tabla 8. Rendimientos máximo y mínimo de la paridad USD/MXN de 2012 a 2020 ...	73
Tabla 9. Cálculo de pérdidas y ganancias para la paridad USD/MXN.....	73
Tabla 10. Ganancia y pérdida máximas de la paridad USD/MXN	74
Tabla 11. VaR simulación histórica de la paridad USD/MXN	74
Tabla 12. Media y desviación estándar de los rendimientos de la paridad USD/MXN.	75
Tabla 13. Escenarios de la simulación Montecarlo para la paridad USD/MXN para un nivel de confianza del 95%	75
Tabla 14. Máximo y mínimo escenario en simulación la Montecarlo.....	76
Tabla 15. VaR simulación Montecarlo.....	77
Tabla 16. VaR por simulación histórica y Montecarlo para la paridad USD/MXN para diferentes niveles de confianza.....	77
Tabla 17. VaR para 1,000 observaciones	78
Tabla 18. Ejemplo de excepciones al VaR.....	78
Tabla 19. Número total de excepciones al VaR	79
Tabla 20. Comparativo del número de excepciones con los intervalos de Kupiec.....	79
Tabla 21. Construcción de fronteras mediante VaR superior e inferior	80
Tabla 22. Pérdidas que superan el VaR.....	81

Tabla 23. VaR condicional para diferentes niveles de confianza.....	82
Tabla 24. Resumen de los resultados de la aplicación.....	82
Tabla 25. Pérdidas y ganancias experimentadas durante los momentos más críticos de la pandemia	84
Tabla 26. Pérdidas y ganancias experimentadas durante los momentos más críticos de la crisis de 2008.....	86

Gráficas

Gráfica 1. Rendimiento contra Riesgo	9
Gráfica 2. Curva precio vs rendimiento, duración modificada y convexidad	18
Gráfica 3. Descripción gráfica del VaR	23
Gráfica 4. Representación gráfica del T-VaR.....	61
Gráfica 5. Tendencia de la paridad USD/MXN de enero 2019 a marzo 2020.....	69
Gráfica 6. Tendencia de la paridad USD/MXN de enero 2019 a julio 2020	70
Gráfica 7. Tendencia histórica de la paridad USD/MXN de 2012 a 2020	72
Gráfica 8. Rendimientos logarítmicos de la paridad USD/MXN de 2012 a 2020	72
Gráfica 9. Escenarios simulación Montecarlo para el VaR.....	76
Gráfica 10. Frontera superior e inferior VaR 90 días.....	80
Gráfica 11. Tendencia del precio de la paridad USD/MXN del 01 de enero al 31 de julio de 2020.....	83
Gráfica 12. Pérdidas y ganancias experimentadas desde inicios del año 2020 y VaR simulación histórica	85
Gráfica 13. Tendencia del precio del USD/MXN durante el año 2008.....	85
Gráfica 14. Pérdidas y ganancias experimentadas en el año 2008 y el VaR simulación histórica	86

Imágenes

Imagen 1. Clasificación cualitativa del riesgo	3
Imagen 2. Principales factores en el riesgo de mercado	12
Imagen 3. Representación de la Simulación Histórica Ponderada	43

Introducción

Cualquier acción realizada por el hombre trae consigo un riesgo que se presenta en mayor o menor grado dependiendo del ambiente donde se desarrolle y la acción que se esté realizando. Un ejemplo de estos riesgos es el riesgo de mercado que es en el que está enfocado este trabajo. Este es un tipo de riesgo financiero que está relacionado con las pérdidas derivadas de fluctuaciones en las variables de mercado como tasas de interés, tipo de cambio, volatilidad, spread de crédito, entre otros.

Ante un riesgo, la decisión más oportuna es llevar a cabo una gestión del mismo, desde su identificación hasta su medición, con el objetivo de tomar las decisiones que sean consideradas como las mejores. En el caso del riesgo de mercado su administración se ha vuelto fundamental y una de las métricas más utilizadas para medirlo es el Valor en Riesgo (*VaR*), que indica la pérdida máxima que se puede producir bajo un cierto nivel de confianza y a un determinado horizonte de tiempo.

Existen diversas metodologías que pueden ser aplicadas para calcular el *VaR*, ya sea de un activo individual o de un portafolio de inversión, sin embargo, es necesario tener presente que estas metodologías presentan algunas desventajas derivadas de los supuestos de los que parten, como lo son el asumir una distribución normal de los rendimientos o el no contemplar la posible correlación que exista entre los instrumentos que conforman un portafolio de inversión, así como contemplar condiciones normales de mercado en todo momento.

Es el último supuesto mencionado el que abre un cuestionamiento sobre la eficiencia del *VaR*, principalmente cuando se tienen en cuenta los posibles escenarios de estrés que pueden presentarse en cualquier mercado financiero, como aquellos derivados de crisis económicas. Esto pone de manifiesto la necesidad de identificar las fortalezas y debilidades de las principales metodologías utilizadas para el cálculo del Valor en Riesgo.

Por todo lo mencionado anteriormente, el objetivo de este trabajo es identificar entre la Simulación histórica y la Simulación Montecarlo, la metodología que mejor se adapte a este tipo de escenarios o en su caso señalar las ventajas o desventajas de cada una de ellas, permitiendo tener una pauta inicial a la hora de decidir qué metodología será utilizada para medir el riesgo de mercado.

Partiendo de dicho objetivo, se tiene la hipótesis de que, entre las metodologías mencionadas, ninguna es mejor que otra, sino que cada una presenta fortalezas y debilidades y éstas deberán ser analizadas para tomar la mejor decisión en función de cuál de las dos se ajusta mejor a la perspectiva personal o de negocio.

Una vez definidos el objetivo y la hipótesis, el enfoque de este trabajo es la aplicación de las principales metodologías para el cálculo del Valor en Riesgo como lo es la Simulación histórica y la Simulación Montecarlo así como el $T - VaR$ y Backtesting a un activo del Mercado Cambiario también conocido como FOREX por sus siglas en inglés.

Este activo se trata de la paridad USD/MXN y la razón por la que se decidió realizar la aplicación sobre este activo radica en que, de acuerdo a la encuesta trienal más actual, llevada a cabo en 2019, sobre volúmenes de operación de los mercados de divisas realizada por el Banco de Pagos Internacionales (BIS), por un lado, el dólar americano es la moneda más representativa en el mercado, de hecho es la divisa en la que se encuentran denominadas más del 60% de las reservas de los bancos centrales y por otro lado, el peso mexicano se mantuvo, al igual que en la encuesta realizada en 2016, como la segunda divisa más operada dentro del conjunto de países emergentes, además de que el volumen de operación global del peso mexicano, que incluye operaciones cambiarias del peso contra el dólar americano, aumentó un 17% con respecto a la encuesta anterior.

Lo mencionado anteriormente muestra la importancia de tener presentes los potenciales riesgos que pudieran presentarse a la hora de llevar a cabo operaciones con la paridad USD/MXN, y uno de estos riesgos es el riesgo de mercado, por lo que el identificar las posibles ventajas y desventajas a la hora de aplicar las dos, ya mencionadas, metodologías del VaR se vuelve de suma importancia.

Todo esto para realizar un comparativo con las pérdidas y ganancias experimentadas durante dos periodos de estrés en la economía mexicana, el primero es la crisis económica del 2008 y el segundo es el impacto económico provocado por la pandemia mundial originada por el COVID-19, logrando así identificar las ventajas y desventajas de cada una.

En el capítulo 1 se comienza por definir el riesgo y las diferentes clasificaciones que existen del mismo para dar inicio a la descripción del riesgo en el que se centra este estudio partiendo de la definición de los riesgos financieros. También se habla sobre la administración de los mismos y su importancia. Por otro lado, dentro de la descripción del riesgo de mercado se habla del marco normativo actual al que está sujeto así como las diferentes medidas de riesgo utilizadas, concluyendo con una breve introducción al Valor en Riesgo, dando a conocer los parámetros que lo componen, así como su definición estadística.

En el segundo capítulo, se desarrolla el marco teórico con los distintos modelos utilizados para el cálculo del Valor en Riesgo, mostrando las ventajas y desventajas de cada uno. Además, se menciona la relación que existe entre la regulación bancaria y esta metodología. También se muestran las herramientas que pueden ser aplicadas a

la hora de considerar los escenarios de estrés que pueden presentarse y se desarrolla el concepto de *VaR* Condicional.

El capítulo 3 inicia con una descripción del Mercado Cambiario y su funcionamiento, así como una breve descripción de la pandemia por COVID-19 y el impacto que tuvo en la economía, especialmente en el valor de la paridad USD/MXN. Seguido de esto se realiza la aplicación de la Simulación Histórica y Simulación Montecarlo del *VaR* a la paridad, utilizando la serie histórica de precios de la divisa del mercado cambiario del 31 de agosto de 2012 hasta el 31 de julio de 2020 obtenidas del tipo de cambio FIX que es publicado y determinado por el Banco de México (BANXICO). Las fechas utilizadas para la aplicación fueron seleccionadas para tener robustez en la cantidad de datos empleados cubriendo ocho años de historia y porque abarcan uno de los periodos de crisis utilizados para los escenarios de estrés correspondiente a la pandemia por COVID-19, para el segundo escenario se utilizaron los precios registrados durante el año 2008 dejándolo fuera de la información histórica utilizada para las simulaciones. La aplicación se realiza para tres diferentes horizontes de tiempo, obteniendo también los valores para el Backtesting y $T - VaR$. Posteriormente se analiza el comportamiento de la paridad en los escenarios de estrés ya mencionados y se lleva a cabo un comparativo de las pérdidas máximas obtenidas durante estos periodos y los valores arrojados por el *VaR*.

En el último capítulo, se comentan las conclusiones a las que se llegaron mediante este trabajo. Dentro de estas conclusiones se corrobora que la hipótesis de la que se partió es cierta, ya que por los resultados obtenidos se observó que ninguna de las metodologías es mejor que otra, cada una presenta ventajas y desventajas en función de los supuestos de los que parte y el cómo están desarrolladas por lo que a la hora de tomar la decisión de cual será aplicada se tienen que tener en consideración otros factores que están relacionados con una visión ya sea personal o de negocio y sin olvidar que el *VaR* se trata de una probabilidad y que en este sentido el nivel de confianza seleccionado juega un papel muy importante.

Finalmente se incluye un glosario con los conceptos más mencionados a lo largo de este documento y de los que no se dio una explicación por no ser relevantes para el trabajo en cuestión.

Capítulo 1. Riesgo de mercado

1.1 Riesgo

Se entiende por riesgo a la posibilidad de producirse, por azar, un acontecimiento que origine una pérdida o daño. Y en el mundo en el que vivimos el riesgo se encuentra en prácticamente cualquier actividad humana, pues se relaciona con la incertidumbre asociada a los resultados esperados respecto a una acción emprendida.

En muchas ocasiones a este término se le asocia una interpretación negativa ya que, justamente como su definición lo indica, se asocia con peligro, daño o pérdida. Sin embargo, a pesar de la connotación negativa que se le pueda dar, es necesario tener en cuenta que el riesgo es inherente a cualquier decisión, pues en cada una de estas existe una probabilidad de fracaso, es decir que, es posible que los resultados no sean los que se esperaban en un inicio, en otras palabras, el riesgo se presenta en la variación entre los resultados estimados y los realmente alcanzados. Esta variación se puede expresar en pérdidas, cuando los resultados se encuentran por debajo de lo esperado, o como beneficios, cuando se tienen resultados por encima del objetivo y es por esto que existe la necesidad de gestionar el riesgo, para tener presente las posibles pérdidas y ganancias, además de que generar estrategias de contingencia para el mismo se vuelve de gran importancia.

1.1.1 Falacias relacionadas con el riesgo

Al estar presente en todas las acciones realizadas por el hombre, es fácil imaginar que al riesgo se le puedan asociar algunas ideas erróneas como consecuencia de una mala interpretación, pero identificar y aclarar estas falsedades puede ayudar a tener una mejor comprensión de lo que es el riesgo. A continuación, se presentan tres de las falacias más comunes.

1. El riesgo siempre es malo.

Como se mencionó al inicio de este capítulo, es común que al riesgo le sea asignada una interpretación negativa pues se ve asociado con pérdidas o perjuicios. No obstante, el riesgo no puede ser definido como bueno o malo, puesto que es algo que simplemente es y existe y que se presenta en la vida diaria de las personas y lo único que se puede hacer al respecto es aprender a gestionarlo.

Una forma de contradecir esta falacia es tomar en cuenta aquellos riesgos, tomados conscientemente, en los que se presentan oportunidades, es decir que, al arriesgarse existe la posibilidad de obtener algún beneficio, esto permite ver al riesgo justamente como una oportunidad, que puede tener diferentes resultados, pero que no implica nada negativo, únicamente los posibles resultados de una decisión tomada.

2. El riesgo debe ser eliminado a toda costa

Otra de las falacias más comunes y que se ve relacionada con la primera, es que al tener la concepción de que el riesgo siempre es malo este debe ser eliminado por completo a cualquier costo, pero esto no tiene por qué ser así ya que, para empezar, como ya se aclaró en el punto anterior, el riesgo no es ni malo ni bueno simplemente existe y debe ser gestionado, teniendo así la oportunidad de obtener algún beneficio o ganancia. Además de esto, es importante tener en cuenta que ningún riesgo puede ser eliminado completamente a costos razonables.

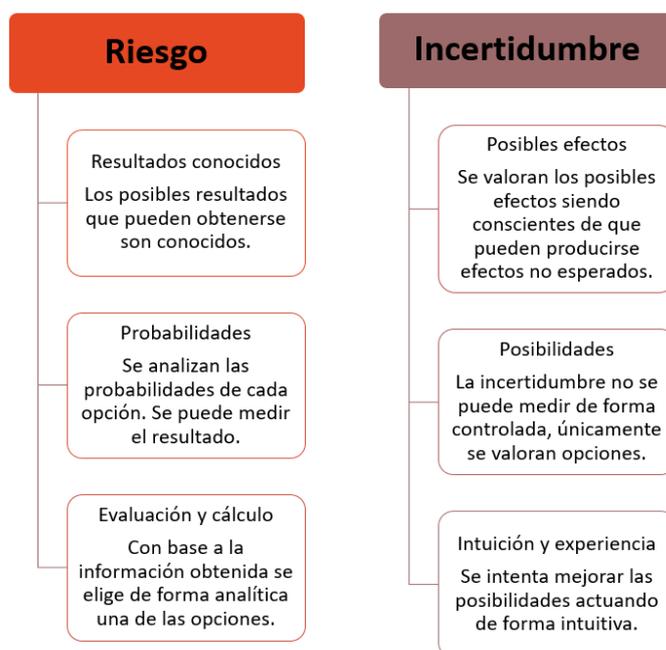
3. El riesgo es igual a la incertidumbre.

El riesgo está relacionado con la incertidumbre que se presenta a la hora de tomar una decisión o realizar alguna acción que puede generar diferentes resultados y es por esto que, frecuentemente, estos conceptos son confundidos, sin embargo, esto está muy lejos de ser verdad y distinguir las diferencias puede ser de mucha ayuda para entender mejor lo que es el riesgo.

La principal diferencia entre riesgo e incertidumbre es que el primero de estos es medible ya que contempla las probabilidades de todos los posibles resultados, mientras que la incertidumbre tiene que ver más con un análisis de los que pueden ser los resultados.

El siguiente esquema ilustra permite identificar las diferencias más importantes entre riesgo e incertidumbre.

Esquema 1. Diferencias entre riesgo e incertidumbre



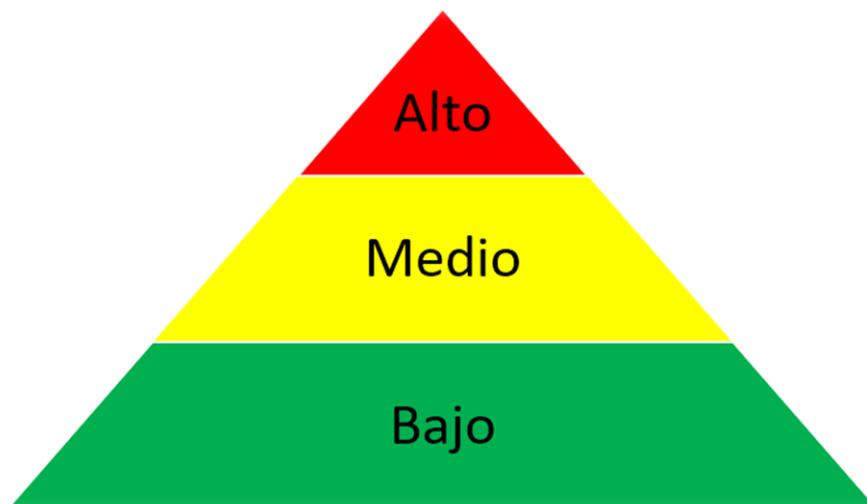
Fuente: Elaboración propia

Finalmente, para entender mejor las diferencias se tiene el ejemplo del lanzamiento de una moneda. En este caso sabemos que los posibles resultados son cara y cruz, por lo que cada uno de los lados tiene un 50% de probabilidad de presentarse y de esta manera sabemos el riesgo que está presente al elegir una de las caras, sin embargo, no sé puede tener certeza de cuál será el resultado y es aquí donde se encuentra la incertidumbre.

1.2 Clasificación de riesgos

Clasificar los riesgos permite identificarlos más fácilmente y de esta forma lograr establecer procesos de control que permitan mitigarlos o reducirlos. Una de las primeras clasificaciones se da de manera cualitativa y tiene que ver con el grado o relevancia que el riesgo represente. Esta clasificación divide al riesgo en tres niveles: alto, medio y bajo.

Imagen 1. Clasificación cualitativa del riesgo



Fuente: Elaboración propia

1. Alto - Tiene que ver con aquellos riesgos que representan un gran impacto o repercusión.
2. Medio - Representa a los riesgos que repercuten de manera parcial en las actividades o procesos.
3. Bajo - Se relaciona con los riesgos que no representan un ataque significativo en los procesos.

Esta clasificación permite identificar el impacto que representa el riesgo y de esta manera poder determinar el nivel de atención que se le dará a la hora de llevar a cabo la gestión del mismo.

Antes de continuar con una clasificación más profunda, es necesario mencionar que, ante un riesgo, dependiendo del grado del mismo que se esté dispuesto a afrontar, se puede asumir alguna de las siguientes posturas:

- Adverso al riesgo - Esta posición indica que, frente a cualquier circunstancia, el individuo prefiere el menor riesgo posible, es decir que, ante todas las posibles opciones su decisión siempre será inclinada a aquella que presente la menor probabilidad respecto a la diferencia que pueda existir entre el resultado obtenido y el esperado.
- Propenso al riesgo - A las personas que deciden tomar esta postura se les conoce como amantes del riesgo, pues siempre elegirán aquella opción que les ofrezca una mayor ganancia sin importar el riesgo que esto represente.
- Neutro al riesgo - Esta postura es tomada cuando el nivel de riesgo no es tomado en cuenta, lo único que importa es el nivel de ganancia que se desee, sin importar si el riesgo implicado es bajo o alto.

Como se mencionó al inicio del capítulo, se pueden obtener ganancias o beneficios derivados de la presencia de algunos riesgos y es justamente esta característica la que da origen a otra de las clasificaciones del riesgo: riesgo puro y riesgo especulativo.

El riesgo puro es aquel que se presenta en cualquier situación en la que no existe ninguna posibilidad de obtener algún tipo de beneficio o ganancia, el único escenario que se tiene como resultado es el de la pérdida. Y por lo general, este tipo de riesgo se encuentra en eventos que no se asumen con conciencia, es decir, que se presentan de forma inevitable. Por el contrario, el riesgo especulativo contempla dos posibles escenarios, el de la pérdida y el de la ganancia y, a diferencia del primero, este riesgo se toma a voluntad, es decir, que se requiere de una decisión consciente en la que sean considerados todos los factores que implica el asumir o no el riesgo.

Las clasificaciones ya mencionadas pueden considerarse generales pues pueden ser aplicables en los riesgos presentes en cualquier ámbito (político, económico, social, demográfico, etc.), sin embargo, para fines de este trabajo, es necesario prestar mayor atención a los riesgos relacionados con el ámbito económico.

Cualquier actividad económica realizada se encuentra expuesta a muchos factores de riesgo y es por esto que se dan tres grandes clasificaciones que permiten identificarlos de mejor manera para así poder llevar a cabo una mejor administración.

- Riesgos de negocio

Se refieren a aquellos riesgos que son asumidos por una compañía o institución con el objetivo de generar ventajas competitivas con respecto a las demás compañías, además de que al asumirlos se busca aumentar el valor de sus activos. Esta competencia, que

surgen en las diferentes actividades de negocio, genera otro tipo de exposición, que da lugar a los riesgos macroeconómicos que son el resultado de los ciclos económicos, fluctuaciones en bienes y políticas monetarias.

- Riesgos estratégicos

Este tipo de riesgos tienen que ver con cambios en los ambientes políticos y económicos por lo que la institución no tiene el control sobre ellos. También se les conoce como nonbusiness risks.

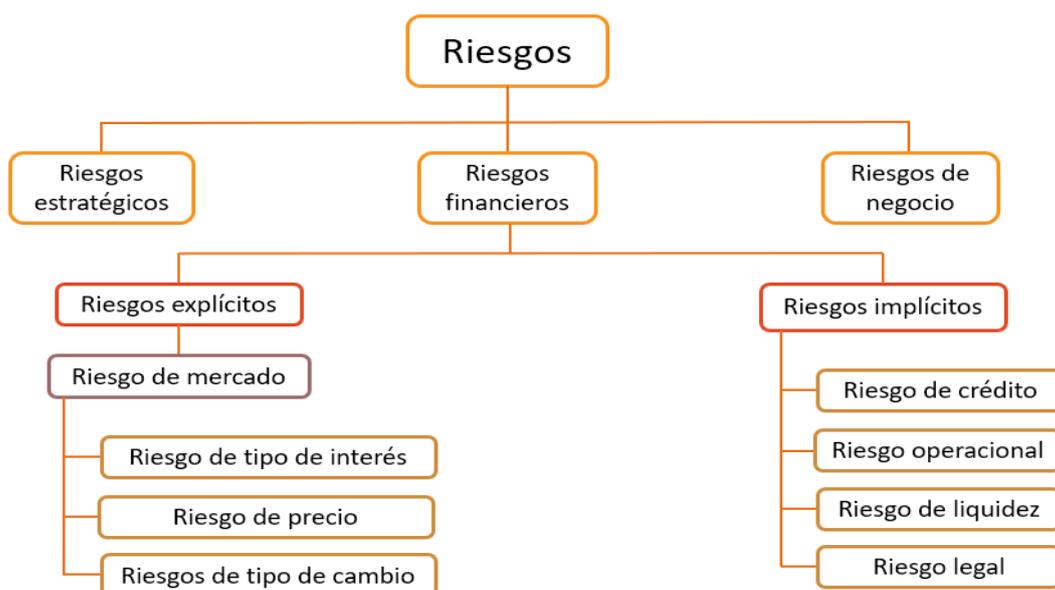
- Riesgos financieros

En el caso de las Finanzas el riesgo está relacionado con las posibles pérdidas presentes en un portafolio de inversión o en algún instrumento de los mercados financieros, donde se entiende por portafolio de inversión al conjunto de instrumentos, ya sea de renta fija o variable, que cotizan en el mercado bursátil en los que una persona, física o moral, decide invertir su dinero.

Y es este riesgo el que, para los fines de este trabajo, representa mayor importancia. Por esta razón será analizado a mayor profundidad.

Ya que se identificó al riesgo como las pérdidas que pueden presentarse en una inversión es importante entender que dichas pérdidas pueden derivarse de muchos factores, como son las fluctuaciones en el sector donde se encuentre la inversión, incumplimiento de alguna de las partes, inestabilidad en el mercado, la misma construcción del portafolio de inversión, etc. Es por esto que el riesgo financiero puede ser clasificado en diferentes categorías, tal como lo muestran el siguiente esquema.

Esquema 2. Clasificación de los riesgos financieros



Fuente: Elaboración propia

Como su nombre lo indica, los riesgos implícitos son aquellos que se encuentran incluidos dentro de las actividades financieras que puedan ser llevadas a cabo, pero que no están presentes en todo momento, mientras que los explícitos son aquellos que, desde un inicio, se sabe que están presentes dentro de las actividades realizadas.

Antes de presentar una descripción de cada uno de los riesgos en específico es necesario mencionar que existe otra forma de clasificar los riesgos financieros, dentro de la que se contemplan los cuantificables y los no cuantificables.

- Riesgos financieros cuantificables: Son aquellos riesgos para los que existen bases estadísticas que permiten medir las posibles pérdidas potenciales.
- Riesgos financieros no cuantificables: Son aquellos riesgos que se derivan de eventos inesperados para los que no existen bases estadísticas que permitan medirlos.

Dentro de los riesgos financieros cuantificables se encuentra otra clasificación más particular, los riesgos discrecionales y no discrecionales. Los primeros son el resultado de tomar una posición de riesgo, es decir, que depende de las decisiones tomadas en relación al portafolio de inversión construido, mientras que los no discrecionales resultan de la operación del negocio, pero no tienen nada que ver con la posición de riesgo asumida por el o los inversionistas.

Dentro de los riesgos discrecionales se presentan los siguientes tres tipos de riesgos financieros que a su vez se encuentran clasificados dentro de los riesgos explícitos e implícitos.

- Riesgo de mercado: Se deriva de las pérdidas que pueden presentarse en la inversión debido a cambios en los precios registrados en el mercado o fluctuaciones en factores tales como tasas de interés, tipos de cambio, volatilidad, etc. También puede definirse como la posibilidad de que el valor presente neto del portafolio de inversión presente un movimiento adverso a consecuencia de cambios en las variables del mercado que determinan el precio de los instrumentos que componen el portafolio.

Como se muestra en la ilustración 3 y en la definición anterior, del riesgo de mercado se derivan otros riesgos.

- Riesgo de tipo de interés: Se presenta por la exposición de la situación financiera a movimientos adversos en los tipos de interés (BIS, 1997).
- Riesgo de precio: Se presenta por los movimientos adversos, aumento o disminución, que pueden existir en los precios de activos financieros.
- Riesgo de tipo de cambio: Refleja la influencia que tiene la modificación en la paridad de la moneda nacional frente a alguna divisa.

Por otro lado, dentro de los riesgos implícitos se tienen los siguientes que también pueden ser clasificados dentro de los riesgos cuantificables.

- Riesgo de crédito: Se deriva de las posibles pérdidas que se presenten a causa del incumplimiento de pago de una contraparte. Es uno de los riesgos más importantes enfrentado por los bancos.
- Riesgo de liquidez: Se deriva de las pérdidas que se presentan como consecuencia de requerir más recursos para financiar los activos a un costo que pudiera ser inaceptable. También tiene que ver con la imposibilidad de transformar un activo en efectivo o, dicho de otra manera, la imposibilidad de vender un activo en el mercado.

En cuanto a los riesgos no discrecionales hay otros tres riesgos financieros, dos de ellos son considerados riesgos implícitos.

- Riesgo legal: Al igual que el riesgo de crédito tiene que ver con el incumplimiento de una contraparte, pero en este riesgo se contempla el que no se pueda exigir el cumplimiento del pago por la vía jurídica, debido a algún error de interpretación jurídica u omisión en la documentación.
- Riesgo operacional: Se deriva de diferentes situaciones como fallas en sistemas, procedimientos, modelos e incluso las personas que los manejan. También se relaciona con fraudes, falta de capacitación del personal e incluso renunciadas inesperadas de empleados que tenía todo el conocimiento en procesos clave.
- Riesgo de reputación: Se deriva de acciones que puedan atribuir desprestigio a una institución, ya sea por fraude, falta de capacitación al personal, errores en procesos, etc. Este tipo de acciones provocan que los clientes se vean inclinados por cambiar de institución lo que generaría pérdidas a la misma.

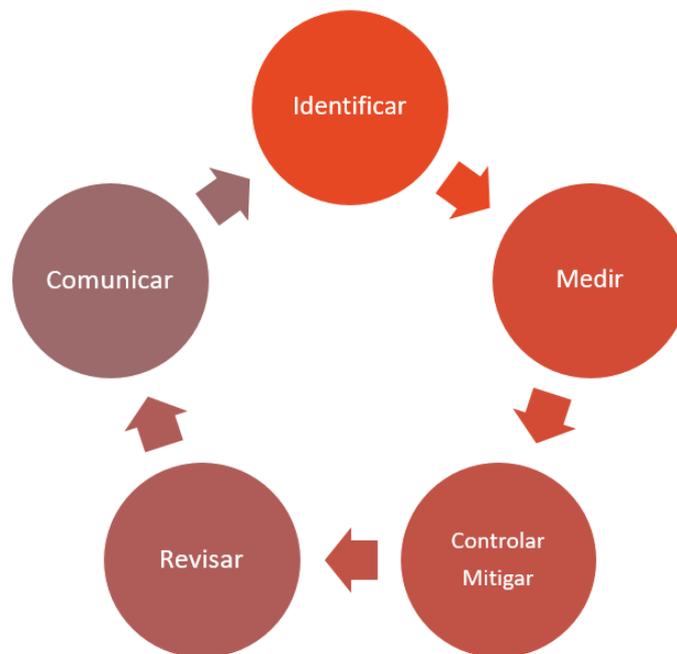
Una vez identificados los diferentes tipos de riesgos financieros, como se mencionó inicialmente, es importante medir el riesgo y generar estrategias de contingencia para evitar o disminuir las pérdidas.

1.3 Administración de riesgos

El desconocimiento del futuro es una situación a la que se enfrentan todas las personas, físicas o morales y hablando de inversiones financieras este desconocimiento se vuelve un elemento de suma importancia que se debe tener en cuenta para evitar pérdidas que no puedan ser sostenidas. Por esta razón es que la necesidad de desarrollar estrategias que permitan reducir y contrarrestar dichas pérdidas tiene tanta relevancia. Y es precisamente la administración de riesgos la que sirve como herramienta para la construcción de dichas estrategias.

La administración de riesgos tiene como objetivo principal reducir o evitar pérdidas económicas intolerables en cualquier inversión financiera y para cumplir con este objetivo establece un proceso a seguir, mismo que se muestra en el siguiente esquema.

Esquema 3. Proceso de la administración de riesgos



Fuente: Elaboración propia

El proceso de la administración de riesgos, si bien funciona como un ciclo, es necesario que comience con la identificación de los riesgos a los que se está expuesto, ya sea en un portafolio de inversión, en la compra y venta de activos o instrumentos financieros, etc. Para lograr identificarlos es necesario tener un claro entendimiento de donde se deriva cada uno y qué variables se ven involucradas en ellos y, partiendo de esto, se debe realizar un análisis profundo y detallado de la situación que se está enfrentando para poder identificar correctamente los riesgos presentes.

Una vez identificados los riesgos, el siguiente paso y uno de los más importantes en su administración, es la medición de los mismos, esto con el objetivo de tener presente las pérdidas máximas a las que se está expuesto en caso de que los resultados no sean los esperados. Generalmente estas pérdidas se obtienen mediante cálculos que contemplan las probabilidades de todos los posibles casos que pudieran presentarse, sin embargo, es importante tener en cuenta que para cada riesgo financiero existen diferentes métodos de cálculo.

Identificar y medir los riesgos permite construir estrategias que ayuden a controlar y mitigar los mismos que es el tercer paso en la administración del riesgo y una vez hechas estas estrategias es necesario mantener una constante revisión que permita corroborar

si las decisiones tomadas fueron las mejores y las metodologías aplicadas las correctas, todo esto para finalmente comunicar los resultados obtenidos y comenzar nuevamente con el proceso de la administración del riesgo.

Inicialmente se mencionó que el principal objetivo de la administración del riesgo es evitar pérdidas económicas insostenibles, sin embargo, este no es el único objetivo que tiene pues si bien el evitar pérdidas es algo que debe ser tomado en cuenta, el desempeño financiero también tiene que ser considerado, ya que un incremento en las ganancias es una de las metas más importantes en una inversión financiera.

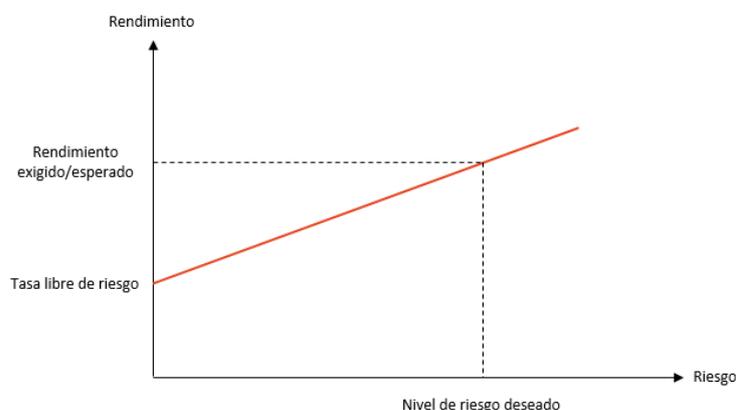
Por lo tanto, la administración del riesgo busca mejorar el desempeño financiero y esto lo pretende lograr mediante una correcta toma de decisiones de inversión. Y para poder tomar estas decisiones, además de entender el riesgo, es necesario comprender lo que es el rendimiento en una inversión.

Según la Real Academia Española (RAE) el rendimiento es un “producto o utilidad que rinde o da alguien o algo” (REAL ACADEMIA ESPAÑOLA, 2020). En finanzas se entiende por rendimiento de un activo o portafolio al cambio en su valor registrado en un periodo con respecto a su valor inicial.

La razón por la que el rendimiento es tan importante es porque a través de este un inversionista puede medir las ganancias obtenidas respecto al capital invertido inicialmente, por lo tanto, lo que se busca al realizar una inversión es conseguir rendimientos altos ya que esto significa que las ganancias obtenidas serán mayores.

Al buscar que las pérdidas económicas no se vuelvan intolerables y al mismo tiempo que el desempeño financiero incrementa se presenta una de las cuestiones más importantes en la administración del riesgo que es lograr un ajuste de rendimiento por riesgo asumido, es decir que, mientras más riesgosa sea una inversión se debe exigir un mayor rendimiento, como se muestra en la gráfica 1, y es por esto que una correcta medición de los riesgos es tan importante.

Gráfica 1. Rendimiento contra Riesgo



Fuente: Elaboración propia

Finalmente se tiene que la administración del riesgo es una herramienta muy importante en la toma de decisiones de inversión y que, a través de un proceso, se puede lograr obtener un balance entre el riesgo asumido y el rendimiento esperado. Para esto último es necesario tener en cuenta que el método aplicado para la medición de los riesgos debe ser seleccionado correctamente y de acuerdo a lineamientos establecidos en cada entidad financiera para cada país.

1.4 Regulación para la administración del riesgo

La constante interacción entre las entidades financieras ha generado la necesidad de establecer acuerdos que permitan mantener una regulación en el comportamiento de las mismas, esto con el objetivo de evitar que las actividades o decisiones tomadas por estas sean desarrolladas sin estándares óptimos ni procesos establecidos y ocasionando que cualquier acción pueda ser realizada en completa libertad sin ningún tipo de sanción, lo que podría impedir un buen desarrollo y crecimiento económico teniendo como consecuencias crisis económicas para todos los países.

Los Acuerdos de Basilea son un referente mundial que busca desarrollar un entendimiento común, compartir asuntos, estrategias y técnicas sobre la legislación y regulación bancaria. A través de estos se generan normas internacionales que tengan como consecuencias buenas prácticas y una correcta directriz en la toma de decisiones. Estos acuerdos son realizados por el Comité de Supervisión Bancaria de Basilea.

Para entender cómo es que se dio el desarrollo de los Acuerdos de Basilea es de gran ayuda situarse en diferentes puntos en el tiempo para así identificar los datos más relevantes en la historia de esta normativa.

La creación de los Acuerdos de Basilea surge como consecuencia de la crisis económica de 1974 provocada por el cierre del banco Bankhaus Herstatt en Alemania. Las consecuencias provocadas por esta crisis hicieron inminente la necesidad de mejorar e incrementar la confianza y estabilidad en el sistema financiero internacional y es por esto que se inicia la creación de los Acuerdos de Basilea cuyo principal objetivo era dar solución a los problemas de supervisión en los sistemas financieros, así como establecer directrices y normas de supervisión en áreas de especial interés.

Y es así que en 1988 se firma el primer acuerdo conocido como Basilea I que se trataba únicamente de recomendaciones que fueron perfeccionadas en los siguientes dos acuerdos. Sin embargo, aquí se dispuso por primera vez una manera de medir el capital requerido por los bancos en función del incumplimiento en el pago de sus activos o,

dicho de otra manera, en función del riesgo de crédito que es el riesgo con mayor importancia en Basilea I.

El siguiente acuerdo fue aprobado en 2004, aunque su proceso de creación inició en 2001, y es conocido como Basilea II. Este acuerdo buscaba desarrollar y mejorar algunos conceptos establecidos en Basilea I, adaptándose a escenarios que no fueron previstos en el primer acuerdo.

En Basilea II se desarrolló un poco más el cálculo de los activos ponderados por riesgo, además de que se comenzaron a aplicar calificaciones de riesgo basadas en modelos internos. También incorporo nuevas tendencias en la medición de los riesgos, además de prestar mayor atención en metodologías internas, supervisión y disciplina de mercado y esto último lo logro estableciendo tres pilares, a través de los cuales, la administración del riesgo comienza a enfocarse en las diferentes categorías de riesgos, tomando en cuenta los cuantificables y no cuantificables. Esto último llevó a incluir al riesgo operativo como una nueva clase de riesgo.

En diciembre de 2010 se desarrolló el siguiente acuerdo, Basilea III, que surgió como consecuencia de la crisis económica del 2008. Su objetivo principal fue la creación de fondos suficientes en las instituciones bancarias que les permitieran cubrir pérdidas potenciales.

Años después, en 2017, se desarrollaron reformas a Basilea III dando como resultado el acuerdo de Basilea IV en el que el tema central es la importancia de la liquidez en las entidades financieras. Como se mencionó, Basilea III surgió como consecuencia de la crisis enfrentada en 2008 y es justo esta crisis la que mostró que la liquidez es algo que debe ser tomado en cuenta y que hasta el acuerdo II no había tenido tanta relevancia. Por esto mismo es que en la reforma del tercer acuerdo se establecen dos estándares mínimos para la liquidez de financiación en las entidades financieras.

Con la creación de los Acuerdos de Basilea surgieron otros comités cuya intención fue la aplicación de una regulación orientada a los riesgos en diferentes instituciones. Un ejemplo de esto se da en los mercados de valores y los seguros con la creación de la Organización Internacional de Comisiones de Valores y la Asociación Internacional de Supervisores de Seguros que, bajo la tutela del Comité de Supervisión de Basilea, estas tres organizaciones trabajan en conjunto para guiar una correcta administración de los riesgos.

1.5 Riesgo de mercado

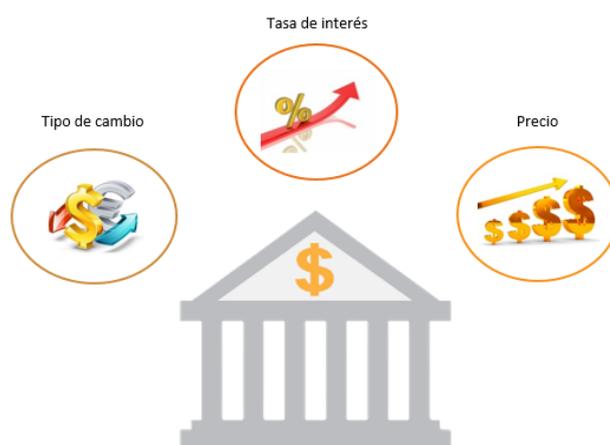
Como se mencionó en la sección dos de este capítulo, el riesgo de mercado es un riesgo financiero explícito y cuantificable que se deriva de las variaciones en variables como tasas de interés, tipos de cambio, volatilidad, etc. También puede definirse como la posibilidad de que el valor presente neto de un portafolio de inversión presente un movimiento adverso a consecuencia de cambios en las variables del mercado que determinan el precio de los instrumentos que componen el portafolio.

Por otro lado, de acuerdo con el Banco de Pagos Internacionales, BIS por sus siglas en inglés, el riesgo de mercado representa el riesgo de sufrir pérdidas a causa de cambios en el precio de instrumentos financieros como bonos, acciones y monedas.

Estas definiciones muestran la importancia de este riesgo, ya que un cambio en las variables mencionadas va a influir significativamente en el valor de la posición de mercado que mantenga la entidad financiera, generando pérdidas o ganancias importantes. Es por esto que debe ser gestionado correctamente y para esto es necesario comprender los principales factores que ocasionan este riesgo y que generan consigo otra clasificación dentro del mismo.

Los factores se muestran en la siguiente imagen y, aunque no son los únicos, si son los de mayor importancia. Su importancia radica en el hecho de que al haber un movimiento inesperado en alguno de ellos el riesgo de mercado se hace presente, así como la necesidad de una gestión de este.

Imagen 2. Principales factores en el riesgo de mercado



Fuente: Elaboración propia

Antes de dar una descripción más detallada de cada uno de estos factores y los riesgos que implica cada uno, es importante conocer un poco del por qué es tan importante la gestión y el control del riesgo de mercado. Una manera sencilla de reconocer esta

importancia es a través de diferentes acontecimientos que se han presentado a lo largo de la historia en el contexto económico mundial, donde la volatilidad parece ser la palabra que mejor describe la razón de estos acontecimientos.

Tabla 1. Acontecimientos históricos generadores de volatilidad en el sistema financiero

Año	Acontecimiento
1971	Se abandonó el sistema de tipos de cambio fijos para pasar a un nuevo sistema de tipos de cambio flotantes, lo que aumentó considerablemente la volatilidad de esta variable financiera.
1973	La crisis del petróleo trajo consigo un fuerte incremento de la tasa de inflación, así como una elevada volatilidad en los tipos de interés.
1987	El 19 de octubre (Lunes Negro), la bolsa americana experimentó una importante caída, cifrada en torno al 23%
1990	En agosto, se produce la invasión iraquí de Kuwait, uno de los principales productores de crudo del mundo, lo que desencadena la Guerra del Golfo a comienzos de 1991.
1992	En el segundo cuatrimestre tuvo lugar la crisis del Sistema Monetario Europeo, que se tradujo en dos devaluaciones sucesivas, del 5% y del 6%, para la peseta.
1994	En la primavera de 1994 se produjo el desplome del mercado de bonos, ante el inesperado aumento de los tipos de interés americanos. A esto se suma la crisis mexicana a final del mismo año, que provocó la devaluación del peso a comienzos de 1995.
1995	En febrero, la bolsa japonesa sufre un fuerte descenso.
1997	La Reserva Federal aumenta los tipos y en julio de este año tiene lugar la crisis asiática y la devaluación de la moneda tailandesa entre otras.
1998	Se produce un efecto contagioso de la crisis asiática a los países latinoamericanos y en el mes de agosto, el gobierno ruso devaluó el rublo y declaró la moratoria de su deuda.

2001	Tras los atentados del 11 de septiembre, las bolsas de EEUU y el Nikkei de Tokio cayeron más del 6%.
2007 – 2010	Se presenta la mayor crisis financiera desde 1930 en EEUU, como consecuencia de una relajación en la evaluación del riesgo. Esta crisis se contagia al resto del mundo.

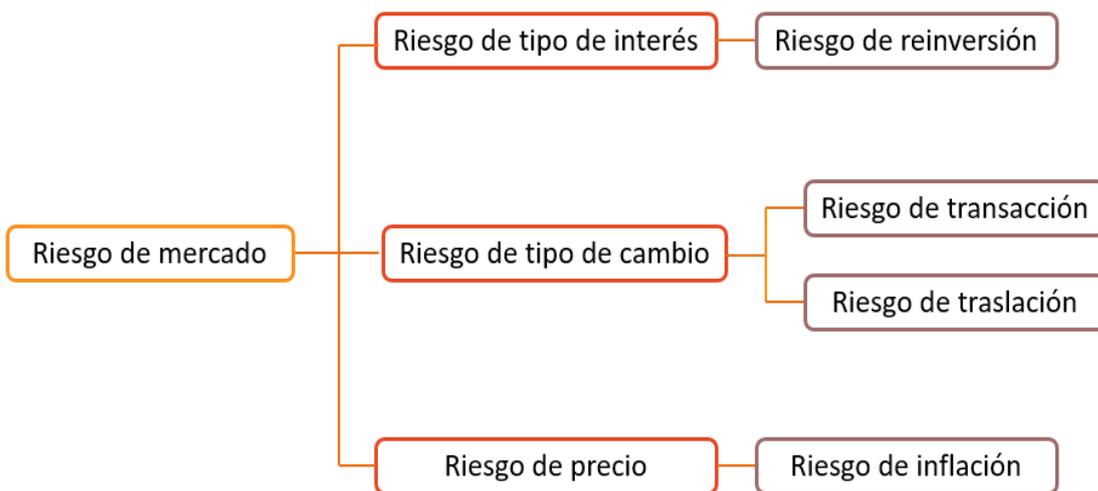
Fuente: El riesgo de mercado su medición y control, página 9

La tabla anterior muestra algunos de los acontecimientos más importantes que se han presentado a lo largo de la historia y que han marcado un antes y un después en los sistemas financieros mundiales. Todos estos acontecimientos tienen algo en común, la volatilidad en las diferentes variables financieras de mercado. Por esta razón es tan importante llevar a cabo una correcta administración y control del riesgo de mercado, además de que su presencia no solo afecta a las entidades financieras también afecta otras instituciones no financieras como empresas y entes públicos.

1.5.1 Clasificación del riesgo de mercado

Como se mencionó, los siguientes tres factores dan origen a una clasificación dentro del riesgo de mercado y entender cada uno de estos riesgos permite tener una visión más clara de él y su importancia.

Esquema 4. Clasificación del riesgo de mercado



Fuente: Elaboración propia

Riesgo de tipo de interés. Este riesgo se encuentra relacionado con las variaciones adversas en la tasa de interés, que es una de las variables financieras de mayor

importancia a la hora de realizar una inversión, solicitar un préstamo o crédito y muchas otras más situaciones financieras y es un tipo de riesgo al que todos los agentes económicos están expuestos.

Dentro de este riesgo se pueden encontrar dos tipos de riesgos más específicos:

- Riesgo de interés de balance. Este riesgo se deriva de la estructura patrimonial de la entidad financiera, es decir, del tipo de gestión que realice, activa o pasiva. Si se trata de una gestión pasiva, un aumento en las tasas de interés podría significar pérdidas significativas, mientras que una gestión activa se ve afectada ante la baja en las tasas de interés.
- Riesgo de interés de mercado. Este tipo de riesgo afecta el precio o valor de mercado que tenga un instrumento financiero en el que se negocian tipos de interés, principalmente en renta fija y derivados sobre tipos de interés.

El esquema anterior muestra que dentro del riesgo de mercado se encuentra otro tipo de riesgo conocido como riesgo de reinversión que se presenta ante la posibilidad de poder reinvertir los flujos intermedios obtenidos durante el horizonte de tiempo de una inversión, al mismo tipo de interés de la inversión inicial. En este caso, el riesgo se presentará al haber una disminución en las tasas de interés, pues la reinversión de los flujos obtenidos tendrá que reinvertirse a una tasa menor que la inicial.

Riesgo de tipo de cambio. Este riesgo hace referencia a los cambios que puedan presentarse en la paridad de una divisa frente a otra, ya que, dependiendo de la posición seleccionada, una variación en la moneda puede provocar ganancias o pérdidas.

Dentro de este riesgo se encuentra una clasificación más profunda que abarca otros dos tipos de riesgos.

- Riesgo de transacción. Este riesgo está asociado al horizonte de tiempo que sea considerado en el contrato, pues entre mayor sea el tiempo transcurrido entre el inicio del contrato y la liquidación, la posibilidad de que haya variaciones en el tipo de cambio es mayor, por lo que el riesgo es más alto.
- Riesgo de traslación. Se ve reflejado en los aspectos contables de la entidad cuando esta tiene subsidiarias o filiales en otro país, específicamente en la ganancia o pérdida que se presenta en el momento de la traslación de los estados financieros a alguna de las filiales que manejan una moneda diferente a la de la entidad principal.

Riesgo de precio. Se trata del riesgo presente por los movimientos adversos, por un lado, en el precio de los activos financieros de renta variable, derivados, acciones o índices bursátiles, y por otro, en el precio de materias primas, también conocidas como commodities y sus derivados.

1.5.2 Basilea y el riesgo de mercado

En la sección 1.4 se mencionaron las regulaciones más importantes para la administración del riesgo destacando, principalmente, los acuerdos propuestos por el Comité de Basilea. Es por esto que es necesario conocer un poco lo que estos acuerdos dicen y recomiendan sobre el riesgo de mercado y su administración.

El Comité de Basilea define el riesgo de mercado como el riesgo de presentarse pérdidas debido a variaciones en los precios de mercado. Dado que, para este Comité, un tema muy importante son los requerimientos de capital, se establece que los riesgos a los que está sujeto el requerimiento de capital por riesgo de mercado son:

1. Riesgos incluidos en instrumentos que pertenecen a la cartera de negociación, tales como, riesgo de incumplimiento, de tasa de interés, de diferencia de rendimiento, de renta variable y de tipo de cambio.
2. Riesgos incluidos en instrumentos que pertenecen a la cartera de inversión, como riesgo de tipo de cambio.

Una vez identificados los instrumentos que deben ser incluidos para el requerimiento de capital, la regulación propone dos metodologías para determinar el riesgo de mercado: el método estándar y el método bajo modelos internos.

De acuerdo al Comité de Basilea, las instituciones deben calcular y emitir el método estándar de forma mensual a su supervisor. Este método indica que el requerimiento de capital se calcula con la suma de tres componentes, el requerimiento de capital mediante un método basado en sensibilidades, el requerimiento de capital por riesgo de incumplimiento y el suplemento por riesgo residual.

El siguiente esquema resume de manera general el funcionamiento del método estándar propuesto por el Comité de Basilea.

Esquema 5. Método estándar para la medición del riesgo de mercado



Fuente: BIS 2016

Por otro lado, para que una entidad pueda hacer uso de un modelo interno para el cálculo del requerimiento del capital es necesario que este sea aprobado su autoridad supervisora correspondiente, que aprobará el modelo únicamente si la entidad cumple al menos con características generales que se encuentran enlistadas en el documento del BIS 2016.

Una vez que los modelos internos sean válidos, es decir, que se haya comprobado que son conceptualmente sólidos y captan con precisión todos los riesgos importantes, es necesario tener en cuenta que esta validación, además de haberse llevado a cabo desde la fase inicial del modelo, será realizada nuevamente cada vez que exista algún cambio significativo en el mismo o se presenten cambios en la estructura del mercado o la composición de la cartera que puedan alterar la precisión del modelo.

1.5.3 Métodos de medición del riesgo de mercado

Ya que se tiene una idea más clara de la definición de cada uno de los riesgos de mercado es más sencillo identificar a qué tipo de riesgo se puede enfrentar una institución financiera y esto representa el primer paso en el proceso de la administración del riesgo que es una de las herramientas más importantes en términos de riesgos, pues a través de este proceso es posible mitigar y controlar las posibles pérdidas e incluso incrementar las ganancias.

Una vez identificado el tipo de riesgo al que se tiene que hacer frente, el siguiente paso es el de la medición, considerado como uno de los más importantes pues permite conocer las posibles pérdidas máximas a las que se puede enfrentar la institución y tomar decisiones de acuerdo con qué posición frente al riesgo se está dispuesto a asumir con el objetivo de obtener ciertas ganancias.

En cuanto al riesgo de mercado existen diferentes métodos para medirlo, mayormente enforcado en el riesgo de tipo de interés y a continuación se da una breve descripción de los más conocidos.

- **Duración y duración modificada**

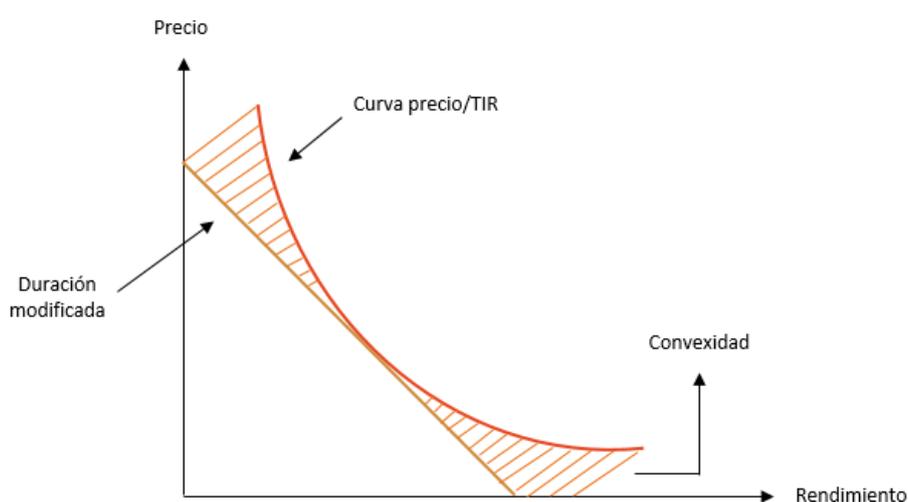
La duración es una medida de la longevidad o, como su nombre lo indica, de la duración de un activo financiero del que se derivan uno o varios flujos de caja. En términos generales, la duración permite conocer el tiempo promedio en que se recuperará una inversión inicial.

A partir de este método se pueden obtener expresiones que permiten medir la sensibilidad en el precio de un activo financiero ante cambios en la tasa de interés y es precisamente el incluir dicha sensibilidad la que da origen a un concepto conocido como **duración modificada**.

En este caso la duración actúa como un multiplicador a las variaciones que se presenten en la tasa de interés, por lo tanto, entre mayor sea la duración, mayor será el riesgo al que se esté expuesto, pues la variación en el precio será mucho más alta.

A la hora de utilizar la duración modificada como indicador de la variación en el precio respecto a movimientos en la tasa de interés se está expuesto a un error derivado del hecho de que la variación del precio de un bono respecto a la variación del rendimiento no es lineal, lo que trae consigo un nuevo concepto conocido como **convexidad** que será mayor cuanto mayor sea la variación en los rendimientos como muestra la siguiente gráfica:

Gráfica 2. Curva precio vs rendimiento, duración modificada y convexidad



Fuente: Elaboración propia

Debido a que este error va incrementando, la duración es considerada una buena aproximación únicamente para variaciones de la tasa de interés que son inferiores al 0.5%, lo que equivale a 50 puntos básicos (Feria D., 2005).

- **Convexidad**

La convexidad surge de la divergencia que se presenta entre la estimación proporcionada por la duración modificada respecto a la sensibilidad de un título y la variación real del precio experimentada por dicho título ante cambios en la tasa de interés.

Este nuevo cálculo permite tener un valor mucho más exacto sobre la variación del precio de un título ante cambios en la tasa de interés de hasta 100 puntos básicos (Feria D., 2005).

Algo que es importante tener en cuenta es que las medidas mencionadas anteriormente permiten conocer la volatilidad de un título de renta fija, es decir, que son herramientas utilizadas para la gestión del riesgo de mercado en carteras de renta fija.

El hecho de que estos métodos tengan como hipótesis inicial el que el rendimiento y la variación son iguales a lo largo del tiempo representa una de sus principales debilidades, pues esto no se cumple normalmente en la realidad, además de que son buenas medidas únicamente cuando las variaciones en la tasa de interés no sobrepasen los puntos básicos ya mencionados.

Esta situación da origen a un numeroso desarrollo de definiciones alternativas de la duración, modificando la hipótesis sobre el comportamiento de la tasa de interés como lo son los **gaps de duración** que se relacionan con la diferencia entre la duración de los activos y pasivos de una entidad.

Otro tipo de instrumentos que existen y que no son de renta fija son los derivados y para este tipo de instrumentos algunas de las metodologías más conocidas son las griegas **delta, gamma y vega**. Estos métodos miden diferentes aspectos del riesgo de mercado de la posición del instrumento o portafolio con respecto a un parámetro sobre el que el instrumento en cuestión como lo es el precio y la volatilidad.

Las metodologías que se han presentado y algunas otras, que para fines de este trabajo no son relevantes y no fueron incluidas, comenzaron a verse cuestionadas debido a la evolución del mercado que mostró situaciones que no eran cubiertas por estos métodos, como lo es el hecho de que con el paso del tiempo las carteras de las entidades financieras se volvieron mucho más complejas, por lo que la necesidad de medidas de riesgo más precisas y consistentes se volvió imprescindible, además de que la ausencia de una metodología estándar para el cálculo del riesgo de mercado impedía realizar comparaciones entre las diferentes entidades financieras, impidiendo el definir recomendaciones para las mismas.

Otra de las debilidades de las metodologías mencionadas anteriormente es el que no proporcionan una forma de medir el riesgo total al que la institución financiera esta expuesta, además de que su interpretación puede volverse muy complicada para aquellos que no cuenten con conocimientos relacionados con su cálculo.

Estas debilidades mostraron la necesidad de una metodología más eficiente a la hora de medir el riesgo de mercado, dando lugar a la creación de uno de los métodos que más relevancia ha tomado a lo largo del tiempo. Esta metodología recibe el nombre de *VaR* (Value at Risk) y fue presentado como una medida de riesgo de mercado que proporcionaba en un número el riesgo de mercado total de un portafolio de activos financieros y que se estableció como un estándar en todas las instituciones financieras.

1.5.4 Value at Risk (*VaR*)

El *VaR* es uno de los métodos que más relevancia ha tomado a lo largo del tiempo y de los más usados para el cálculo del riesgo de mercado. Fue desarrollado por estadísticos y matemáticos de la empresa financiera JP Morgan en 1994.

La importancia de este método surge en el momento en el que es señalado como una de las herramientas recomendadas para la medición del riesgo de mercado por organismos internacionales como lo son el Comité de Basilea, la SEC (Securities and Exchange Commission), la ISDA (International Swap and Derivatives Association) y la FASB (Financial Accounting Standards Board). Dichos organismos reconocen en el *VaR* una herramienta esencial para el cálculo del requisito mínimo de capital de una entidad financiera ponderado en función del riesgo de mercado.

Es por esto que el *VaR* se ha convertido en una referencia obligada para gestores y reguladores de riesgo, constituyendo una pieza fundamental en el patrón de buenas prácticas de una entidad financiera, permitiendo una correcta gestión y control de la exposición al riesgo de mercado.

1.5.4.1 Definición del *VaR*

El *VaR* es un método utilizado para cuantificar el riesgo de mercado de una cartera de activos financieros o una determinada posición mediante el uso de estadísticas tradicionales.

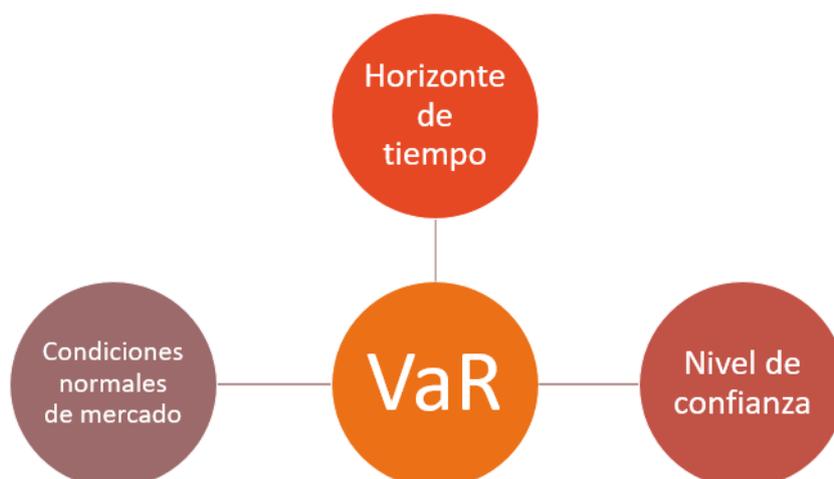
Esta metodología puede llevarse a cabo en términos de la rentabilidad de los activos o en términos nominales, es decir, mediante pérdidas y ganancias (Profit and Loss, P&L), razón que lo vuelve tan atractivo como medida de riesgo, ya que al poderse presentar en estos términos su interpretación resulta sencilla aun cuando no se cuentan con conocimientos relacionados con su cálculo.

El concepto del *VaR* surgió a partir de la idea de que una cartera es eficiente cuando logra maximizar su rendimiento para un nivel de riesgo determinado o cuando, dado un nivel de rentabilidad, el riesgo es minimizado. Partiendo de esto se tiene que esta metodología busca medir la relación entre la rentabilidad y el riesgo con el objetivo de obtener una cartera eficiente.

Finalmente, el *VaR* de una cartera mide la pérdida máxima esperada para un intervalo de tiempo y un nivel de confianza determinados, considerando en todo momento condiciones normales de mercado.

Esta última definición da lugar a las variables más importantes y necesarias a la hora de calcular el *VaR*, que son el horizonte de tiempo u horizonte temporal, nivel de confianza y condiciones normales de mercado.

Esquema 6. Parámetros utilizados en el cálculo del Valor en Riesgo



Fuente: Elaboración propia

- **Horizonte temporal**

Mediante el horizonte temporal se define el periodo de tiempo durante el cual se tiene pensado que se estará expuesto al riesgo, por ejemplo, si se elige un horizonte diario, al calcular el *VaR* se estaría obteniendo la pérdida máxima probable dentro de un día y en el caso de elegir un horizonte temporal a un año, el *VaR* reflejaría la peor pérdida que se podría experimentar dentro un año.

Sin embargo, la decisión de cuál será el valor de este parámetro no se debe dar de manera arbitraria, ya que la naturaleza de la posición se ve involucrada, así como el periodo de tiempo necesario para su cobertura o liquidación. Es por esto que a la hora de decidir cuál será el horizonte temporal es necesario tomar en cuenta la liquidez de la posición. A continuación, se presentan algunos ejemplos de los horizontes temporales utilizados por diferentes usuarios.

Tabla 2. Horizonte temporal usados por diferentes usuarios en el cálculo del VaR

Horizonte temporal	Usuario
Diario	J.P. Morgan y Chase Manhattan Bank
10 días	Banco Internacional de Pagos de Basilea (BIS)
Mensual	Fondos de inversión y pensiones
65 días	Empresas no financieras

Fuente: Elaboración propia

El *VaR* diario es conocido como Daily Earning at Risk (DEaR) que puede ser traducido como Ganancias Diarias en Riesgo y es uno de los más utilizados por diferentes instituciones, especialmente por los bancos y una de las razones principales es porque mediante una extrapolación del mismo se puede obtener el *VaR* para periodos más largos y esto será explorado más adelante.

- **Nivel de confianza**

El nivel de confianza es otra de las variables determinantes a la hora del cálculo de esta medida de riesgo. Mediante este parámetro se conoce la probabilidad con la que la institución obtendrá una pérdida menor o mayor al *VaR*. No existe un valor para el nivel de confianza determinado o estándar, generalmente las instituciones optan por utilizar un nivel comprendido entre un 95 y 99%.

Este concepto da origen a otro conocido como nivel de significancia que representa el complemento del nivel de confianza, es decir, si se define este nivel como C , el nivel de significancia será $1 - C$.

Como ejemplo, supongamos que una institución obtiene que el *VaR* diario para una determinada cartera y con un nivel de confianza del 95% es igual a 1 millón de pesos. Esto indica que con una probabilidad igual al 5%, la institución incurrirá en una pérdida superior al millón de pesos o que con probabilidad del 95% las pérdidas estarán por debajo del millón. Otra manera de interpretarlo es que 5 de cada 100 días la institución sufrirá una pérdida mayor al millón de pesos.

Algo que puede ser tomado en cuenta a la hora de definir el nivel de confianza es la postura que se tenga respecto al riesgo. En el caso de mantener una posición adversa al riesgo se recomienda considerar un nivel de confianza alto, para tener mayor certeza acerca de la máxima pérdida posible. Por otro lado, si el *VaR* únicamente es utilizado como indicador de la exposición de riesgo de la entidad, el nivel de confianza puede ser elegido de manera más arbitraria.

- **Condiciones normales de mercado**

Aunque este parámetro no se ve reflejado a la hora del cálculo del *VaR*, es importante tener en cuenta que, dentro del marco teórico, este es calculado bajo condiciones normales de mercado, es decir, que se considera un comportamiento estable dentro del mercado y las variables más importantes relacionadas con el mismo, no se consideran casos como crisis económicas, devaluaciones o depreciaciones, incrementos de precios o tasas de interés. Si bien hay normativas que sugieren o exigen el uso de escenarios históricos de grandes pérdidas, como lo es la normatividad para las SIEFORES, esta no es una condición establecida directamente por la metodología del *VaR*.

Es importante mencionar esto ya que, en caso de presentarse una condición atípica en el mercado, el *VaR* no funcionará como una medida de riesgo de mercado representativa para la institución.

1.5.4.2 Definición estadística

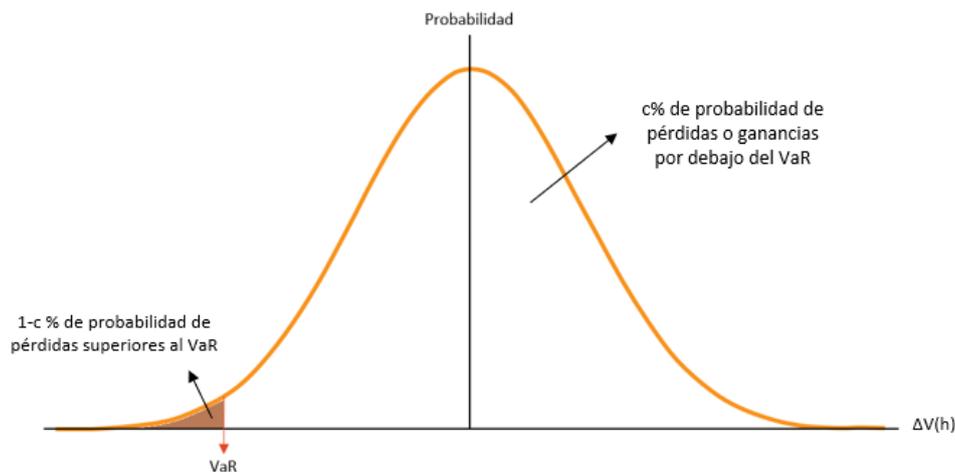
Una vez que se conocen los parámetros más importantes a la hora de calcular el *VaR* es necesario conocer su definición estadística.

Para la definición del *VaR*, sea $\Delta(h)$ el cambio experimentado en el valor de la cartera (pérdida o ganancia) entre t y $t + h$. Si en el tiempo t el valor de la cartera es conocido, en $t + h$ este valor será aleatorio, lo que permite definir la función de distribución de $\Delta V(h)$ denotada como $F_h(x)$. De esta forma, el *VaR* nominal en un horizonte de tiempo h y con un nivel de confianza c se define como:

$$P[\Delta(h) \leq VaR] = c = F_h(VaR)$$

De manera gráfica esto puede representarse de la siguiente manera:

Gráfica 3. Descripción gráfica del VaR



Fuente: Elaboración propia

Desde la definición ya mostrada para el *VaR* y observando la gráfica, el *VaR* puede ser visto como un percentil de la distribución que toman las variaciones del valor de mercado de la cartera en un horizonte de tiempo especificado.

Como ya se ha mencionado una de las ventajas de utilizar el *VaR* como medida de riesgo radica en que, aunque suele calcularse en términos de rentabilidad, puede ser presentado en términos de Pérdidas y Ganancias (P&L por sus siglas en inglés). En este sentido y siguiendo con la notación ya utilizada, suponiendo que el valor en términos de rentabilidad del *VaR* resulta ser el percentil $R_{t,t+h}^*$, se define el ***VaR absoluto*** como:

$$VaR (absoluto) = V_t - V_{t+h}^* = V_t - V_t(1 + R_{t+h}^*) = -V_t R_{t+h}^*$$

Existe otro tipo de *VaR* denominado **VaR relativo** que considera las pérdidas que puedan presentarse en relación a la rentabilidad esperada en la cartera denotada como $\mu = E(R_{t,t+h})$. En este caso tenemos la siguiente expresión:

$$VaR (relativo) = E(V_{t+h}) - V_{t+h}^* = -V_t (R_{t+h}^* - \mu)$$

Este concepto toma importancia cuanto se trabaja con horizontes temporales mayores a un día o una semana, ya que para casos como este el valor esperado para la rentabilidad es muy bajo, por lo que el valor del *VaR* absoluto y el *VaR* relativo serán prácticamente iguales.

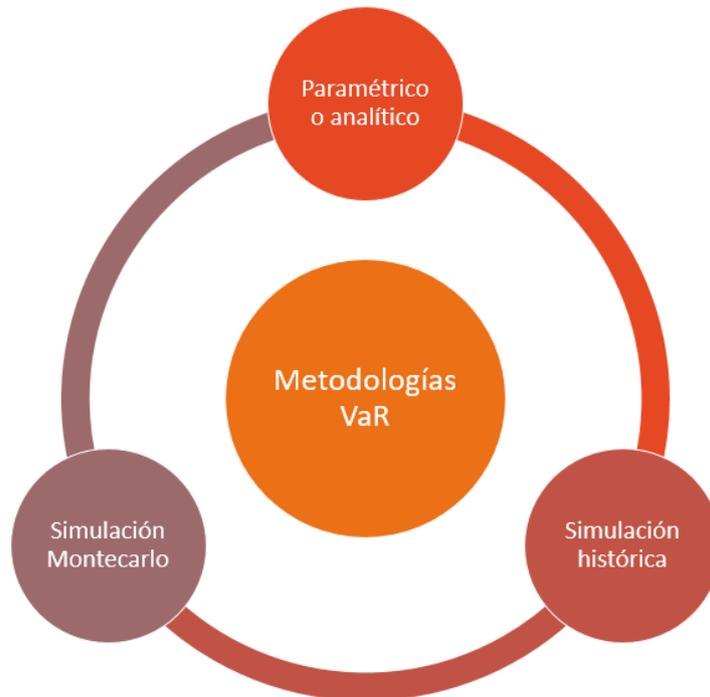
Todo lo que se ha mostrado hasta ahora muestra que el *VaR* se trata más de un concepto que de una metodología en sí, a pesar de necesitar una serie de parámetros específicos como lo son el nivel de confianza y el horizonte de tiempo, también es necesario tener en consideración la metodología que se está utilizando para su cálculo y estas metodologías pueden ser definidas como el conjunto de procedimientos que son utilizados para el cálculo de la cifra del Valor en Riesgo y son estos procedimientos los que serán abordados en el siguiente capítulo.

Capítulo 2. Metodologías para el cálculo del VaR

Como se mencionó en el capítulo anterior, el VaR puede ser visto más como un concepto que como una metodología que permite tener una sensibilidad aproximada a lo que pasaría en el peor escenario posible dado un horizonte de tiempo y un nivel de confianza definidos. Sin embargo, también es importante la metodología que se lleve a cabo para obtener este valor pues dependiendo de esta metodología el Valor en Riesgo podrá ser mejor o peor en determinadas situaciones, por lo que la selección del método que se va a aplicar se vuelve una decisión importante por parte del gestor de riesgos que deberá tener en cuenta las ventajas y desventajas de cada una de las metodologías.

Se distinguen tres principales enfoques para el cálculo del VaR:

Esquema 7. Metodologías para el cálculo del VaR



Fuente: Elaboración propia

1. Método paramétrico o analítico

En este método el supuesto más grande radica en la consideración de que las rentabilidades de los factores siguen una distribución normal multivariada. Una de las ventajas más grandes que tiene esta metodología es que analíticamente se vuelve muy tratable, sin embargo, solo puede ser generalizado a formas paramétricas como la Normal, la t-Student o mixturas de estas mismas. Además de esto, es necesario tener en cuenta que no siempre se conoce la distribución que siguen las rentabilidades en el horizonte h que se haya seleccionado.

2. Simulación histórica

Esta metodología, a diferencia de la anterior, hace la menor cantidad de supuestos acerca de la distribución de las rentabilidades, considera únicamente una gran cantidad de datos históricos para estimar el *VaR* bajo el supuesto de que todas las posibles variaciones futuras ya se han observado en el pasado.

3. Simulación Montecarlo

Este método hace supuestos muy similares a los del método paramétrico, sin embargo, puede ser aplicado a muchos más escenarios, como el de carteras no lineales, ya que es computacionalmente intensivo.

Ahora que se conocen las principales metodologías para el cálculo del *VaR* es importante tener presente que ninguno de estos es considerado como el óptimo, todos ellos presentan ventajas e inconvenientes, por lo que para garantizar una mayor seguridad es recomendable utilizar más de un modelo de medición y llevar a cabo la construcción de escenarios críticos o pruebas de tensión (stress-testing) y ejercicios de autovalidación como lo es el back-testing que serán tratados más adelante.

2.1 Método paramétrico

Como se mencionó en el apartado anterior, este método tiene como supuesto principal el que la rentabilidad de la cartera sigue una distribución normal. En este caso, sea $f(x)$, la función de densidad que sigue la rentabilidad a lo largo de un periodo, para un nivel de significancia de $p\%$, el *VaR* queda definido como un valor R^* que cumple lo siguiente:

$$p = \int_{-\infty}^{R^*} f(x) dx = P[x < R^*]$$

Ahora, tomando el supuesto de que la rentabilidad $x \sim N(\mu, \sigma)$ con μ la rentabilidad media y σ la varianza. Esto nos lleva a que $\frac{x-\mu}{\sigma} \sim N(0,1)$, dando como resultado lo siguiente:

$$p = P[x < R^*] = P\left[\frac{x-\mu}{\sigma} < \frac{R^*-\mu}{\sigma}\right] = \Phi\left(\frac{R^*-\mu}{\sigma}\right)$$

Siendo Φ la función de distribución de una función $N(0,1)$, cuya propiedad de simetría permite lo siguiente:

$$\Phi\left(\frac{R^*-\mu}{\sigma}\right) = 1 - \Phi\left(-\frac{R^*-\mu}{\sigma}\right)$$

De modo que:

$$1 - p = \Phi\left(-\frac{R^* - \mu}{\sigma}\right)$$

Y sacando la inversa de Φ , se obtiene el valor de R^* de la siguiente manera:

$$R^* = -\Phi(1 - p)\sigma + \mu$$

Tomando en cuenta que el valor de p es una probabilidad muy reducida, se tiene que R^* tendrá un valor negativo, por lo que para presentar el VaR en términos positivos y para una mejor interpretación de este, como el peor resultado que puede producirse, se presenta la siguiente igualdad $VaR = -R^*$, por tanto:

$$VaR = \Phi(1 - p)\sigma - \mu$$

2.1.1 Extrapolación temporal

Un comportamiento común relacionado con la eficiencia del mercado tiene que ver con el hecho de que los rendimientos no se encuentran correlacionados en el tiempo, es decir, que son independientes. Esto dirige a otro supuesto que indica que se está trabajando con rentabilidades logarítmicas, en este sentido:

$$R_t = \ln\left[\frac{P_t + D_t}{P_{t-1}}\right]$$

Donde,

P_t Representa el precio de un activo en el periodo t

P_{t-1} Representa el precio del activo en el periodo anterior a t

D_t Algún pago, ya sea por cupón o dividendo, que se haya devengado en el periodo t

Simplificado, se hace el supuesto de que D_t es igual a cero, por lo que:

$$R_t = \ln\left[\frac{P_t}{P_{t-1}}\right]$$

Trabajar con este tipo de comportamiento en los rendimientos se vuelve muy útil a la hora de su descomposición, pues al buscar la rentabilidad sobre dos periodos a t se tiene lo siguiente:

$$R_{t,2} = \ln \left[\frac{P_t}{P_{t-1}} \right] + \ln \left[\frac{P_{t-1}}{P_{t-2}} \right] = R_t + R_{t-1}$$

Por otro lado y como ya se mencionó, el hecho de que los rendimientos sean independientes entre sí, matemáticamente se ve denotado como:

$$\text{Corr}(R_t, R_{t-1}) = 0$$

Antes de pasar a lo más relevante de este apartado, es necesario otro supuesto que surge de asumir que los rendimientos se encuentran idénticamente distribuidos en el tiempo, por lo que:

$$E(R_t) = E(R_{t-1}) \text{ y } \sigma^2(R_t) = \sigma^2(R_{t-1})$$

Y para ejemplificar lo que se quiere mostrar en este apartado, siguiendo con el ejemplo de la rentabilidad sobre dos periodos de t , se tiene lo siguiente:

$$E(R_{t,2}) = E(R_t) + E(R_{t-1}) = 2E(R_t)$$

$$\sigma^2(R_{t,2}) = \sigma^2(R_t) + \sigma^2(R_{t-1}) + 2\text{Corr}(R_t, R_{t-1}) = 2\sigma^2(R_t)$$

Esto lleva directamente a la extrapolación temporal del VaR , pues la rentabilidad esperada y la varianza se incrementan linealmente con el tiempo, además de que la desviación estándar o volatilidad, crece con la raíz cuadrada.

De esta manera, una vez estimadas una rentabilidad y volatilidad a un horizonte de tiempo t , se tiene que:

$$\mu_{\text{anual}} = \mu_t * t$$

$$\sigma^2_{\text{anual}} = \sigma^2_t * t$$

$$\sigma_{\text{anual}} = \sigma_t * \sqrt{t}$$

Siendo t el número de subperiodos comprendidos en un año, por ejemplo, si se tenía una rentabilidad y volatilidad estimada mensualmente, para obtener su valor anual, t será igual a 12 y en el caso de una estimación diaria, que es la más común de todas, el valor que toma t es igual al número de días comerciales en un año, que en este caso es igual a 252.

Como se mencionó, la estimación más utilizada a la hora de calcular el *VaR* es la diaria, pues a partir de esta, mediante una extrapolación, se puede obtener el *VaR* a cualquier otro horizonte de tiempo, sin embargo, es importante tener en cuenta que mientras más largo sea el horizonte seleccionado, la aproximación será menos exacta.

El hecho de que a partir de un horizonte de tiempo se pueda obtener cualquier otro valor a diferente temporalidad es una de las razones por las que el *VaR* diario es considerado como uno de los más importante, tanto así que se tiene un término específico para referirse al mismo conocido como Daily Earning at Risk o por su acrónimo en inglés DEaR.

Trabajando con la definición mencionada en el apartado anterior del *VaR* y suponiendo que se tiene una estimación de μ_1 y σ_1 diarias, para un *VaR* a un horizonte de tiempo h se tiene la siguiente expresión:

$$VaR_h = \sqrt{h} \sigma_1 \Phi(1 - p) - \mu_1 h$$

De esta misma manera se obtienen las expresiones del *VaR* nominal absoluto y relativo, teniendo en cuenta el valor nominal de la cartera o activo.

El *VaR* absoluto o también conocido como *VaR* respecto al origen a un horizonte h si queda expresado como sigue:

$$VaR (absoluto)_h = -V_1 R_h^* = V_1 * (\sqrt{h} \sigma_1 \Phi(1 - p) - \mu_1 h)$$

El *VaR* relativo toma la siguiente expresión:

$$VaR (relativo)_h = -V_1 (R_h^* - \mu) = V_1 * \sqrt{h} \sigma_1 \Phi(1 - p)$$

Por otro lado, suponiendo que se tiene una medida de *VaR* calculada a un horizonte de tiempo t_1 y se quiere expresarla en términos de un nuevo horizonte de tiempo t_2 . En este caso:

$$VaR (relativo)_{t_1} = V_1 * \sqrt{t_1} \sigma_1 \Phi(1 - p)$$

$$VaR (relativo)_{t_2} = V_1 * \sqrt{t_2} \sigma_1 \Phi(1 - p)$$

Multiplicando y dividiendo por el *VaR* en t_1 la segunda expresión:

$$VaR (relativo)_{t_2} = V_1 * \sqrt{t_2} \sigma_1 \Phi(1 - p) * \frac{VaR (relativo)_{t_1}}{V_1 * \sqrt{t_1} \sigma_1 \Phi(1 - p)}$$

Finalmente,

$$VaR (relativo)_{t_2} = \sqrt{\frac{t_2}{t_1}} * VaR (relativo)_{t_1}$$

Esta expresión muestra otra de las ventajas de la extrapolación temporal y es que se puede ajustar la cifra del *VaR* para horizontes de tiempo diferentes, multiplicando únicamente por la raíz cuadrada del cociente de los dos periodos. Todo esto señala otra de las razones por las que el *VaR* es una de las medidas de riesgo más utilizadas.

2.1.2 Basilea y el Valor en Riesgo

Se ha mencionado en apartados anteriores que una de las instituciones más importantes a la hora de hablar sobre la administración de los riesgos en términos internacionales es el Comité de Basilea, que mediante acuerdos busca proponer estándares a la hora de medir los diferentes riesgos a los que se enfrenta una institución bancaria.

En cuanto al riesgo de mercado y como se trató anteriormente, Basilea propone dos métodos para su medición, el método estándar y método interno, sin embargo, al volverse uno de los conceptos más populares y efectivos, el Comité reconoció y recomendó al *VaR* y con un método para medir este tipo de riesgo.

A diferencia de los parámetros establecidos por J.P. Morgan, uno de los principales impulsores del Valor en Riesgo, donde se recomienda un nivel de confianza del 95% a una temporalidad diaria, el Comité de Basilea recomienda un *VaR* estimado a un intervalo de confianza del 99% y para un horizonte de tiempo de diez días. En este sentido y hablando únicamente en términos de *VaR* relativo, ambos pueden expresarse de la siguiente manera:

$$VaR_{JP} = V_0 * 1.65 * \sigma_{diaria}$$

$$VaR_{Basilea} = V_0 * 2.33 * \sigma_{diaria} * \sqrt{10}$$

Siendo, V_0 el valor de la cartera o el activo en el momento del cálculo de la métrica y 1.65 y 2.33 el valor resultante de la función Φ evaluada en 0.95 y 0.99 respectivamente. Además de que la segunda ecuación surge de la extrapolación temporal aplicada a diez días a partir de un *VaR* diario.

Mediante estas expresiones y utilizando la propiedad vista anteriormente, donde el VaR puede ser ajustado a diferentes horizontes de tiempo, se tiene que:

$$VaR_{Basilea} = \frac{2.33}{1.65} * \sqrt{10} * VaR_{JP}$$

Si se presenta atención a la definición del VaR por J.P. Morgan es fácil encontrar que corresponde a la establecida por lo nombrado anteriormente como DEaR. De esta manera

$$VaR_{Basilea} = 4.45 * DEaR$$

Analizando esta expresión es fácil notar que el VaR propuesto por Basilea excede más de cuatro veces el VaR de J.P Morgan y en ocasiones y muy comúnmente esta cifra es multiplicada por un factor que toma el valor de tres, elevando más de trece veces el DEaR, esto muestra que los parámetros seleccionados para el cálculo son un trámite meramente, pues al final de todo, el resultado termina siendo multiplicado por un factor arbitrario. De esta manera es sencillo concluir que el VaR obtenido a partir de ciertos parámetros definidos puede ser expresado en términos de combinaciones alternativas de otros parámetros.

2.1.3 El VaR en carteras con más de un activo

Hasta el momento las definiciones que se han mostrado para el Valor en Riesgo se han centrado únicamente en activos financieros individuales lo que es equivalente a carteras con un solo activo, sin embargo, esto en la práctica es poco común, por lo que es necesario extender las definiciones ya vistas a carteras más robustas.

Suponiendo un caso de una cartera con dos activos X e Y, la rentabilidad de la cartera en tiempo t queda expresada de la siguiente manera:

$$R_{C,t} = w * R_{X,t} + (1 - w) * R_{Y,t}$$

Esta ecuación indica una media ponderada, donde w representa el porcentaje invertido en el activo X y, al tratarse de una cartera de únicamente dos activos, $1 - w$ representa la parte invertida en Y.

Por otro lado, la siguiente expresión muestra la varianza de los rendimientos:

$$\sigma_{C,t}^2 = w^2 * \sigma_{X,t}^2 + (1 - w)^2 * \sigma_{Y,t}^2 + 2 * w * (1 - w) * Cov(X, Y)$$

Recordando que,

$$Cov(X, Y) = \sigma_{XY,t} = \rho_{XY,t} * \sigma_{X,t} * \sigma_{Y,t}$$

Para obtener la volatilidad o desviación estándar de la cartera basta con obtener la raíz cuadrada de la varianza, tal como se muestra a continuación:

$$\sigma_{C,t} = \sqrt{w^2 * \sigma_{X,t}^2 + (1 - w)^2 * \sigma_{Y,t}^2 + 2 * w * (1 - w) * Cov(X, Y)}$$

De esta expresión se puede concluir que la volatilidad de la cartera no depende únicamente de la volatilidad de los activos que la componen, también se ve involucrada la correlación entre los rendimientos, que se ve explícitamente en el coeficiente de correlación lineal denotado por ρ_{XY} .

Con lo ya mencionado y utilizando la expresión del *VaR* relativo, tenemos que el *VaR* para una cartera compuesta por dos activos a un horizonte de tiempo t y con un nivel de significancia igual a p es:

$$VaR_{C,t} = V_0 * \Phi(1 - p) * \sigma_{C,t}$$

Sustituyendo valores,

$$VaR_{C,t} = V_0 * \Phi(1 - p) * \sqrt{w^2 * \sigma_{X,t}^2 + (1 - w)^2 * \sigma_{Y,t}^2 + 2 * w * (1 - w) * Cov(X, Y)}$$

Al elevar al cuadrado el término $V_0 * \Phi(1 - p)$ y metiéndolo dentro de la raíz cuadrada, se obtiene una expresión mucho más explícita:

$$VaR_{C,t} = \sqrt{VaR_{X,t}^2 + VaR_{Y,t}^2 + 2 * \rho_{XY,t} * VaR_{X,t} * VaR_{Y,t}}$$

El $VaR_{X,t} = w * V_0 * \Phi(1 - p) * \sigma_{X,t}$, representa el *VaR* asociado a la posición mantenida en el activo X , lo que es conocido como Valor en Riesgo no Diversificado, de la misma manera para el activo Y , donde $VaR_{Y,t} = (1 - w) * V_0 * \Phi(1 - p) * \sigma_{Y,t}$

Esta expresión comienza a mostrar la relación entre el *VaR* de la cartera o también conocido como el *VaR* diversificado retomando la terminología utilizada por Markowitz (1959) y el *VaR* individual para cada uno de los activos que la componen y no solo eso, también se puede observar que esta relación está directamente influida por la correlación que existe entre estos activos, esto se ve reflejado en el coeficiente de correlación $\rho_{XY,t}$ que toma valores dentro de $[-1, 1]$, por lo tanto, dependiendo de qué tan correlacionados estén los activos el valor será mayor o menor, por ejemplo:

- $\rho_{XY,t} = -1$, en este caso el valor que tome el *VaR* alcanzará su mínimo, pues la diversificación que surge al estar perfecta y negativamente correlacionados los activos reduce al máximo el Valor en Riesgo. Esto quiere decir que el *VaR* individual de cada activo permite que haya una compensación entre los mismos. De forma matemática se tiene lo siguiente:

$$VaR_{C,t} = \sqrt{VaR_{X,t}^2 + VaR_{Y,t}^2 - 2 * VaR_{X,t} * VaR_{Y,t}}$$

$$VaR_{C,t} = \sqrt{(VaR_{X,t} - VaR_{Y,t})^2}$$

$$VaR_{C,t} = VaR_{X,t} - VaR_{Y,t}$$

- $\rho_{XY,t} = 1$, aquí se presenta el caso opuesto pues el *VaR* va a alcanzar su máximo, ya que no habrá ningún beneficio de diversificación, debido a que los activos se encuentran perfecta y positivamente correlacionados entre sí. Como prueba de esto, basta trabajar con la definición del *VaR* para la cartera.

$$VaR_{C,t} = \sqrt{VaR_{X,t}^2 + VaR_{Y,t}^2 + 2 * VaR_{X,t} * VaR_{Y,t}}$$

$$VaR_{C,t} = \sqrt{(VaR_{X,t} + VaR_{Y,t})^2}$$

$$VaR_{C,t} = VaR_{X,t} + VaR_{Y,t}$$

- $\rho_{XY,t} = 0$, por último se tiene el caso en el que no exista correlación entre los activos dejando al *VaR* expresado de la siguiente manera:

$$VaR_{C,t} = \sqrt{VaR_{X,t}^2 + VaR_{Y,t}^2}$$

Ya que se ha trabajado con el VaR para una cartera con dos activos, se puede hacer una generalización para carteras con más de un activo. Supóngase en este sentido que se tiene una cartera de n activos y recurriendo a la formulación de Markowitz (1952), la rentabilidad y la varianza de la cartera quedarán definidos de la siguiente manera:

$$R_{C,t} = \sum_{i=1}^n w_i * R_{i,t} \quad \text{donde} \quad \sum_{i=1}^n w_i = 1$$

$$\sigma_{C,t}^2 = \sum_{i=1}^n w_i^2 * \sigma_i^2 + 2 * \sum_{i=1}^n w_i * w_j * \sigma_{ij,t}$$

Dependiendo del número de activos con el que se conforme la cartera, la idea de todas estas sumas puede volverse algo complicado y difícil de entender, por lo que para simplificar estas operaciones se recurre al uso de notación matricial, definiendo:

- $\bar{w}^T = [w_1 \quad w_2 \quad \dots \quad w_n]$, que es un vector transpuesto de dimensión $1 \times n$ que representa las ponderaciones para cada activo de la cartera.

- $\bar{r} = \begin{bmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_n \end{bmatrix}$, vector $(n \times 1)$ de los rendimientos individuales de los activos.

- $\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{1,t}^2 & \dots & \sigma_{1n,t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{n1,t} & \dots & \sigma_{n,t}^2 \end{bmatrix}$

Con Σ matriz de varianzas y covarianzas donde $\sigma_{i,j}$ denota la covarianza entre los rendimientos de los activos i y j .

Esta última matriz recibe este nombre debido a los elementos que la integran. En la diagonal de la matriz se encuentran las varianzas de los rendimientos de cada uno de los activos y, por otro lado, se tienen los elementos de covarianza diferentes, teniendo todas las posibles combinaciones entre los activos.

Una vez definidas estas matrices, el rendimiento, varianza y volatilidad de la cartera quedan expresados de la siguiente manera:

$$R_{C,t} = \bar{w}^T * \bar{r}$$

$$\sigma_{C,t}^2 = \bar{w}^T * \Sigma * \bar{w}$$

$$\sigma_{C,t} = \sqrt{\bar{w}^T * \Sigma * \bar{w}}$$

Regresando a la matriz de varianzas y covarianzas, mediante propiedades matriciales podemos obtener otra expresión para la misma haciendo uso de las siguientes matrices:

$$\bar{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{1,t} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \sigma_{n,t} \end{bmatrix}, \text{ corresponde a la matriz diagonal de desviaciones estándar.}$$

$$\bar{\rho} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & \rho_{1n,t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{n1,t} & \cdots & 1 \end{bmatrix}, \text{ matriz de correlaciones entre los activos.}$$

Mediante estas nuevas matrices, tenemos que $\Sigma = \bar{\sigma} * \bar{\rho} * \bar{\sigma}$. Ahora dadas todas estas nuevas definiciones y recordando la ecuación para el VaR relativo, se tiene que:

$$VaR_{C,t} = V_0 * \Phi(1 - p) * \sqrt{\bar{w}^T * \Sigma * \bar{w}}$$

Y utilizando la nueva definición para la matriz de varianzas y covarianzas:

$$VaR_{C,t} = V_0 * \Phi(1 - p) * \sqrt{\bar{w}^T * \bar{\sigma} * \bar{\rho} * \bar{\sigma} * \bar{w}}$$

Se eleva $V_0 * \Phi(1 - p)$ al cuadrado con el objetivo de introducirlo dentro de la raíz se llega a la expresión final:

$$VaR_{C,t} = \sqrt{V^T * \bar{\rho} * V}$$

Donde, $V = \begin{bmatrix} VaR_{1,t} \\ \vdots \\ VaR_{n,t} \end{bmatrix}$ es el vector de los VaR's individuales no diversificados de los activos.

Este vector surge del producto matricial $V = \bar{\sigma} * \bar{w} * V_0 * \Phi(1 - p)$ y V^T surge del mismo producto cambiando únicamente \bar{w} por \bar{w}^T .

A partir de esta nueva definición para el VaR de la cartera se puede llegar a las mismas conclusiones que cuando se consideraron únicamente dos activos, y es que finalmente el VaR no depende únicamente del Valor en Riesgo para los activos individuales, también es necesario tener en cuenta la correlación existente entre los activos, que en este caso queda representada por $\bar{\rho}$, y en el caso de que esa matriz se vuelva una matriz identidad, es decir que la correlación entre todos los activos sea igual a uno, el VaR de la cartera será la suma de los Valores en Riesgo individuales.

Por último, es importante tener en cuenta que si se analiza el comportamiento del mercado se vuelve muy notoria la inestabilidad que existe en las desviaciones estándar y la correlación entre los activos a través del tiempo y no solo esto, también se ha llegado a identificar que tras periodos de baja volatilidad se presentan otros de alta volatilidad. Todo esto lleva a concluir que la calidad del VaR será aún mejor en tanto la calidad de las predicciones sobre volatilidad y correlaciones, sean buenas.

A partir de este conocimiento se desprenden algunos modelos para el cálculo de la volatilidad como lo son la desviación estándar muestral, la media móvil simple, la media móvil exponencial ponderada (MMEP) y los modelos GARCH.

2.2 Simulación histórica

Una de las metodologías utilizadas para el cálculo del VaR es la conocida como simulación histórica que pretende crear una distribución de probabilidad de los precios del activo de cada mercado a partir de su historia, es decir, de los datos que se tengan registrados con anterioridad.

Esta metodología se basa en el principio fundamental de la estacionariedad de las distribuciones de los cambios de mercado, es decir que la distribución de los cambios diarios en el mercado es de alguna manera constante, o al menos, esta acotada en una banda bien determinada, sin importar si los mercados suben o bajan.

Para obtener el VaR a través de esta metodología basta seguir una serie de pasos:

1. Registrar los precios de mercado para el periodo de observación que se haya elegido. Un ejemplo de esto es, si se eligen datos diarios, es necesario obtener un precio representativo para cada día, esto podría ser el precio de cierre o algún precio determinado a una hora específica, pero siempre a la misma hora.
2. Calcular las variaciones que se presentan en los precios. De esta manera si, inicialmente se tomaron $n + 1$ observaciones, el cálculo de las variaciones dará como resultado una muestra de n elementos como se muestra a continuación:

$$R_1, R_2, R_3, \dots, R_t, \dots, R_n$$

Donde,

$$R_t = \frac{P_t - P_{t-1}}{P_{t-1}} \quad \text{o} \quad R_t = \ln \left(\frac{P_t}{P_{t-1}} \right)$$

3. Construir una nueva serie de datos a partir de los obtenidos con las variaciones de los precios y el valor de mercado de la posición actual que se tenga respecto al activo al que se le esté calculando el *VaR* permitiendo así modelar el posible impacto de los cambios que se presenten en el valor de la posición mantenida. De esta manera,

$$L_t = V_0 * R_t$$

4. Ordenar la nueva serie de la peor pérdida a la mayor ganancia, perdiendo de esta manera la secuencia cronológica que tenían los datos históricos. Al reordenar los datos se obtiene una secuencia como la que sigue:

$$L_{1,n} \leq L_{2,n} \leq L_{3,n} \leq \dots \leq L_{n,n}$$

Donde $L_{1,n}$ representa la peor pérdida y $L_{n,n}$ la mayor ganancia y en términos generales $L_{i,n}$ hace referencia a la observación en la posición i de la serie de n elementos.

5. Seleccionar el elemento j que corresponda al nivel de confianza c seleccionado, por lo que el *VaR* quedaría definido de la siguiente manera:

$$VaR = -L_{j,n}$$

Siendo j el número entero que cumple la siguiente ecuación:

$$\frac{j-1}{n} < 1-c \leq \frac{j}{n}$$

Considerando un ejemplo con un nivel de confianza del 95% y una muestra con 100 elementos se tendría lo siguiente:

$$\frac{j-1}{100} < 0.05 \leq \frac{j}{100} \quad \text{de donde } j = 5$$

De esta manera se tiene que el $VaR = -L_{5,100}$, es decir que el Valor en Riesgo del activo será determinado por el quinto peor resultado o lo que es lo mismo, la pérdida que se encuentra en el quinto lugar de la nueva serie.

Para ilustrar los diferentes valores del VaR siguiendo esta metodología, se tiene la siguiente tabla, relacionando los niveles de confianza más utilizados con diferentes tamaños de muestra.

Tabla 3. Valores asignados de acuerdo al VaR por simulación histórica para diferentes tamaños de muestra y niveles de confianza

Nivel de confianza c	Tamaño muestral n		
	100	252	504
95%	$-L_{5,100}$	$-L_{13,100}$	$-L_{25,100}$
97.5%	$-L_{2.5,100}$	$-L_{6,100}$	$-L_{13,100}$
99%	$-L_{1,100}$	$-L_{2.5,100}$	$-L_{5,100}$

Fuente: Elaboración propia

Como en el caso del VaR paramétrico y ya que hasta el momento se ha hablado únicamente de la metodología para un solo instrumento financiero, es necesario obtener el VaR para una cartera compuesta por más de un activo.

El cálculo de este VaR no es muy complejo. Considerando una cartera formada por k activos, el primer paso es calcular k series históricas de rentabilidad para cada activo, es decir:

$$\text{para } X \rightarrow R_{X,1}, R_{X,2}, \dots, R_{X,n}$$

$$\text{para } Y \rightarrow R_{Y,1}, R_{Y,2}, \dots, R_{Y,n}$$

$$\vdots \quad \quad \quad \ddots \quad \quad \quad \vdots$$

$$\text{para } K \rightarrow R_{K,1}, R_{K,2}, \dots, R_{K,n}$$

Y la nueva serie quedará expresa de la siguiente manera:

$$L_t = V_X * R_{X,t} + V_Y * R_{Y,t} + \dots + V_K * R_{K,t} \quad \text{para } t = 1, 2, \dots,$$

Una vez que se tenga esta serie para cada valor de t se realizan los pasos 4 y 5 mencionados anteriormente para el nivel de confianza seleccionado lo que permitirá obtener el VaR para la cartera.

Una diferencia evidente entre esta metodología y el método paramétrico radica en la presencia de la correlación entre los activos en este último, misma que no se ve de manera explícita en la simulación histórica, sin embargo, al trabajar con la información histórica de cada activo, se asume que las posibles relaciones entre ellos quedan capturadas de alguna manera en esta información, por lo que al sumar los resultados de los movimientos de los precios en todos los mercados que influyen en la cartera, supone incorporar de forma implícita la correlación.

Ahora que se tiene identificado el procedimiento que se lleva a cabo para obtener el VaR mediante esta metodología es importante resaltar sus fortalezas y debilidades. Comenzando con las ventajas, la primera y que más resalta es la simplicidad del método pues se trata de un enfoque muy fácil de entender y no solo para los encargados de gestionar el riesgo. Esto también se ve relacionado con su facilidad de aplicación, pues por un lado el cálculo puede realizarse de manera muy sencilla, además de que el supuesto ya mencionado acerca de la relación entre los activos vuelve innecesario el cálculo de varianzas y covarianzas entre los activos individuales.

Otra de las ventajas que es importante resaltar y que tiene que ver con el supuesto más importante en el VaR paramétrico que es la hipótesis de una distribución de normalidad, pues en este sentido, la simulación histórica es menos restrictiva, ya que se puede aplicar a cualquier activo aun cuando la distribución de las variaciones de los precios no sigue una ley de normalidad.

Por último, y relacionado con las debilidades de este método es importante mencionar su principal crítica, que es el asumir que la historia seleccionada en el periodo muestral será suficiente para pronosticar el riesgo de la cartera en un futuro. Esta crítica se debe principalmente a casos en los que los datos del periodo de observación sean atípicos, dando como resultado observaciones excesivamente volátiles o, por el contrario, con un comportamiento bastante tranquilo. Un ejemplo sería considerar observaciones dentro de un periodo donde se haya presentado una fuerte crisis económica, pues la probabilidad de que este suceso se repita en un futuro es muy baja, por lo que el valor que tome el VaR no reflejará de manera óptima el riesgo de la cartera en un futuro.

Relacionado con esto, también es importante tener en consideración es el número de observaciones que se tomen para la muestra, pues si el periodo histórico utilizado es pequeño el error que pueda presentarse en la estimación será mayor. Es por esto que el Banco Internacional de Pagos de Basilea recomienda un periodo muestral de al menos un año. Sin embargo, también es importante tener en cuenta que considerar periodos de observación muy amplios conducirían a una estimación del *VaR* muy estable e insensible a cualquier nueva información que pueda presentarse. En la práctica esto se vuelve más evidente, pues los resultados obtenidos difieren significativamente dependiendo del tamaño de la muestra y la frecuencia de las observaciones.

También es importante tener en cuenta que en la simulación histórica, la extrapolación temporal no tiene lugar, por lo que para obtener el *VaR* con diferentes horizontes temporales es necesario cambiar los valores de la cartera para el plazo deseado, lo que implica un mayor costo en términos de tiempo. Así, para obtener el *VaR* mensual de una cartera, en vez del diario, es necesario partir de un conjunto de datos históricos de rentabilidades mensuales.

Otro de los problemas a los que se pueden enfrentar las entidades a la hora de seleccionar esta metodología es la dependencia del conjunto de los datos históricos seleccionados, pues cualquier eventualidad futura que pueda presentarse no es computable de ninguna manera en la serie histórica. Para esta problemática se recomienda el uso de escenarios de tensión, con el objetivo de capturar riesgos potenciales que son poco representados en la serie observada.

Una vez que se tienen identificadas las fortalezas y debilidades de la simulación histórica se puede proceder con cautela a la hora de aplicar la metodología, seleccionado un tamaño de muestra que permita obtener una mejor estimación y aplicando pruebas que permitan cubrir la mayor cantidad de escenarios posibles.

2.2.1 Simulación histórica ponderada

Si se presta atención a los pasos descritos anteriormente para obtener el *VaR* mediante el método de simulación histórica se puede observar que el paso número cinco se reduce a calcular el cuantil $1 - c$ de la serie de observaciones de rendimientos históricos para los activos, siendo c el nivel de confianza establecido para el mismo. De esta manera la probabilidad asignada a cada observación es igual a $1/n$ con n el número de observaciones.

Esta probabilidad asignada a cada observación tiene que ver con el peso asignado a las mismas, pues uno de los supuestos y debilidades bajo los que trabaja esta metodología se trata de atribuir la misma ponderación a todos los rendimientos de la muestra. Este supuesto, al igual que en el caso del método paramétrico supone una desventaja, pues

además de no considerar el orden cronológico de las observaciones y darles la misma importancia a cada una de ellas se está suponiendo un proceso constante en la generación de pérdidas y ganancias, lo que no se acerca al comportamiento de mercado.

Para remediar estos inconvenientes Dowd (1998) presenta una propuesta conocida como Simulación histórica ponderada, que no es muy diferente a las medidas tomadas en el caso paramétrico para este mismo inconveniente. Esta propuesta consiste en asignar un peso, ponderando a las observaciones de acuerdo a su antigüedad, cuanto más lejanas sean estas observaciones menor peso recibirán.

El nuevo problema que se presenta a la hora de considerar esta propuesta es el encontrar un coeficiente de ponderación adecuado ya que, por un lado, se debe calibrar la velocidad de cambio de la distribución de pérdidas y ganancias y por el otro, testar sobre el pasado los diferentes pesos hasta elegir aquél que mejor pronostique el *VaR*.

A partir de esto surge una variante del procedimiento basada en la Media Móvil Exponencial Ponderada (MMEP), misma que se mencionó en el caso paramétrico, asignando pesos relativos a cada observación, De esta manera, la observación más actual (observación 1), es decir la observación en el momento del cálculo en tiempo t recibe la siguiente ponderación:

$$peso_t = \left[\frac{1 - \lambda}{1 - \lambda^n} \right] * \lambda^0$$

Donde $\lambda \in [0,1]$ y cuanto más se acerque a cero, menos relevancia tendrán las observaciones pasadas, y cuanto más cerca este de uno mayor similitud tendrá con el Valor en Riesgo por Simulación histórica.

De la misma forma, la ponderación del rendimiento inmediato anterior es:

$$peso_{t-1} = \left[\frac{1 - \lambda}{1 - \lambda^n} \right] * \lambda^1$$

De manera general, para la observación en el tiempo k , su ponderación queda representada de la siguiente manera:

$$peso_{t-k+1} = \left[\frac{1 - \lambda}{1 - \lambda^n} \right] * \lambda^{k-1}$$

Considerando un ejemplo poco común en la práctica, en el que se tienen un total de 50 observaciones históricas de rentabilidad, es decir $n = 50$ y un valor $\lambda = 0.99$, los pesos relativos correspondientes a cada observación se ven de la siguiente manera:

Tabla 4. Pesos asignados a las observaciones mediante el modelo de Simulación Histórica Ponderada

K	peso								
1	0.0253	11	0.0229	21	0.0207	31	0.0187	41	0.0169
2	0.0251	12	0.0227	22	0.0205	32	0.0185	42	0.0168
3	0.0248	13	0.0224	23	0.0203	33	0.0184	43	0.0166
4	0.0246	14	0.0222	24	0.0201	34	0.0182	44	0.0164
5	0.0243	15	0.0220	25	0.0199	35	0.0180	45	0.0163
6	0.0241	16	0.0218	26	0.0197	36	0.0178	46	0.0161
7	0.0238	17	0.0216	27	0.0195	37	0.0176	47	0.0159
8	0.0236	18	0.0213	28	0.0193	38	0.0175	48	0.0158
9	0.0234	19	0.0211	29	0.0191	39	0.0173	49	0.0156
10	0.0231	20	0.0209	30	0.0189	40	0.0171	50	0.0155

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla anterior la observación más reciente que corresponde a $k = 1$ recibe el peso más grande entre todas las observaciones a diferencia de la observación número 50.

La Simulación histórica que asigna un mismo peso a todas las observaciones puede ser vista como un caso particular de este tipo de simulación, en donde el peso relativo asignado a cada observación es igual a $1/n$, en el caso de considerar 100 observaciones este peso sería igual a 0.01.

Una vez que se tiene el peso asignado a cada una de las observaciones el procedimiento es bastante similar al presentado a inicios de este apartado. Visto de esta manera el siguiente paso sería ordenar las observaciones desde la peor pérdida hasta la mayor ganancia, sin olvidar el peso asignando a cada una cuando se tenían ordenadas cronológicamente. Una vez definido el nivel de significancia $(1 - c)$ el VaR

se obtiene identificando el cuantil correspondiente, partiendo del rendimiento menos favorable y sumando los pesos relativos de los siguientes peores rendimientos hasta igualar el nivel de significancia.

Para mostrar esto de una manera más clara, se considera el caso de 100 observaciones y un nivel de confianza igual al 0.95 y se asume el mismo peso para cada una de las observaciones, es decir, 0.01. Como se mostró anteriormente el *VaR* en este caso queda definido por la posición número 5.

Como se puede ver, en la siguiente ilustración, al sumar los pesos relativos de cada observación partiendo de la peor, es en la posición número cinco donde se acumula el 0.05 de probabilidad y este es el mismo comportamiento que se debe seguir cuando los pesos asignados son diferentes para cada observación.

Imagen 3. Representación de la Simulación Histórica Ponderada



Fuente: Elaboración propia

El método de Simulación Histórica es uno de los más utilizados debido a su facilidad al momento de llevarlo a cabo, es por esto que muchos autores consideran que este método híbrido donde se toma en cuenta el orden cronológico de las observaciones es bastante eficiente especialmente para aquellos mercados en donde las rentabilidades no se ajustan con exactitud a un comportamiento normal, principalmente por la presencia de colas anchas en su distribución.

2.3 Simulación Monte Carlo

El origen de esta metodología inicio por fines militares, alrededor del año 1942 cuando se buscaba utilizar esta técnica para la construcción de la bomba atómica en los Álamos (EE.UU.). Y la aplicación de este modelo fue tan extenso que llego a una gran multitud de disciplinas incluyendo las finanzas.

El nombre que recibe esta metodología se debe a un famoso casino en Mónaco llamado Monte Carlo. La razón de esto se debe principalmente a que no hay mejor similitud para los movimientos aleatorios de los precios de activos financieros que una ruleta o cualquier juego de azar.

La diferencia entre esta metodología y la Simulación Histórica, es que esta última considera un único camino que es el reflejado por el conjunto de rentabilidades históricas seleccionadas, dejando de lado todos los posibles caminos que pudieran haber recorrido los precios del activo y que no lograron materializarse pero que considerarlos podría reflejar un comportamiento de mercado más acercado a la realidad, que es justamente lo que hace la Simulación de Monte Carlo.

Siguiendo esto, la idea principal de esta simulación es generar simulaciones de manera reiterativa que permitan reflejar los procesos aleatorios que siguen los precios de los instrumentos financieros y es mediante estas simulaciones que se busca obtener diferentes posibles valores de la cartera al finalizar el horizonte de tiempo seleccionado, pues se considera que al tener un número suficiente de estas simulaciones, la distribución simulada convergerá hacia la verdadera distribución, inicialmente desconocida pero que mediante la simulación de la misma se podría inferir el verdadero valor del *VaR*.

Para aplicar esta metodología el primer paso es la selección de un modelo estocástico que permita describir el comportamiento de los precios. Uno de los primeros modelos propuestos fue el movimiento browniano con deriva por Bachelier (1900). Y con el paso del tiempo el modelo más utilizado es el Movimiento Geométrico Browniano, donde se incorpora la hipótesis de no correlación entre las variaciones de precios de un activo, lo que permite que el precio adopte una ecuación diferencial estocástica como sigue:

$$dP_t = P_t * (\mu_t * dt + \sigma_t * dz)$$

Donde,

- P_t el precio del activo en el momento t
- dz variable aleatoria distribuida normalmente con media cero y varianza dt . Además de ser browniana porque su varianza decrece continuamente en el intervalo de tiempo, lo que permite descartar saltos repentinos
- μ_t rendimiento medio instantáneo en el momento t
- σ_t volatilidad o desviación estándar del rendimiento en t

Los cambios que puedan experimentar μ_t y σ_t a lo largo del tiempo se representan a través del subíndice t , sin embargo, por simplicidad del modelo, se asumirá que son constantes, por lo que la ecuación mencionada anteriormente puede verse de la siguiente manera:

$$\frac{dP_t}{P_t} = \mu * dt + \sigma * dz$$

Esta expresión es continua y representa movimientos infinitesimales en los precios de un activo financiero, por ello lo más recomendable sería llevar, de forma aproximada, esta ecuación a términos discretos, para ello sería necesario integrar sobre un intervalo finito de tiempo, lo que daría como resultado la siguiente ecuación:

$$\Delta P_t = P_{t-1} * (\mu * \Delta t + \sigma * \varepsilon * \sqrt{\Delta t})$$

Donde ε representa una normal estándar. Y es a partir de esta variable que se comenzarán a simular la trayectoria de precios desde el momento actual t hasta el horizonte de tiempo o momento objetivo seleccionado, que se va a denotar con T .

Para realizar estas simulaciones de precios se parte de P_t y se genera una secuencia de la variable mencionada, esto es, ε_i para $i = 1, 2, \dots, n$ hasta llegar al precio en T . Esto genera la siguiente secuencia:

$$\begin{aligned}
 & P_t \\
 P_{t+1} &= P_t + P_t * (\mu * \Delta t + \sigma * \varepsilon_1 * \sqrt{\Delta t}) \\
 P_{t+2} &= P_{t+1} + P_{t+1} * (\mu * \Delta t + \sigma * \varepsilon_2 * \sqrt{\Delta t}) \\
 & \vdots \\
 P_{t+n} &= P_T
 \end{aligned}$$

Cuando se trata de un *VaR* con un horizonte de tiempo pequeño, por ejemplo, de un día, es común asumir que μ es igual a cero, lo que da lugar a que la expresión quede de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta P_t}{P_{t-1}} = \sigma * \varepsilon = \frac{P_t - P_{t-1}}{P_{t-1}} = R_t$$

De esta manera se observa que la variación en el precio de un activo depende de un componente aleatorio ε que sigue una distribución normal estándar y la volatilidad de las rentabilidades del mismo activo.

Utilizando esto y una de las expresiones alternativas para la rentabilidad que indica que $R_t = \ln \left[\frac{P_t}{P_{t-1}} \right]$. Al transcribir todo en términos logarítmicos resulta que:

$$R_t = \ln \left[\frac{P_t}{P_{t-1}} \right] = \ln e^{\sigma^* \varepsilon}$$

Utilizando las propiedades del logaritmo y realizando algunos despejes se va obteniendo lo siguiente:

$$\begin{aligned} \ln P_t - \ln P_{t-1} &= \ln e^{\sigma^* \varepsilon} \\ \ln P_t &= \ln P_{t-1} + \ln e^{\sigma^* \varepsilon} = \ln(P_{t-1} * e^{\sigma^* \varepsilon}) \end{aligned}$$

Finalmente,

$$P_t = P_{t-1} * e^{\sigma^* \varepsilon}$$

De manera general, el modelo log-normal quedaría expresado de la siguiente manera:

$$P_t = P_{t-1} * e^{\mu * \Delta t + \sigma^* \varepsilon * \sqrt{\Delta t}}$$

Sin embargo, por conveniencia se utilizará la expresión anterior, a partir de la cual se generarán distintos escenarios de precios.

Ahora si se desea simular el precio del activo para una temporalidad comprendida entre el momento actual t y el objetivo T , con variaciones de tiempo Δt , para obtener el precio del activo en T , se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} P_t & \\ P_{t+1} &= P_t * e^{\sigma^* \varepsilon_1} \\ P_{t+2} &= P_{t+1} * e^{\sigma^* \varepsilon_2} = P_t * e^{\sigma^* (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \\ &\vdots \\ P_{t+n} &= P_T = P_t * e^{\sigma^* \sum_{i=1}^n \varepsilon_i} \end{aligned}$$

A partir de esta ecuación se tiene que el precio del activo en tiempo T va a depender del valor del activo en momento presente y los valores que ε vaya tomando en el intervalo de tiempo, por lo tanto, el proceso de simulación comienza en utilizar un generador de números aleatorios que permita obtener la serie de épsilon $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$. El siguiente paso

es calcular el valor de la posición en T (W_T) que dependerá del precio del activo en ese momento y el número k de títulos que se tengan:

$$W_T = P_T * k$$

Este proceso se repite tantas veces como sea necesario hasta obtener una cantidad significativa de simulaciones para el valor de la posición en T , una cantidad adecuada sería 10,000 lo que daría como resultado los siguientes valores $W_{1,T}, W_{2,T}, \dots, W_{10,000,T}$. Después de esto, se procede a obtener las pérdidas y ganancias, restando a cada uno de los valores simulados de la cartera en el momento T , el valor de la cartera en el momento actual, es decir W_t y una vez obtenidos estos valores, el siguiente paso es estimar una distribución para los mismos, mediante la cual se podrá deducir la cifra del Valor en Riesgo utilizando la definición estadística del mismo.

A la hora de seleccionar el número de simulaciones que se realizarán es necesario tener en cuenta que siempre existirá un error asociado a la simulación y que este error será cada vez menor entre más grande sea el número de simulaciones. Sin embargo, también se debe considerar el costo computacional al que se incurrirá si el número de simulaciones es excesivamente grande, por lo que será necesario encontrar un equilibrio entre el grado de precisión y el esfuerzo computacional, teniendo en cuenta que en un mercado con movimientos tan rápidos y complejos, la velocidad resulta más importante que la precisión.

Como en casos anteriores, hasta ahora únicamente se ha trabajado con el caso de una cartera con un único activo, por lo que es necesario estudiar el caso de carteras con más activos, sin embargo, es evidente que el proceso se complica conforme se van agregando más activos ya que se vuelve necesario considerar la correlación que existe entre los mismos. Por esta razón y únicamente a modo de ejemplo, se mostrará el proceso que se sigue para dos activos.

Sean X e Y los dos activos que conforman una cartera, el primer paso consiste en transformar la variable normal estándar representada por ε de la siguiente manera:

$$Z = A * \varepsilon$$

Donde A es una matriz 2x2 definida de la siguiente manera, siendo ρ_{XY} la correlación entre los activos:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \rho_{XY} & \sqrt{1 - \rho_{XY}^2} \end{bmatrix}$$

Otra manera de ver la transformación de la variable ε es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} Z_X \\ Z_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \rho_{XY} & \sqrt{1 - \rho_{XY}^2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \end{bmatrix}$$

Lo que también puede expresarse como sigue:

$$Z_X = \varepsilon_X$$

$$Z_Y = \rho_{XY} * \varepsilon_X + \sqrt{1 - \rho_{XY}^2} * \varepsilon_Y$$

A partir de estas expresiones ahora es posible generar parejas de números aleatorios que permitan simular los precios de los activos de la siguiente manera:

$$P_{X,t} = P_{X,t-1} * e^{\sigma_X * Z_X}$$

$$P_{Y,t} = P_{Y,t-1} * e^{\sigma_Y * Z_Y}$$

Estas expresiones pueden tomar otra estructura dependiendo el valor de la correlación entre los activos, por ejemplo:

- Si $\rho_{XY} = 1$, es decir, que existe una perfecta correlación positiva entre los activos. Al sustituir en todas las ecuaciones ya mencionadas se tiene que:

$$Z_X = Z_Y = \varepsilon_X$$

Esto significa que para el proceso de simulación únicamente será necesario un número aleatorio. Y los precios quedan expresados de la siguiente manera:

$$P_{X,t} = P_{X,t-1} * e^{\sigma_X * \varepsilon_X}$$

$$P_{Y,t} = P_{Y,t-1} * e^{\sigma_Y * \varepsilon_X}$$

- Si $\rho_{XY} = 0$, es decir, que los activos son independientes el resultado es el siguiente:

$$Z_X = \varepsilon_X$$

$$Z_Y = \varepsilon_Y$$

Sustituyendo en las fórmulas para obtener los precios, se tiene que:

$$P_{X,t} = P_{X,t-1} * e^{\sigma_X * \varepsilon_X}$$

$$P_{Y,t} = P_{Y,t-1} * e^{\sigma_Y * \varepsilon_Y}$$

A partir de estas ecuaciones es evidente que este caso se asemeja mucho al caso de una cartera compuesta por un único activo, ya que cada uno de los instrumentos de la cartera será trabajando por separado, empleando distintos números aleatorios para cada uno.

Estos dos casos representan situaciones donde los cálculos se vuelven más sencillos, pues lógicamente la dificultad va a crecer cuando la correlación entre los activos sea imperfecta, para lo cual es necesario generar parejas de números aleatorios considerando la correlación.

Continuando con el proceso que se debe llevar a cabo, una vez obtenidos los precios simulados para cada activo se calculará el valor simulado de la cartera en tiempo T que quedará representado de la siguiente manera, considerando el porcentaje ω invertido en cada activo:

$$W_T = \omega * P_{X,T} + (1 - \omega) * P_{Y,T}$$

Como en el caso anterior, el proceso será repetido un número suficiente de veces hasta obtener cada uno de los valores de la cartera simulados $W_{1,T}, W_{2,T}, \dots, W_{10,000,T}$, para restarles el valor de la cartera en tiempo t (W_t) lo que permitirá conocer las pérdidas y ganancias para así obtener la distribución de estas, desde la cual se podrá inferir el VaR .

Ya que se exploró el proceso que se lleva a cabo para esta metodología, el método Monte Carlo se puede interpretar como una combinación del método paramétrico y la Simulación Histórica.

Al igual que en las metodologías anteriores, es importante tener en cuenta que también existen algunos inconvenientes a la hora de llevar a cabo el método Monte Carlo.

El primer inconveniente surge del hecho de que se trata de una metodología bastante intensiva en cuanto a esfuerzo computacional se refiere, pues a medida que aumenta el número de escenarios elegidos e instrumentos en la cartera, el tiempo de cálculo se prolonga bastante, por lo que es necesaria la toma de decisión respecto a que es más importante, si la precisión de los resultados o la velocidad de obtención de los mismos.

Otra desventaja se presenta a la hora de querer comunicar los resultados a personas que no cuenten con conocimientos estadísticos robustos debido a la complejidad del proceso matemático.

Esto último lleva a la necesidad de tener en cuenta un punto importante en relación con la metodología. Tiene que ver con el proceso de generación de números pseudoaleatorios, que comienza con el uso de una semilla o valor inicio que permite construir una serie que deberá superar cualquier prueba de aleatoriedad e independencia. Sin embargo, si el generador de números aleatorios carece de un buen diseño, los resultados serán inexactos.

Como varios autores han destacado, el método de Monte Carlo va a depender directamente del modelo que se emplee a la hora de describir la forma en la que evolucionan los precios de los activos. Esto genera automáticamente un riesgo conocido como *riesgo de modelo*, que se presenta cuando el proceso estocástico elegido no es el apropiado. Esto también tendrá que ver con el o los activos para los cuales se esté calculando el *VaR*, pues, aunque para algunas posiciones hay un único modelo aceptado comúnmente, para otras, principalmente las mantenidas en derivados, existe una pluralidad de alternativas, cada una con ventajas y desventajas.

Finalmente, y como se ha mencionado a lo largo de este apartado, algo que diferencia esta metodología de las otras es el hecho de considerar la mayoría de los escenarios posibles en el comportamiento de los precios, a diferencia de la Simulación Histórica que puede dejar de lado comportamientos poco comunes en el mercado, pero que aun así pueden presentarse y el método paramétrico que trabaja bajo el supuesto de condiciones normales en el mercado. Y es justo debido a estas debilidades que se recomienda aplicar pruebas de estrés que permitan tener una sensibilidad de lo que pudieran pasar en este tipo de escenarios posibles y esto es lo que se pretende explorar en la siguiente parte de este capítulo.

2.4 Pruebas de tensión (Stress-testing)

Como se mencionó anteriormente las pruebas de tensión buscan medir la incidencia que puedan tener determinadas situaciones extremas en los mercados, debido a que una de las principales hipótesis en las metodologías utilizadas para el cálculo del *VaR*

son condiciones normales de mercado, haciendo referencia a una estabilidad que no siempre está presente.

Las pruebas de estrés o stress-testing tienen como objetivo anticiparse a cierto tipo de eventos mediante la incorporación de escenarios que presenten movimientos inesperados y extremos en el mercado con el objetivo de prever su posible impacto en la cartera.

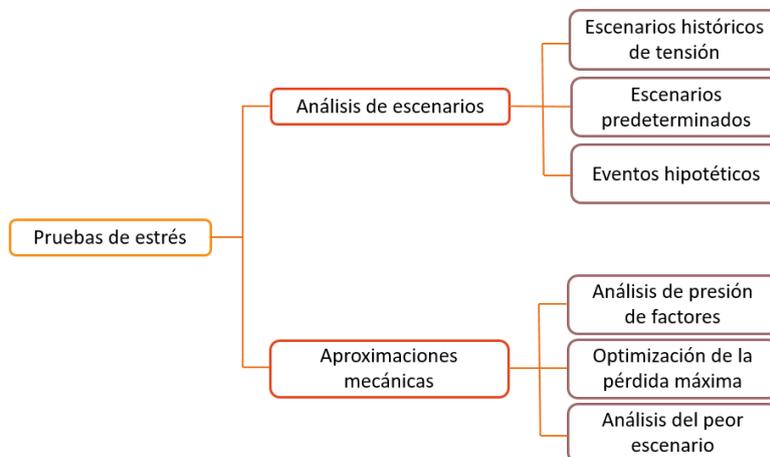
La importancia de estas pruebas puede verse fácilmente si se recuerda que el cálculo del *VaR* forma parte de uno de los pasos a seguir en la administración del riesgo que es el de la medición, esto quiere decir que no se trata únicamente de obtener un valor y su interpretación, se trata más bien de hacerlo formar parte de un proceso integral para la administración del riesgo y para esto es necesario tener en cuenta la presencia de escenarios o situaciones que pueden comprometer la solvencia de la institución o empresa para la cual se esté gestionando el riesgo, ya que en última instancia el *VaR* puede ser utilizado como indicador para obtener los niveles de capital necesarios de las mismas.

Visto de esta manera, las pruebas de estrés pueden considerarse como una forma de reforzar los resultados obtenidos, pudiendo proporcionar información de utilidad que con los modelos del *VaR* pueden no ser observados.

Algo que es importante tener en cuenta a la hora de hablar de pruebas de estrés es el hecho de que en la mayoría de los casos, estas pruebas no asignan ninguna probabilidad de ocurrencia a las situaciones consideradas como extremas que se han estado mencionando, lo que buscan estas pruebas es proporcionar una pérdida máxima de una serie de escenarios sin considerar ninguna probabilidad.

Existen diversas técnicas que pueden ser agrupadas como pruebas de estrés, algunas de ellas y las que se desarrollaran en este trabajo se observan en el siguiente esquema:

Esquema 8. Clasificación de las técnicas de Stress-Testing



Fuente: Dowd (1998)

2.4.1 Análisis de escenarios

Este tipo de prueba busca evaluar el impacto que pudieran tener diferentes situaciones hipotéticas sobre una determinada posición. Sin embargo, la elección de estas situaciones o escenarios no es sencilla pues no hay criterios universales que permitan definirlos, por lo que generalmente se toma como referencia la información histórica con la que se cuente.

En estas pruebas y tal como se muestra en el esquema anterior, se distinguen tres tipos de análisis:

1. Escenarios históricos de tensión

Este análisis busca replicar el efecto de distintos escenarios de crisis sobre la posición mantenida. Estos escenarios se obtienen directamente de la información histórica, por ejemplo, la crisis económica del 2008, en pocas palabras, se recopilan los datos históricos para después identificar aquellos que registraron mayores caídas.

En este tipo de análisis es necesario tener en cuenta que utilizar la información histórica no muestra todos los escenarios posibles, pues nada asegura que las máximas pérdidas registradas no vayan a ser rebasadas en un futuro.

2. Escenarios predeterminados

En este caso lo que se busca es evaluar el impacto que podrían tener movimientos hipotéticos en variables como tipos de interés, tipos de cambio, precios, etc. De esta manera se pueden estudiar diferentes escenarios, ya que puede simularse una caída en el índice bursátil mediante un número determinado de desviaciones estándar o una brusca variación en los tipos de cambio.

Ejemplos de estos escenarios son mostrados por el Derivatives Policy Group que pueden utilizarse como directrices para definirlos:

- Desplazamiento paralelo de la curva de tipos de interés en ± 100 puntos básicos.
- Cambio en la curva de tipos de interés de ± 25 puntos básicos.
- Variación en el índice bursátil de $\pm 10\%$.
- Fluctuación en la divisa de $\pm 6\%$.
- Cambios de volatilidad de $\pm 20\%$

Aunque estos escenarios pueden utilizarse como guía, es necesario tener en cuenta el nivel de representatividad que tengan en el mercado en el que se esté trabajando, pues si se está en un mercado donde las variaciones en el índice bursátil normalmente son del 10%, el efecto de tal prueba de tensión no tendría ninguna relevancia. También es importante tener en cuenta que no importa los niveles de variación que se consideren,

las pérdidas extremas, por naturaleza, son imprevisibles por lo que no se debe caer en una falsa seguridad que a la larga pudiera ser contraproducente.

3. Eventos hipotéticos

A través de este análisis se busca integrar el riesgo geopolítico, es decir examinar las consecuencias que podrían generar situaciones potenciales como guerras entre países, ataques terroristas o desastres naturales sobre una cartera. Es bastante notorio que el diseño de estos escenarios va a depender, en gran medida, del criterio y experiencia que tenga el administrador de riesgos, para lo cual deberá mantenerse informado de la situación política y económica mundial.

Una vez seleccionada alguna o algunas de las opciones que presenta el análisis de escenarios, su aplicación consiste en comparar el valor actual de la cartera (V_0) y el valor obtenido de la misma tras la prueba de estrés (V_S), es decir:

$$\text{Pérdida potencial} = V_0 - V_S \quad \text{siendo } V_S = \sum_{i=1}^N \omega_i * P_{i,S} \quad \text{con } \sum_{i=1}^N \omega_i = 1$$

Donde $P_{i,S}$ representa el precio de los activos de la cartera revaluados en el nuevo entorno y ω_i el peso que tiene cada activo dentro de la cartera.

Ahora que se han descrito los diferentes análisis que pueden considerarse como pruebas de estrés se vuelve evidente que también se presentan algunas debilidades como lo es el hecho de que dependen de la experiencia y sensatez del gestor de riesgos, lo que pudiera volver subjetivo el análisis. Además de que para carteras grandes y complejas aplicar este tipo de pruebas se vuelve bastante complicado, sin dejar de lado aquellas carteras cuya sensibilidad a pequeñas fluctuaciones en los precios es bastante grande, lo que hace que el stress-testing sea poco revelador.

Aun considerando estas debilidades es importante recordar en todo momento que el objetivo principal de estas pruebas es generar un mejor análisis y sensibilidad respecto a posibles escenarios extremos en el mercado, de hecho en muchas ocasiones las cifras que se puedan obtener mediante estos análisis pierden relevancia cuando se comparan con lo que los administradores de riesgo aprenden en la aplicación de las mismas, por lo que el uso de estas pruebas no debe tomarse a la ligera o como algo irrelevante.

2.4.2 Aproximaciones mecánicas

Las aproximaciones mecánicas son otro tipo de pruebas de estrés, que a diferencia de las anteriores, buscan contemplar una mayor cantidad de posibilidades o situaciones extremas en el momento de determinar las pérdidas que puede sufrir una cartera. En

algunos casos estas pruebas llegan a asignar una probabilidad de ocurrencia a los resultados que puedan presentarse, a diferencia de los análisis de escenarios.

Como se muestra en el esquema, de este bloque se desprenden tres tipos de pruebas de estrés:

1. Análisis de presión

Como se vio en la metodología para el *VaR* paramétrico, este podía verse como un múltiplo de la desviación estándar:

$$VaR (relativo) = V_0 * \sigma_1 * z^*$$

Donde z^* es igual a $\Phi(1 - p)$, es decir, el parámetro relacionado con el nivel de confianza seleccionado.

Este análisis, como su nombre lo indica, busca presionar el precio de cada componente de la cartera en la dirección más adversa. Su aplicación consiste en aumentar z^* veces la desviación estándar de cada uno de los activos y seleccionar aquel movimiento que en conjunto sea el más perjudicial para la cartera.

La facilidad de su aplicación en términos computacionales es una de las ventajas de este análisis, además de que permite obtener el resultado que produzca el peor escenario dado un rango amplio de posibilidades, lo que puede tomarse como indicador del grado de vulnerabilidad de la cartera y la toma de decisiones respecto a las posiciones más débiles.

Otra de sus ventajas y que lo vuelve más atractivo respecto a los análisis de escenarios se debe a que el parámetro z^* proporciona información sobre la probabilidad de ocurrencia de la pérdida producida por el peor escenario.

Por otro lado y al igual que los demás métodos existen algunas desventajas asociadas a este análisis. Una de ellas se debe a que los precios de los activos tienen diferentes niveles de sensibilidad a los distintos factores de riesgo, por lo que aplicar el mismo múltiplo de desviaciones estándar a la hora de presionar los precios es imposible.

Otra de las desventajas es que tiene sentido únicamente para posiciones relativamente simples, ya que al considerar que la pérdida máxima se produce en los valores extremos de las variables de riesgo, se deja de lado aquellas posiciones un poco más complejas. Un ejemplo de esto es considerar una compra de una opción call y una put contra el mismo activo subyacente (straddle largo), en este caso la pérdida máxima se presenta cuando los precios del subyacente no se mueven, por lo que aplicar el análisis de presión carecería de sentido.

2. Optimización de la pérdida máxima

Este análisis es bastante similar al análisis de presión, sin embargo, como se mencionó en las desventajas de la prueba anterior esta asume que la pérdida máxima se obtiene cuando los factores de riesgo toman valores extremos, mientras que esta técnica trabaja bajo la idea de que dicha pérdida puede producirse para valores intermedios de los factores de riesgo. Esto se vuelve más complejo a nivel computacional a medida que los factores de riesgo y valores intermedios aumenten, sin embargo, esta alternativa se vuelve más conveniente porque justamente ataca una de las desventajas de la técnica anterior.

3. Análisis del peor escenario

A diferencia de las dos técnicas ya mencionadas, esta prueba busca analizar la influencia de la situación más desfavorable que se espera ocurra y no de un conjunto de escenarios más o menos probables que se consideren adversos.

Para su aplicación se considera un horizonte temporal h y el peor escenario está asociado al resultado diario más desfavorable. En este sentido suponiendo que los resultados diarios están representando por una variable aleatoria denotada por K_i , el peor escenario queda representado por:

$$\min[K_1, K_2, \dots, K_{h-1}, K_h]$$

Y para estimar el peor escenario se llevan a cabo diferentes simulaciones de las variables K_i hasta obtener una distribución de probabilidad.

La principal desventaja de este análisis radica en que puede promover una posición bastante conservadora a la hora de asignar el capital lo cual no siempre es favorable para la empresa o institución.

2.5 Back-testing

Hasta el momento se han mostrado diferentes técnicas para obtener una estimación de la máxima pérdida probable, es decir, el VaR . Sin embargo y debido a que ya se han mencionado algunas debilidades de dichas metodologías una pregunta que surge es como se puede asegurar que el método empleado realmente está cumpliendo con su objetivo que es el tener una estimación de la pérdida máxima en la que se puede incurrir y cuantas veces aproximadamente esta pérdida será superada. Es decir, si se tiene por ejemplo, un VaR diario calculado con un nivel de confianza del 99% se espera que esta pérdida sea superior al VaR únicamente en un 1% en el periodo de análisis, en caso de que el número de veces en que este valor es superado sea mayor a dicho porcentaje, significa que el modelo que se está utilizando está infravalorando el riesgo y en caso de que estuviera por debajo del 1% se puede hablar de una sobrestimación del mismo.

Para resolver dicha interrogante respecto a si el modelo empleado está teniendo exactitud o no, se puede emplear un método conocido como Back-testing o ejercicio de autocomprobación, que permite realizar una comparación entre dos magnitudes, una de ellas son las pérdidas realmente experimentadas por la cartera en un tiempo determinado y la estimación previa realizada en términos de VaR . Visto de otra manera, se pretende analizar el número de veces que las pérdidas experimentadas son superiores al VaR y compararlo con el nivel de significancia que arrojan los parámetros seleccionados.

El Comité de Basilea recomienda examinar el número de veces que se supera la pérdida para un VaR a un nivel de confianza del 99% durante un año. Aconseja utilizar los rendimientos diarios de los doce meses más recientes, es decir un aproximado de 250 observaciones y compararlas con la pérdida estimada resultado de un VaR diario a un 99% de confianza. En caso de que se observen irregularidades, el supervisor podrá comenzar a analizar el modelo para detectar posibles defectos y en casos más extremos no autorizar el uso de dicho modelo.

De acuerdo con el Comité pueden realizarse dos tipos de pruebas:

- **Back-testing hipotético**

Este modelo busca atacar una de las desventajas que podría presentarse a la hora de almacenar en una base los VaR diarios y las pérdidas y ganancias reales para realizar la comparación, que surge del hecho de que la cartera no se mantiene estática en el tiempo.

Por esta razón, de lo que se trata esta metodología es de congelar la cartera en un día determinado. A partir de esto, las excepciones o número de veces que la pérdida del VaR es superada se obtiene mediante la comparación de las estimaciones del VaR diarias y la pérdida hipotética del día siguiente manteniendo la cartera congelada, sin considerar los resultados intradía ni los cambios en las posiciones de la cartera.

- **Back-testing real**

Este tipo de back-testing se basa precisamente en una comparación real, donde las pérdidas y ganancias diarias se comparan con las cifras estimadas mediante el VaR del día anterior. Y como se menciona en el modelo anterior, la principal desventaja de llevarlo a cabo de esta manera surge debido a que las pérdidas y ganancias registradas podrían verse contaminadas por la presencia de comisiones y corretajes, además de las operaciones que se puedan realizar en el intradía, sin embargo, el Comité de Basilea recomienda aplicar ambos análisis con el fin de generar un mayor entendimiento de cómo se están relacionado las estimaciones calculadas y los resultados reales obtenidos.

Estos modelos presentados no tienen ninguna robustez estadística de por medio, que muchas veces en la práctica es requerida. Fue en 1995 cuando Paul Kupiec presento por primera vez un modelo estadístico para el backtesting.

Este modelo propone una metodología de contraste basada en dos pruebas, la primera trabaja con el tiempo que pasa hasta que se presenta la primera excepción o vez que el VaR es superado, y, la segunda, emplea la frecuencia con la que se presentan dichas excepciones en un periodo determinado de días.

Comenzando con el primer contraste, se define una variable aleatoria T que representa el número de días que pasan hasta que la primera excepción o exceso es producido, asignándole una probabilidad de p , y debido a que las medidas diarias del VaR son independientes, los resultados corresponden a una secuencia de eventos no dependientes de tipo Bernoulli, por lo que la probabilidad de que el primer exceso ocurra en un periodo de x días queda dada por la siguiente expresión:

$$P[T = x] = p * (1 - p)^{x-1}$$

El contraste que se realiza con el modelo consiste en aceptar o rechazar la hipótesis nula que indica que la probabilidad de exceso experimentada realmente es igual a la utilizada en el cálculo del VaR , es decir, a $1 - c$ siendo c el nivel confianza utilizado. Para esto se hace uso de la razón de verosimilitud:

$$L_R = -2 \ln \frac{p^* * (1 - p^*)^{x-1}}{\hat{p} * (1 - \hat{p})^{x-1}}$$

Donde,

- x es el número de días hasta que se experimenta el primer exceso
- p es la verdadera probabilidad cubierta respecto al número de excesos observados
- p^* la probabilidad utilizada para el cálculo del VaR , es decir $p^* = 1 - c$
- \hat{p} es el estimador máximo verosímil de p , dado por:

$$\hat{p} = \frac{1}{x}$$

Sustituyendo esta última expresión en la razón de verosimilitud, se tiene lo siguiente:

$$L_R = -2 \ln \frac{p^* * (1 - p^*)^{x-1}}{\frac{1}{x} * \left(1 - \frac{1}{x}\right)^{x-1}}$$

Y bajo la hipótesis nula la razón anterior se distribuye como una Chi-cuadrada con un grado de libertad. Algunos otros autores que realizan pruebas de contraste muy similares en lugar de utilizar una Chi-cuadrada optan por distribuciones normales tipificadas.

Como ejemplo se considerará un valor de p^* igual a 0.01, es decir que el VaR se trabajó con un nivel de confianza del 99%, además de esto se considera un nivel de significancia para la Chi-cuadrada de 5% y se tiene que la primer excepción se presentó a los 200 días. A partir de estos datos, se obtiene el siguiente valor estadístico:

$$L_R = -2 \ln \frac{0.01^* * (1 - 0.01^*)^{200-1}}{\frac{1}{200} * \left(1 - \frac{1}{200}\right)^{200-1}} = 0.619$$

El valor que toma la Chi-cuadrada con un grado de libertad al 5% es igual a 3.841 y el estadístico toma un valor de 0.619, es decir un valor menor, por lo que la hipótesis nula no es rechazada, en otras palabras, la probabilidad utilizada para el cálculo del VaR no difiere de la probabilidad real con la que aparecen las pérdidas que superar el VaR .

Continuando con la consideración un nivel de significancia del 5% para la Chi-cuadrada, la siguiente tabla muestra los intervalos de aceptación de la hipótesis para diferentes valores de p^* .

Tabla 5. Intervalos de aceptación de la hipótesis nula con 5% de nivel de significancia

p^*	Intervalo de aceptación
0.05	$11 < x < 879$
0.01	$6 < x < 439$
0.025	$2 < x < 175$
0.05	$x < 87$

Fuente: Elaboración propia

El segundo contraste se basa en la frecuencia con la que las excepciones se presentan dentro intervalo de tiempo definido. Como en el caso anterior lo que se hará es contrastar la hipótesis nula $p = p^*$ y la razón de verosimilitud será la siguiente:

$$L_R = -2 \ln \frac{(p^*)^k * (1 - p^*)^{n-k}}{\left(\frac{k}{n}\right) * \left(1 - \frac{k}{n}\right)^{n-k}}$$

Donde,

- n es el número de días de la muestra seleccionada
- k el número de excepciones observadas en el intervalo de tiempo de análisis
- $\frac{k}{n}$ frecuencia de pérdidas que exceden el VaR

Al igual que en el contraste pasado, bajo la hipótesis nula la razón sigue una distribución Chi-cuadrada con un grado de libertad.

Tomando un ejemplo, supóngase que $p^* = 0.01$ y que en una muestra de 510 días se observaron 20 excepciones, lo que daría un estadístico con el siguiente valor:

$$L_R = -2 \ln \frac{(0.01)^{20} * (1 - 0.01)^{510-20}}{\left(\frac{20}{510}\right) * \left(1 - \frac{20}{510}\right)^{510-20}} = 25.3$$

Y dado que para una Chi-cuadrada con un grado de libertad y un nivel de significancia del 5% el estadístico es 3.841 y evidentemente $25.3 > 3.841$, la hipótesis nula es rechazada. En este caso, para que la hipótesis nula no fuera rechazada, el valor de p^* debería ser mayor, además de que se puede deducir que el valor del VaR está siendo infraestimado.

Una vez que se han mostrado los dos contrastes que se pueden realizar para identificar la confiabilidad de la metodología que se está empleando para el cálculo del VaR , es importante mencionar que es necesario trabajar con un número grande observaciones, ya que entre más observaciones se tengan el contraste será más robusto.

Finalmente, hasta ahora se han mostrado las principales metodologías empleadas para el cálculo del VaR y algunas estrategias que permiten analizar de manera más amplia esta metodología, como lo son las pruebas de estrés y en este caso, un método que permite tener sensibilidad respecto a si el VaR está siendo calculado de manera efectiva. Sin embargo, se debe seguir haciendo hincapié en algunas de sus limitaciones, como lo es el supuesto de una distribución normal o lognormal a la hora de calcularlo y el hecho de que se ignoran las pérdidas cuya probabilidad de que ocurrencia sea menor a la que se eligió como nivel de confianza.

Además de esto, esta medida de riesgo presenta problemas de incoherencia desde un punto de vista matemático, lo que tiene repercusiones a la hora de la práctica. Esta incoherencia surge de la definición de las medidas coherentes de riesgo.

Si se define una medida de riesgo como la función $\rho(X)$, esta será considerada como una medida coherente de riesgo si cumple con las siguientes características:

1. Sub-aditiva: $\rho(X + Y) \leq \rho(X) + \rho(Y)$
2. Positiva homogénea: $\rho(\lambda X) \leq \lambda * \rho(X)$, $\lambda \geq 0$
3. Invariante por traslación: $\rho(X + a) \leq \rho(X) + a$, $a \in \mathbb{R}$
4. Monótona: Si $X \leq Y$ entonces $\rho(X) \leq \rho(Y)$

Donde X y Y son activos financieros.

El VaR es considerado como una medida de riesgo incoherente porque no cumple, en todos los casos, con el principio de sub-aditividad.

Esto último representa una de las limitaciones más importante en algunos casos a la hora de aplicar el VaR y querer tomar decisión a partir del mismo y es justo esta limitación la que dio lugar a una nueva medida de riesgo conocida como VaR Condicional ($CVaR$) que será explorado en el siguiente apartado y que junto con el Valor en Riesgo se han convertido en dos de las herramientas más populares para medir el riesgo de mercado.

2.6 VaR Condicional

Como ya se mencionó, como solución a la limitación de sub-aditividad del VaR surge otra medida de riesgo conocida como $CVaR$ o también conocida bajo los nombres de Expected Shortfall, Beyond- VaR o Tail VaR .

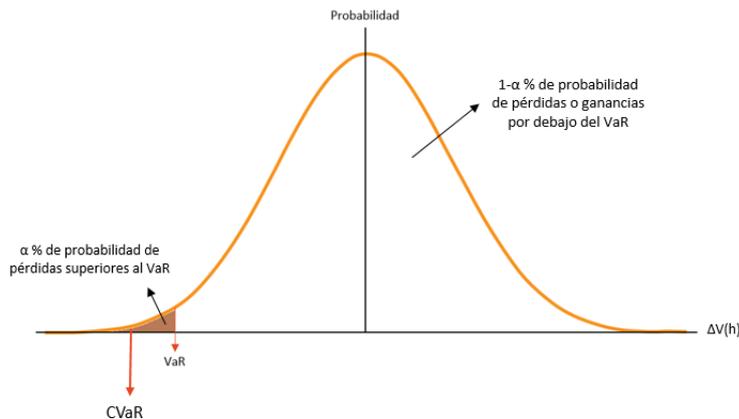
Este método se puede interpretar como la pérdida esperada condicionada a que se ha superado el valor obtenido por el VaR . Visto de esta manera, el $CVaR$ queda definido por la esperanza matemática condicional, por lo tanto, para X una variable aleatoria que representa las pérdidas y ganancias de una cartera, el VaR Condicional para un nivel de confianza de $100(1 - \alpha)\%$ adopta la siguiente expresión:

$$CVaR_{\alpha}(X) = E[X | X \geq VaR_{\alpha}(X)]$$

La ventaja de esta metodología es que por un lado el $CVaR$ sí es una medida coherente de riesgo a diferencia del VaR , además de que conocer la posible pérdida que se podría experimentar una vez superado el VaR da una mayor sensibilidad de las pérdidas a las que se podría enfrentar la institución, lo que sin duda alguna permite una mejor y más efectiva gestión del riesgo.

Visto de manera gráfica, el $CVaR$ queda reflejado de la siguiente manera:

Gráfica 4. Representación gráfica del T-VaR



Fuente: Elaboración propia

Dada la definición del *CVaR* e incluso mediante su interpretación gráfica se vuelve sencillo deducir que el valor de este siempre será mayor o igual que el del *VaR*, de hecho, cuando la distribución de las pérdidas y ganancias se ajusta a una distribución Normal, ambos son equivalentes, pues para un *VaR* con un nivel de significancia de α , el *VaR* condicional, siguiendo la definición de la esperanza condicional, queda representado de la siguiente manera:

$$CVaR_{\alpha}(X) = \sigma * \frac{\phi(\Phi^{-1}(\alpha))}{\alpha} = \sigma * \frac{e^{-\frac{\Phi^{-1}(\alpha)^2}{2}}}{\alpha\sqrt{2\pi}}$$

Donde $\Phi^{-1}(\alpha)$ es el percentil 100α de la distribución normal estándar y ϕ representa la función de distribución de una normal estándar.

Como se mencionó, cuando se tiene la presencia de una distribución normal el valor del *VaR* y *CVaR* son equivalentes, esto se puede ver desde la ecuación anterior donde el *VaR* condicional es igual a un múltiplo de la desviación estándar, al igual que el *VaR*.

Una vez obtenido el *CVaR*, es importante mencionar que su utilidad como medida de riesgo queda condicionada a ejercicios de autocomprobación como lo es el Backtesting, sin embargo, para este caso es un poco más complicado, ya que para aplicar un análisis de este estilo es necesario contar con un volumen considerado de datos, lo cual se puede convertir en un problema si se considera que, por definición, las pérdidas superiores al Valor en Riesgo son poco probables.

Por esta misma razón y dejando de lado el supuesto de una distribución normal, es necesario llevar a cabo una buena estimación de la cola de la distribución de las

pérdidas que puedan experimentarse, ya que como se vio anteriormente el *CVaR* es representando por una esperanza condicional.

En este sentido, algo que es muy recomendable y que se vuelve fundamental a la hora de calcular el Valor en Riesgo condicional es la *Teoría del Valor Extremo*. Esta teoría busca, de manera resumida, modelar las rentabilidades más extremas o negativas observadas, por lo que es necesario recoger información histórica sobre las variaciones extremas experimentadas, con la finalidad de encontrar un posible ajuste de las observaciones a una determinada función.

Esta teoría y su uso en este caso se sustentan en el teorema con el mismo nombre, que demuestra que la distribución de valores extremos para una muestra grande converge a una distribución límite cuya forma es conocida.

Con esta información se ha demostrado que para colas gruesas y niveles de confianza altos, la función de distribución de los valores una vez superado el *VaR* se ajusta bastante a una distribución de Pareto Generalizada. Esta distribución tiene la siguiente forma:

$$G_{\lambda\beta}(x) = \frac{1}{\left(1 + \frac{x}{\lambda\beta}\right)^\lambda} \quad x \geq 0$$

Donde λ y β son los parámetros de la función que pueden ser calculados. Finalmente, para distribución, el *CVaR* queda definido de la siguiente manera:

$$CVaR \approx \frac{\lambda}{\lambda - 1} * VaR$$

Hasta ahora y como se vio a lo largo de todo este capítulo, las metodologías utilizadas para el cálculo del *VaR* e incluso los métodos empleados para su comprobación, pueden llegar a presentar inconvenientes debido a los supuestos de los que parten, señalando así que los modelos no terminan por ajustarse a los fenómenos financieros que están y estarán presentes generando impactos en los mercados.

Un ejemplo de estos mercados es el conocido como Mercado Cambiario donde se lleva a cabo la compra y venta de divisas. Por esta razón fue seleccionado para la aplicación dos de los modelos más tradicionales del *VaR* a una paridad de este mercado con el objetivo de identificar las ventajas y desventajas de ambos métodos.

Capítulo 3. Aplicación del *VaR* al mercado cambiario

Como se ha visto a lo largo de este trabajo, las metodologías utilizadas para el cálculo del *VaR* e incluso los métodos empleados para su comprobación, pueden llegar a presentar inconvenientes debido a los supuestos de los que parten, ya que en la realidad, los mercados rara vez se llegan a ajustar a estos supuestos.

Como ya se mencionó el Mercado Cambiario o FOREX es un ejemplo siendo el mercado más grande y líquido del mundo donde se lleva a cabo la compra y venta de divisas. Por esta razón se trabajará con la paridad cambiaria USD/MXN para realizar un comparativo entre dos de los modelos tradicionales del *VaR*, Simulación Histórica y Montecarlo, en un escenario estable y uno de tensión o volatilidades altas, para lograr identificar las fortalezas y debilidades de estos.

3.1 Mercado cambiario (FOREX)

FOREX por su terminología en inglés (Foreign Exchange) hace referencia al proceso de cambio de una moneda a otra a un precio acordado, este intercambio se da principalmente por razones de comercio, trading o turismo. De acuerdo con el Banco de Pagos Internacionales (BIS), el volumen de compra y venta de divisas supera los 5.1 trillones de dólares diarios.

De este término se deriva el Mercado Cambiario también conocido como Mercado de Divisas o Forex Market que es donde se da la negociación o compraventa de las monedas. Este es un mercado global y descentralizado, es decir, que es considerado como un mercado fundamentalmente no organizado u OTC (Over the counter) lo que quiere decir que las operaciones efectuadas en el mismo no se realizan en un lugar físico necesariamente, además de ser el mercado financiero más grande y líquido del mundo.

Al ser un mercado descentralizado no existe ninguna organización que se encargue de compensación y liquidación de las operaciones o que actúe como intermediario entre las partes para garantizar el cumplimiento de las obligaciones adquiridas por las mismas, por lo que cada operación se cierra mediante un contrato particular entre las partes.

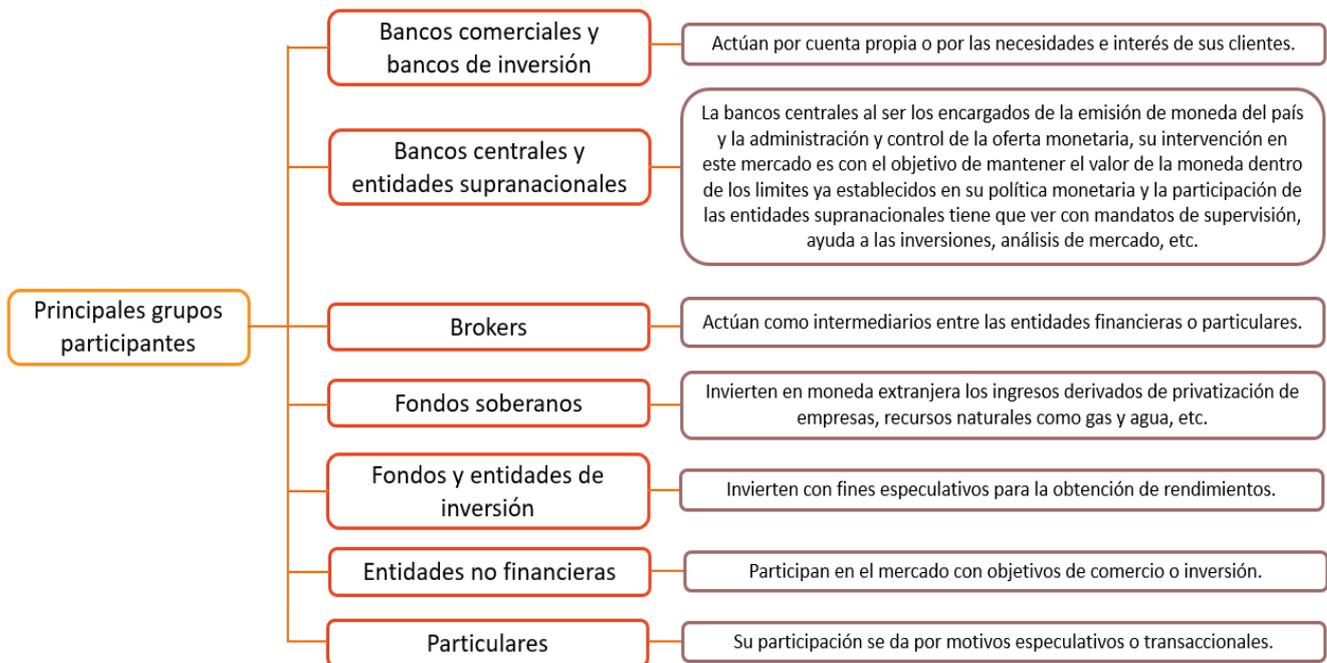
Es importante diferenciar entre el Mercado de Divisas y el mercado de billetes, pues el segundo hace referencia al cambio de monedas físicas que se realizan en entidades bancarias o casas de cambio, con el objetivo principal de satisfacer la necesidad de aquellas personas que van a viajar a países cuya moneda es distinta a la empleada en el país de origen, por lo que la moneda doméstica sea cambia a moneda extranjera.

Este mercado es bastante continuo pues se encuentra en operación prácticamente las 24 horas del día durante un poco más de cinco días a la semana. Su operación comienza

con la apertura del mercado en Australia los domingos por la tarde tiempo de México y finaliza los viernes con el cierre en Estados Unidos en New York.

Una de las razones por las que este mercado se convirtió en el mercado financiero más grande del mundo se deriva de la gran variedad de participantes que tiene, desde bancos centrales hasta agentes individuales.

Esquema 9. Principales grupos participantes en el mercado cambiario



Fuente: BBVA

Como se observa en el esquema anterior, las razones por las cuales se participa en el mercado de divisas puede variar dependiendo de los objetivos de cada grupo, es decir, que las operaciones de cambio se dan por diversas finalidades entre las que destacan:

1. **Cobertura:** Se presenta cuando el objetivo es reducir o evitar los impactos que se puedan presentar en las cuentas de las instituciones o entidades por variaciones en el precio de alguna moneda.
2. **Liquidación de pagos:** Se deriva de la importación y exportación.
3. **Intermediación:** Su objetivo es lograr que los vendedores y compradores lleguen a un acuerdo en sus intereses, cobrando una comisión por ello.
4. **Especulación:** Se da cuando lo que se pretende es encontrar un rendimiento o beneficio derivado de las variaciones en los precios.
5. **Intervención:** Se realiza generalmente por los bancos centrales cuyo objetivo es el de influenciar su moneda.
6. **Arbitraje:** Mediante este lo que se hace es buscar las ineficiencias de los mercados para aprovecharlas obteniendo un beneficio sin riesgo.

FOREX no es un mercado donde las operaciones sean llevadas a cabo en un lugar en específico, por lo que hay un gran número de centros operativos alrededor del mundo y las más comunes se encuentran en Tokio, Hong Kong, Singapur, Nueva York, Chicago, Toronto, Sídney, Bahrein, Londres, Frankfurt y Zúrich. Y los países que concentran la mayor cantidad de volumen de operaciones en el mercado cambiario son Estados Unidos, Reino Unido, Singapur, Hong Kong y Japón, acumulando un poco más del 77%.

La moneda más representativa actualmente en el mercado es el dólar americano, que es la divisa en la que se encuentran denominadas más del 60% de las reservas de los bancos centrales. La segunda de mayor importancia es el euro, en la que 24% de las reservas internacionales están denominadas, seguida por el yen japonés que representa un 5.4% y la libra esterlina un 5.6% de acuerdo al Banco Internacional de Pagos (BIS).

Un término importante en este mercado es el de pares de divisas o paridad cambiaria que hace referencia al número de unidades que se deben entregar de una moneda a cambio de una unidad de otra moneda distinta. Estos pares de divisas se presentan por seis letras expresadas de la siguiente manera: XXX/YYY, donde cada triada hace referencia al código de las monedas que conforman la paridad asignada por la Organización Internacional de Estandarización o ISO por sus siglas en inglés (International Organization for Standardization), entre las más comunes están las enlistadas en la siguiente tabla.

Tabla 6. Código ISO para las principales monedas internacionales

MONEDA	CÓDIGO ISO
 Peso mexicano	MXN
 Dólar americano	USD
 Euro	EUR
 Yen japonés	JPY
 Libra esterlina	GBP
 Franco suizo	CHF
 Dólar australiano	AUD
 Dólar canadiense	CAD
 Corona sueca	SEK
 Dólar de Hong Kong	HKD
 Corona noruega	NOK
 Dólar neozelandés	NZD
 Dólar de Singapur	SGD
 Won coreano	KRW

Fuente: Elaboración propia

En la paridad cambiaria, las tres primeras letras hacen referencia a la moneda base, mientras la segunda triada representa a la moneda cotizada. Como ejemplo, se considera el par de divisa USD/MXN que puede interpretarse como la cantidad de pesos mexicanos que se deben dar a cambio de un dólar americano, esta paridad a inicios del 2020 era igual a 18.87 pesos mexicanos.

En el mercado cambiario no todas las divisas tienen la misma importancia, como ya se mencionó anteriormente, la más representativa es el dólar americano, seguido del euro y esto se ve claramente en las encuestas realizadas cada tres años por el Banco Internacional de Pagos, donde se obtiene el porcentaje del volumen diario de cada moneda, lo que permite asignarles una posición global. A continuación, se muestran las posiciones de cada divisa de las encuestas realizadas de 2010 a 2019, donde es importante tener en cuenta que la suma de la participación será de 200% y no de 100% pues en una operación del mercado cambiario participan dos monedas.

Tabla 7. Participación de las diferentes divisas en el mercado cambiario de 2010 a 2019

Posición global	2010		2013		2016		2019	
	Divisa	Participación	Divisa	Participación	Divisa	Participación	Divisa	Participación
1	Dólar americano	84.9	Dólar americano	87.0	Dólar americano	87.6	Dólar americano	88.3
2	Euro	39.0	Euro	33.4	Euro	31.4	Euro	32.3
3	Yen japonés	19.0	Yen japonés	23.0	Yen japonés	21.6	Yen japonés	16.8
4	Libra esterlina	12.9	Libra esterlina	11.8	Libra esterlina	12.8	Libra esterlina	12.8
5	Dólar australiano	7.6	Dólar australiano	8.6	Dólar australiano	6.9	Dólar australiano	6.8
6	Franco suizo	6.3	Franco suizo	5.2	Dólar canadiense	5.1	Dólar canadiense	5.0
7	Dólar canadiense	5.3	Dólar canadiense	4.6	Franco suizo	4.8	Franco suizo	5.0
8	Dólar de Hong Kong	2.4	Peso mexicano	2.5	Renminbi chino	4.0	Renminbi chino	4.3
9	Corona sueca	2.2	Renminbi chino	2.2	Corona sueca	2.2	Dólar de Hong Kong	3.5
10	Dólar neozelandés	1.6	Dólar neozelandés	2.0	Dólar neozelandés	2.1	Dólar neozelandés	2.1
11	Won coreano	1.5	Corona sueca	1.8	Peso mexicano	1.9	Corona sueca	2.0
12	Dólar de Singapur	1.4	Rublo ruso	1.6	Dólar de Singapur	1.8	Won coreano	2.0
13	Corona noruega	1.3	Corona noruega	1.4	Dólar de Hong Kong	1.7	Dólar de Singapur	1.8
14	Peso mexicano	1.3	Dólar de Hong Kong	1.4	Corona noruega	1.7	Corona noruega	1.8
15	Rupia india	0.9	Dólar de Singapur	1.4	Won coreano	1.7	Peso mexicano	1.7
16	Rublo ruso	0.9	Lira turca	1.3	Lira turca	1.4	Rupia india	1.7
17	Renminbi chino	0.9	Won coreano	1.2	Rublo ruso	1.1	Rublo ruso	1.1
18	Zloty polaco	0.8	Rand sudafricano	1.1	Rupia india	1.1	Rand sudafricano	1.1
19	Lira turca	0.7	Real brasileño	1.1	Real brasileño	1.0	Lira turca	1.1
20	Rand sudafricano	0.7	Rupia india	1.0	Rand sudafricano	1.0	Real brasileño	1.1

Fuente: Banco Internacional de Pagos

También de acuerdo al BIS, los pares de divisas más negociados son el EUR/USD, el USD/JPY, la GBP/USD y el USD/CHF, de hecho, estos pares son conocidos como pares mayores.

Si bien hay un gran número de operaciones que se pueden llevar a cabo en este mercado derivadas de diferentes razones, la gran mayoría de estas operaciones son realizadas por inversores con el objetivo de obtener beneficios, esto se debe a la gran cantidad de divisas convertidas a diario que puede provocar que los movimientos de precio de algunas de ellas sean extremadamente volátiles y es precisamente esta volatilidad la que hace al Forex tan atractivo para los inversores, pues como se ha visto

durante todo este trabajo, el aumento de la volatilidad trae consigo mayor riesgo pero también mayores rendimientos.

La volatilidad derivada de la cantidad de divisas convertidas a diario se puede ver afectada, presentando grandes saltos de un periodo a otro, por la presencia de ciertos factores políticos y económicos. Esto se debe a que la forma de determinar los valores de tipo de cambio se basa en la relación entre la oferta y demanda de las monedas, en este sentido, si una moneda es considerada como estable, en algún momento de crisis la demanda de la misma aumentará considerablemente, lo que tendrá el mismo efecto en el valor de la moneda respecto a otras.

En el siguiente esquema se pueden observar algunos de los factores más importantes que son determinantes en el comportamiento del tipo de cambio de las divisas.

Esquema 10. Factores que influyen en el valor del tipo de cambio de un país



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en el esquema la especulación es un factor que influye en el tipo de cambio, esta es clave fundamental para los grupos participantes que buscan obtener un beneficio a partir de las fluctuaciones que se puedan presentar en las divisas, que es uno de los participantes más grandes dentro del mercado cambiario.

Durante periodos de crisis económica o épocas con mucha incertidumbre las decisiones tomadas por los inversionistas suelen basarse en la divisa que es considerada como referencia monetaria, pues esto les genera mayor confianza. Anteriormente, la referencia monetaria en el mercado cambiario era la libra esterlina del Reino Unido, pero en la actualidad esta posición es ocupada por el dólar americano debido a la fortaleza de la economía monetaria que Estados Unidos tenía al final de la Segunda Guerra Mundial, cuando se hicieron los Tratados de Bretton Woods.

Es justo en tiempos de incertidumbre máxima cuando los valores de tipo de cambio pueden presentar subidas o bajadas importantes, pues lo que más se buscará es seguridad en las inversiones aumentando la demanda de las divisas que generen mayor confianza y a esto se suman las especulaciones que surgen respecto a que monedas pueden bajar su valor en el mercado, lo que reducirá su demanda y aumentará la oferta de esta, reduciendo aún más su valor.

La historia ha mostrado que la incertidumbre y especulación son parte fundamental de la economía de un país y lo que pueda pasar con el valor de su moneda. Un claro ejemplo de esto se da en México que, durante las últimas cinco crisis económicas, en septiembre de 1976, en el mismo mes de 1982, en octubre de 1987, en diciembre de 1994 y en octubre de 2008 el peso mexicano presentó una depreciación respecto al dólar americano, en esta última inició el año con una paridad de 10.91 pesos por dólar americano y terminó con un valor de 13.83 pesos.

Este comportamiento también se presenta en situaciones que en un inicio pudieran no ser consideradas como significativas para la economía, como es el caso de la pandemia mundial ocasionada por el COVID-19, de la que se hablará un poco más en el siguiente apartado, que llevó a la paridad USD/MXN a su máximo histórico de 25.11 pesos mexicanos por dólar americano.

3.2 COVID-19 en México

El COVID-19 se trata de un tipo de coronavirus denominado como SARS-COV2. Apareció en Wuhan, una provincia de Hubei en China en diciembre de 2019 y no tardó en extenderse a todo el mundo lo que provocó que fuera declarado como una pandemia global por la Organización Mundial de la Salud en marzo de 2020. En México, el primer caso registrado se dio el día 27 de febrero de 2020.

3.2.1 Impacto económico del COVID-19 y la paridad USD/MXN

Desde el primer momento en que el virus comenzó a expandirse de manera mundial fue evidente que los daños que causaría no se verían reflejados únicamente en el ámbito de salud, sino que tendría efectos tanto en lo social como lo político y económico.

Entender por qué la economía comenzó a verse afectada por la llegada de este virus no es muy complicado si se presta atención a sus implicaciones. Como se mencionó, una de las medidas utilizadas para la contención del virus fue el confinamiento de las personas a sus hogares lo que trajo consigo una disminución del consumo (en muchos sectores del comercio). Junto con esto, la misma medida de confinamiento provocó la interrupción abrupta de las cadenas globales de producción y el cierre de una gran cantidad de negocios por la necesidad de evitar el contacto entre las personas. La

combinación de estas situaciones trajo consigo un desbalance entre la oferta y demanda en muchos sectores comerciales.

Como efecto dominó, la disminución de los ingresos de las empresas y los negocios provocó un incremento en el desempleo y que muchas familias dejaran de recibir ingresos lo que, junto con el aislamiento y la suspensión de actividades no esenciales, tuvieron como consecuencia una disminución aún mayor en la demanda.

Esta caída tanto en oferta como en demanda se vio reflejada de manera global trayendo consigo graves consecuencias en la economía de todos los países mismas que se estima estarán presentes durante mucho tiempo.

En el caso de México, algunas de las consecuencias que se observaron desde el inicio de la pandemia fueron el desplome en los mercados accionarios y una caída en el precio del petróleo, debido a la poca demanda de este. Además de que el PIB tuvo un crecimiento del -17.8% en el segundo trimestre del 2020 y que hasta la última cifra consultada no se ha logrado recuperar los niveles de PIB del primer trimestre del 2020.

La incertidumbre generada por la aparición de este virus a nivel mundial se mantuvo al alza desde el día uno al ver el comportamiento de la economía en todos los países, lo que comenzó a generar un pánico bursátil provocando caída del peso respecto al dólar.

A inicios del 2020, cuando no se esperaba que el COVID-19 se extendiera a todos los países, la paridad USD/MXN se encontraba alrededor de los 18.8 pesos mexicanos y se mantuvo en esos niveles durante los dos primeros meses del año, sin embargo, cuando la OMS declaró al virus como pandemia mundial en el mes de marzo, se comenzó a ver un incremento en el valor de la paridad a favor del dólar, iniciando el mes con un precio de 19.39 pesos por dólar, llegando a sus puntos más altos a mediados de mes y alcanzando un máximo histórico de 25.11 el 26 del mismo mes.

Gráfica 5. Tendencia de la paridad USD/MXN de enero 2019 a marzo 2020



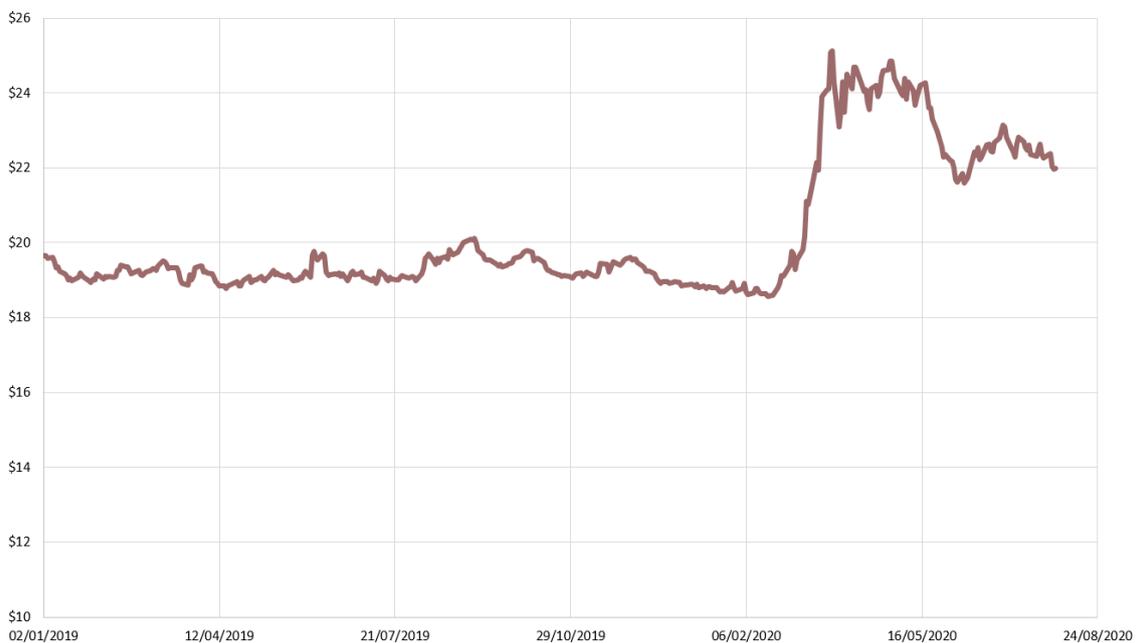
Fuente: Elaboración propia con información obtenida de Banco de México

Las fluctuaciones de una paridad están relacionadas con la política monetaria de cada país. En el caso de México, esta política tiene un régimen donde los tipos de cambio se determinan de acuerdo con la oferta y demanda de la moneda en el mercado, en otras palabras, es el mercado de divisas quien controla los precios de las monedas.

Por esta razón y recordando que el dólar americano es una referencia monetaria en la economía de todos los países, el comportamiento observado en la gráfica no es de extrañarse, ya que, al ser considerado como una de las monedas más sólidas y fuertes del mundo, la compra de esta incrementa cuando se busca protección ante una crisis, lo que hace que su demanda sea mayor provocando un aumento en su valor respecto a otras monedas, en este caso el peso mexicano.

Es importante mencionar y tal como se observa en la siguiente gráfica, que la valuación tan alta de la moneda no se mantuvo por un largo periodo de tiempo. Si bien no se llegó a los niveles que se tenían antes de marzo 2020, a partir de junio se comenzó a observar un comportamiento más estable, esto se debe a que el incremento en la demanda del dólar se presenta cuando la incertidumbre es muy alta, sin embargo, con el paso del tiempo y conforme los impactos reales comienzan a ser más visibles, la tendencia va a la baja, lo que mejora considerablemente la volatilidad del USD/MXN.

Gráfica 6. Tendencia de la paridad USD/MXN de enero 2019 a julio 2020



Fuente: Elaboración propia con información obtenida de Banco de México

Esto también se ve relacionado con las medidas que cada país tome para evitar que el precio de la paridad siga en aumento. En el caso de México fue la Comisión de Cambios, integrada por el Banco de México (BANXICO) y la Secretaría de Hacienda quien

comenzó a implementar medidas de protección para el peso y así evitar que siguiera depreciándose.

Una de las medidas adoptadas por esta comisión fue el incremento del tamaño del programa de coberturas cambiarias, pasando de 20,000 millones de dólares (mdd) a 30,000 mdd. Una cobertura cambiaria puede verse como un tipo de seguro que protege del riesgo cambiario a los inversores. Es decir que, si tiene este tipo de cobertura y en caso de haber realizado una inversión que implique la paridad USD/MXN y que el aumento del dólar ante el peso genere una pérdida para el inversor, será el Banco de México quien absorba esta pérdida.

Este tipo de medidas comienzan a generar mayor confianza respecto a la moneda, por lo que la demanda crece mejorando así la variación de la paridad.

Retomando todo lo descrito en este y los capítulos anteriores, se sabe que el riesgo cambiario es un tipo de riesgo de mercado y en casos como una pandemia mundial, una buena gestión del mismo se vuelve imprescindible para evitar pérdidas catastróficas, por esta razón es necesaria una buena medición del riesgo.

En este trabajo se ha hablado del *VaR* como medida de riesgo de mercado, así como de sus posibles debilidades, pero es justamente en la práctica donde se puede corroborar la efectividad de esta metodología y si su aplicación es suficiente para medir el riesgo al que se está expuesto. Por esta razón la aplicación de este trabajo consiste en evaluar el riesgo de mercado de la paridad USD/MXN mediante el método de Simulación Histórica y Simulación Montecarlo del *VaR* y una vez obtenidos los valores realizar las pruebas de comprobación ya mencionadas con el objetivo de analizar cual modelo estima de forma más adecuada la pérdida máxima y si en casos como una pandemia mundial, continúa siendo una buena medida de riesgo.

3.3 Aplicación del *VaR*

La aplicación de este trabajo consistirá en medir el riesgo de mercado, específicamente el riesgo cambiario, al que se está expuesto en la paridad USD/MXN mediante la aplicación del *VaR* mediante las metodologías de simulación histórica y Monte Carlo.

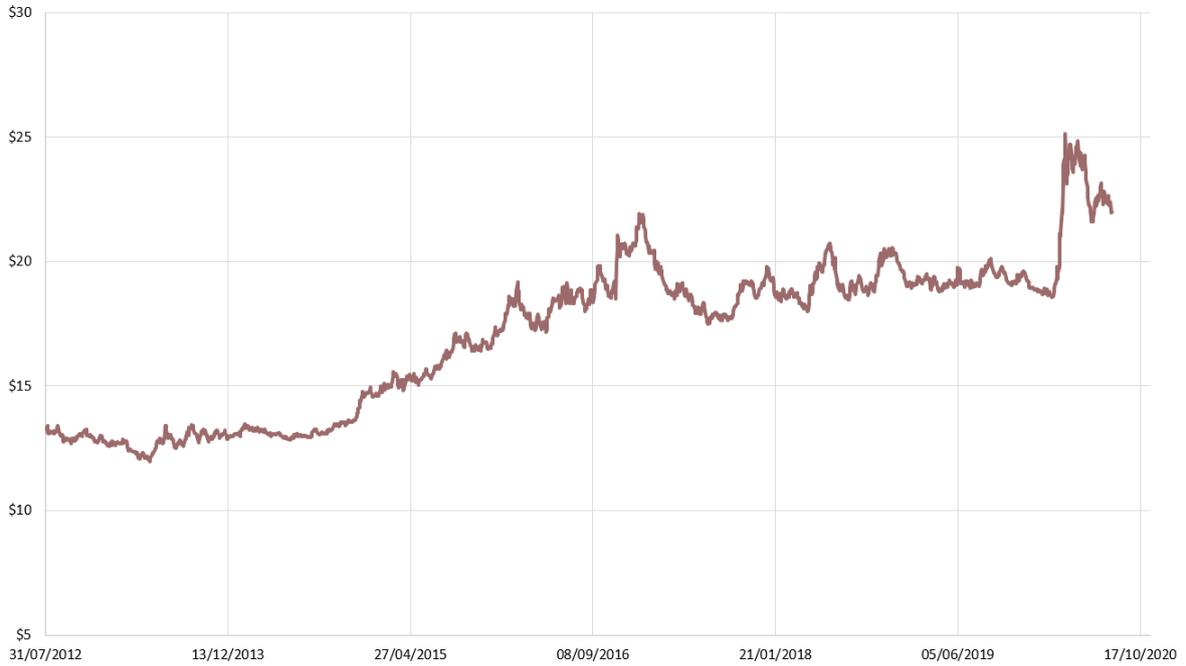
Para comenzar con esta aplicación se obtuvo la información histórica de la divisa USD/MXN mediante el tipo de cambio FIX que es publicado y determinado por el Banco de México (BANXICO) con base al promedio de cotizaciones del mercado cambiario.

La información obtenida abarcó desde el 31 de agosto de 2012 hasta el 31 de julio de 2020 obteniendo así una historia del precio de la divisa de ocho años.

La siguiente gráfica muestra que la paridad ha presentado fluctuaciones importantes a lo largo del tiempo reflejando un cambio de piso en 2015 y alcanzando su máximo

histórico en marzo 2020 como consecuencia de la pandemia mundial originada por el COVID-19.

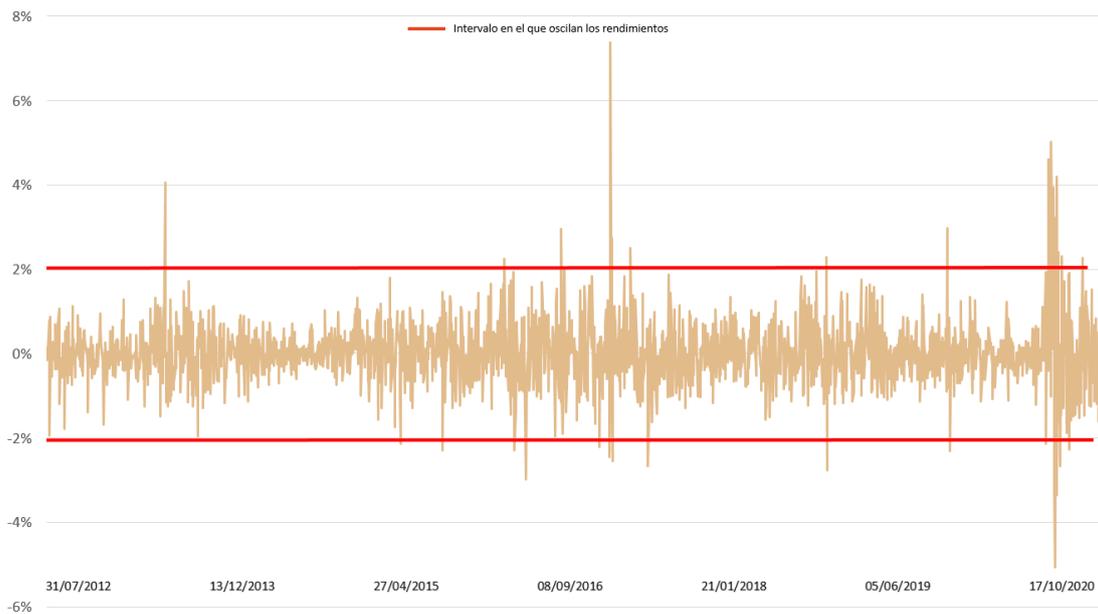
Gráfica 7. Tendencia histórica de la paridad USD/MXN de 2012 a 2020



Fuente: Elaboración propia con información obtenida de Banco de México

El siguiente paso consistió en el cálculo de los rendimientos de manera logarítmica para cada uno de los datos históricos dando como resultado la siguiente gráfica:

Gráfica 8. Rendimientos logarítmicos de la paridad USD/MXN de 2012 a 2020



Fuente: Elaboración propia con información obtenida de Banco de México

La gráfica muestra que los rendimientos de la paridad oscilan en un intervalo de -2 a 2%, alcanzando su máximo y mínimo histórico en las siguientes fechas:

Tabla 8. Rendimientos máximo y mínimo de la paridad USD/MXN de 2012 a 2020

Rendimiento histórico	Valor	Fecha
Máximo	7%	11/11/2016
Mínimo	-5%	30/03/2020

Fuente: Elaboración propia

Como indica la tabla anterior, el rendimiento más bajo alcanzado por la paridad durante estos ocho años de historia es de -5% y fue alcanzado justamente en los periodos donde el tipo de cambio presento mayor incertidumbre debido a los cambios que se presentaron en la economía mundial como consecuencia de la pandemia por COVID-19.

Por último, es importante mencionar que la información obtenida sobre el rendimiento de la paridad refleja que la distribución de los rendimientos no es simétrica pudiendo así concluir que no se trata de una distribución normal, por lo que el método paramétrico no será estudiado en este trabajo.

3.3.1 VaR simulación histórica

Siguiendo con la información obtenida mediante los datos históricos y la metodología descrita en el capítulo 2 para el cálculo del VaR mediante simulación histórica se obtuvo una simulación del último precio registrado correspondiente al 31 de agosto de 2020 en función del rendimiento obtenido en cada fecha, permitiendo así tener la pérdida o ganancia.

Tabla 9. Cálculo de pérdidas y ganancias para la paridad USD/MXN

FECHA	USD/MXN	RENDIMIENTO	SIMULACIÓN	P&L
31/07/2012	13.28			
01/08/2012	13.26	-0.15%	21.9587	0.03197
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
30/07/2020	21.96	-0.30%	21.9247	0.0660
31/07/2020	21.99	0.13%	22.0199	-0.0292

Fuente: Elaboración propia

Es importante tener en cuenta que el cálculo llevado a cabo para obtener las pérdidas y ganancias es que los signos negativos indican ganancias pues estas fueron calculadas como la diferencia entre el último precio de la paridad y la simulación del periodo correspondiente.

Tomando en cuenta lo anterior tenemos que la primera simulación de la paridad refleja una pérdida de 0.032, mientras que para la siguiente simulación se presenta una ganancia de 0.031. Una vez obtenida la información correspondiente a las pérdidas y ganancias también se observa lo siguiente:

Tabla 10. Ganancia y pérdida máximas de la paridad USD/MXN

Ganancia máxima	1.6212
Pérdida máxima	1.1118

Fuente: Elaboración propia

Esta tabla muestra que la ganancia máxima obtenida por la inversión de un dólar es de 1.62 pesos mientras que la pérdida máxima es de 1.11 pesos.

Otro valor obtenido de la información anterior es la media o promedio de las pérdidas y ganancias que resulto ser igual a -0.0055, esto indica que en promedio por un dólar invertido se espera una ganancia de ese valor.

Pasando ya al cálculo del *VaR* se establecen diferentes niveles de confianza, 95, 97.5 y 99% para esta metodología. Con estos valores, tomando en cuenta un horizonte temporal diario y utilizando el cálculo del percentil, se tienen los siguientes valores para el Valor en Riesgo:

Tabla 11. *VaR* simulación histórica de la paridad USD/MXN

Nivel de confianza	<i>VaR</i>
95%	0.2372
97.5%	0.2834
99.9%	0.4100

Fuente: Elaboración propia

Como se mencionó en la descripción de las metodologías para el cálculo del *VaR* entre mayor sea el nivel de confianza establecido mayor será el nivel del Valor en Riesgo, en este caso como ejemplo para la paridad USD/MXN si se establece un nivel de confianza

del 95% el *VaR* es igual a 0.2372 en otras palabras, la pérdida máxima esperada en un día es de 0.2372 con 95% de probabilidad.

3.3.2 *VaR* simulación Montecarlo

Para la simulación Montecarlo el primer paso, al igual que en la simulación histórica fue obtener los rendimientos logarítmicos de la paridad, lo que permitió conocer la media y la desviación de estos, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 12. Media y desviación estándar de los rendimientos de la paridad USD/MXN

Media	0.00025
Desviación estándar	0.00757

Fuente: Elaboración propia

En función de estos valores se obtuvo una simulación de los rendimientos históricos usando el supuesto de normalidad, generando así rendimientos simulados, permitiendo obtener la primera simulación del *VaR* para cada uno de los niveles de confianza utilizados en la simulación histórica.

De manera separada para cada uno de los niveles de confianza, se realizaron 100,000 simulaciones de los rendimientos históricos, lo que permitió obtener el mismo número de simulaciones para el Valor en Riesgo. Para los siguientes gráficos se utilizará como punto de referencia el nivel de confianza del 95%, únicamente como ilustración de los procedimientos realizados.

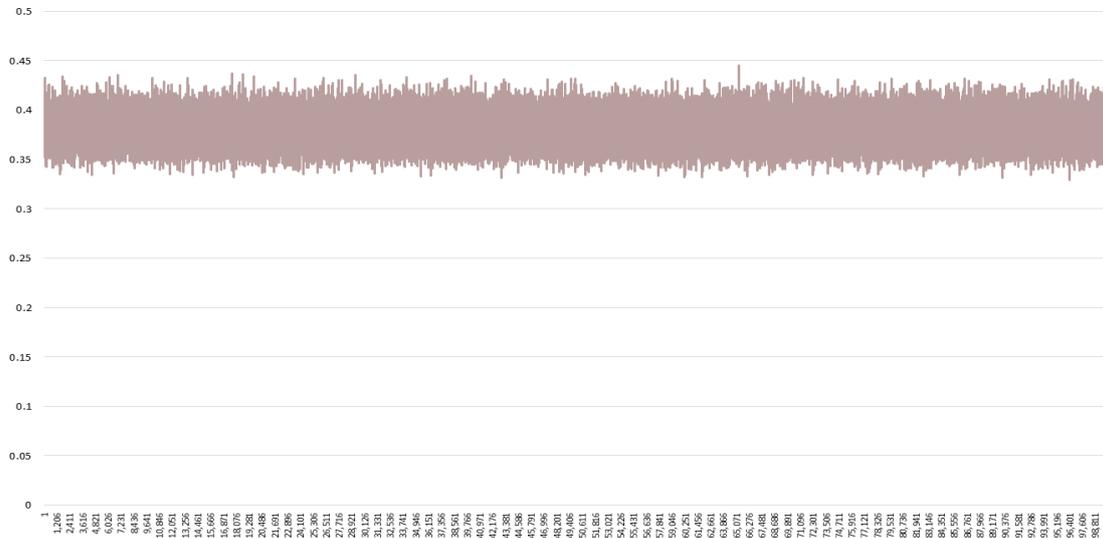
Tabla 13. Escenarios de la simulación Montecarlo para la paridad USD/MXN para un nivel de confianza del 95%

ESCENARIO	<i>VaR</i>
1	0.368337
2	0.383008
3	0.384313
⋮	⋮
99,998	0.397615
99,999	0.373417
100,000	0.380848

Fuente: Elaboración propia

Los valores obtenidos por las simulaciones pueden observarse gráficamente de la siguiente manera:

Gráfica 9. Escenarios simulación Montecarlo para el VaR



Fuente: Elaboración propia con información obtenida de Banco de México

Como se observa en la gráfica el Valor en Riesgo está oscilando en un intervalo de 0.3 a 0.45 por cada USD/MXN. Por otro lado, para los tres niveles de confianza, dentro de los 100,000 escenarios se tiene la siguiente información:

Tabla 14. Máximo y mínimo escenario en simulación la Montecarlo

	95%	97.5%	99%
Mínimo	0.3293	0.2796	0.3222
Máximo	0.4451	0.3615	0.4653

Fuente: Elaboración propia

La tabla anterior muestra el valor mínimo alcanzado por las 100,000 simulaciones del VaR al 95% de confianza es 0.3293, es decir que la pérdida más pequeña que se registra en las simulaciones tiene este valor, mientras que la pérdida máxima dentro de estos escenarios tiene el valor de 0.4451.

En función de estos escenarios y mediante un promedio de los mismos se obtuvo la cifra final del VaR mediante simulación Montecarlo.

Tabla 15. VaR simulación Montecarlo

Nivel de confianza	VaR
95%	0.2680
97.5%	0.3201
99.9%	0.3802

Fuente: Elaboración propia

El *VaR* por Simulación Montecarlo es mayor al obtenido por la simulación histórica para dos niveles de confianza, como se observa en la siguiente tabla. Esto se debe a la gran cantidad de escenarios contemplados en la segunda, que busca cubrir situaciones que en la historia no se hayan presentado.

Tabla 16. VaR por simulación histórica y Montecarlo para la paridad USD/MXN para diferentes niveles de confianza

Nivel de confianza	95%	97.5%	99%
VaR simulación histórica	0.2372	0.2834	0.4100
VaR simulación Montecarlo	0.2680	0.3201	0.3802

Fuente: Elaboración propia

3.3.3 Backtesting

Ya se mencionó que una de las pruebas que más se utilizan en la práctica para comprobar que los valores obtenidos por el *VaR* sean coherentes, es el backtesting. Esta prueba busca obtener el número de observaciones que sobrepasan el valor en riesgo.

Para esta prueba no se utilizaron todas las observaciones históricas, esto con el objetivo de poder usar los intervalos ya construidos a través de las propuestas de Kupiec.

Dicho lo anterior se tiene que para la aplicación de esta prueba se usaron las 1,000 últimas observaciones históricas abarcando desde agosto 2018 hasta julio 2020. Los niveles de confianza utilizados fueron tres, y el primer paso consistió en calcular los *VaR*

correspondientes a las 1,000 observaciones mediante ambas metodologías, la histórica y simulación Montecarlo, dando los siguientes resultados:

Tabla 17. VaR para 1,000 observaciones

Nivel de confianza	95%	97.5%	99%
VaR simulación histórica	0.2492	0.3210	0.4849
VaR simulación Montecarlo	0.2676	0.3194	0.3785

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidos los valores en riesgo correspondientes a cada nivel de confianza se hizo el ejercicio de identificar aquellas observaciones dentro de las 1,000 que quedan por arriba del *VaR*, dando lugar a una tabla como la siguiente, siendo el 1 el indicador de que esa observación fue mayor que el Valor en Riesgo.

Tabla 18. Ejemplo de excepciones al VaR

OBSERVACIÓN	EXCEPCIÓN 95%	EXCEPCIÓN 97.5%	EXCEPCIÓN 99%
1	0	0	0
2	1	1	0
3	0	0	0
998	1	1	0
999	0	0	0
1,000	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

Una vez identificadas las excepciones se realiza una suma para obtener el total de ellas.

Tabla 19. Número total de excepciones al VaR

	Nivel de confianza		
	95%	97.5%	99%
Simulación histórica	50	25	10
Simulación Montecarlo	38	27	13

Fuente: Elaboración propia

Retomando las tablas de Kupiec para 1000 observaciones y comparando con el número de excepciones obtenidas se tiene que, para todos los niveles y ambas metodologías, el *VaR* cumple con las pruebas de hipótesis establecidas por Kupiec.

Tabla 20. Comparativo del número de excepciones con los intervalos de Kupiec

Nivel de confianza	# De excepciones		Intervalos Kupiec
	Simulación histórica	Simulación Montecarlo	
95%	50	38	$37 < N < 65$
97.5%	25	27	$15 < N < 36$
99%	10	13	$4 < N < 17$

Fuente: Elaboración propia

3.3.4 *VaR* 90 días. Fronteras superior e inferior

Otra forma de observar si el *VaR* está ayudando a estimar de manera óptima la pérdida máxima probable es mediante la creación de fronteras formadas por el *VaR* superior y el *VaR* inferior, siendo el superior el que se ha descrito a lo largo de este trabajo un percentil a un nivel de confianza c , mientras que el segundo es definido como el percentil a un nivel de confianza $1 - c$.

Para la construcción de estas fronteras se tomó un nivel de confianza del 95% y se inició con el mismo procedimiento utilizado para el Valor en Riesgo por simulación histórica, obteniendo los rendimientos, la reevaluación y las pérdidas y ganancias diarias.

El siguiente paso consistió en obtener el *VaR* de la misma manera que para la simulación histórica, pero con las primeras 90 observaciones, es decir, los primeros noventa días

desde el primer dato registrado, el segundo Valor en Riesgo se obtuvo de las noventa observaciones desde el segundo dato registrado, el siguiente a partir de los 90 días desde el tercer dato y así sucesivamente hasta llegar a las últimas noventa observaciones. Este procedimiento dio como resultado un total de 1921 Valores en Riesgo tanto superiores como inferiores.

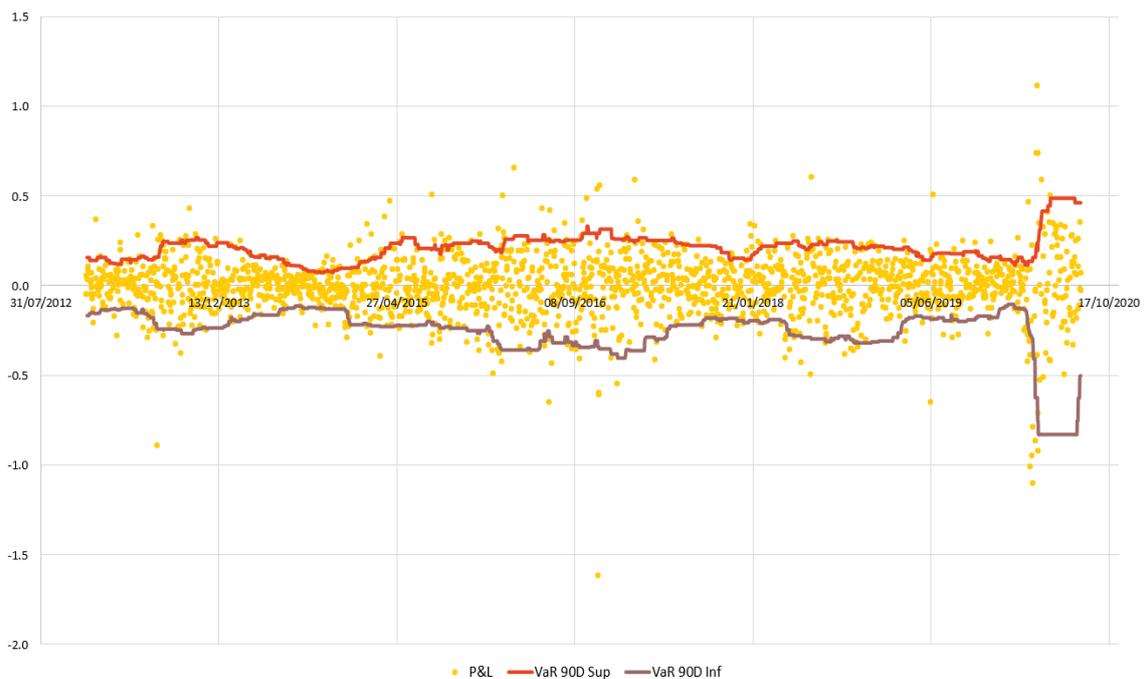
Tabla 21. Construcción de fronteras mediante VaR superior e inferior

FECHA	USD/MXN	P&L	VaR Inf	VaR Sup
06/12/2012	12.96	-0.045	0.157	-0.168
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
30/07/2020	21.96	0.066	0.460	-0.504
31/07/2020	21.99	-0.029	0.460	-0.504

Fuente: Elaboración propia

Los valores obtenidos como VaR superior e inferior permiten construir dos fronteras que delimitarán las pérdidas y ganancias resultado de la paridad USD/MXN. Estas fronteras se observan de la siguiente manera:

Gráfica 10. Frontera superior e inferior VaR 90 días



Fuente: Elaboración propia con información obtenida de Banco de México

La gráfica anterior muestra las fronteras que delimitan las pérdidas y ganancias representadas por el color amarillo y como se pueden observar, si bien hay pérdidas y ganancias que se salen de las fronteras, la mayoría de estas se encuentran dentro de los bordes definidos.

Las pérdidas y ganancias que se salen de los límites definidos pueden relacionarse con las excepciones observadas en el ejercicio de backtesting que terminó por señalar que, si bien hay ciertos valores que quedan por encima de la pérdida máxima señalada por el *VaR*, estas no representan una cantidad significativa que señale alguna deficiencia en la metodología.

3.3.5 *VaR* condicional

Por último, otra de las metodologías mencionadas en este trabajo y que es considerada como una de las importantes es el *T – VaR* o *VaR* condicional que, como ya se mencionó, da a conocer una pérdida promedio esperada una vez que el Valor en Riesgo es superado.

Para la aplicación de este método se siguieron los mismos pasos descritos en el cálculo del *VaR* por simulación histórica con el mismo horizonte de tiempo y los mismos niveles de confianza. Una vez obtenidos se utilizó una indicadora para señalar aquellas pérdidas que se encontraban por encima del *VaR*. Dando como resultado una tabla como la siguiente. Es importante mencionar, como se hizo al inicio de este capítulo, que en las pérdidas y ganancias (P&G) por la construcción, los valores negativos indican ganancia mientras que los positivos pérdida.

Tabla 22. Pérdidas que superan el *VaR*

		Observaciones que superan el <i>VaR</i>		
Fecha	P&G	95%	97.5%	99%
01/08/2012	0.03197	0	0	0
02/08/2012	-0.0313	0	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
29/07/2020	0.3533	1	1	0
30/07/2020	0.0660	0	0	0
31/07/2020	-0.0292	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidas estas excepciones, el siguiente paso consistió en hacer el cálculo del promedio de las pérdidas que se encontraron superan el Valor en Riesgo correspondiente a cada nivel de confianza, dando los siguientes resultados:

Tabla 23. VaR condicional para diferentes niveles de confianza

Nivel de confianza	<i>T – VaR</i>
95%	0.3407
99%	0.4217
99.9%	0.5555

Fuente: Elaboración propia

Los resultados mostrados indican que, como ejemplo, para un nivel de confianza del 95% la pérdida promedio que se espera tener en las ocasiones en las que el *VaR* sea superado es de 0.3407.

Como se describió a lo largo de este apartado, la aplicación consistió en llevar a cabo las diferentes metodologías del *VaR* mencionadas en los apartados anteriores para tres diferentes niveles de confianza, 95, 97.5 y 99%. A continuación, se muestra una tabla resumen de los valores obtenidos.

Tabla 24. Resumen de los resultados de la aplicación

Nivel de confianza	<i>VaR</i> simulación histórica	<i>VaR</i> simulación Montecarlo	<i>T – VaR</i>
95%	0.2372	0.2680	0.3407
97.5%	0.2834	0.3201	0.4217
99%	0.4100	0.3802	0.5555

Fuente: Elaboración propia

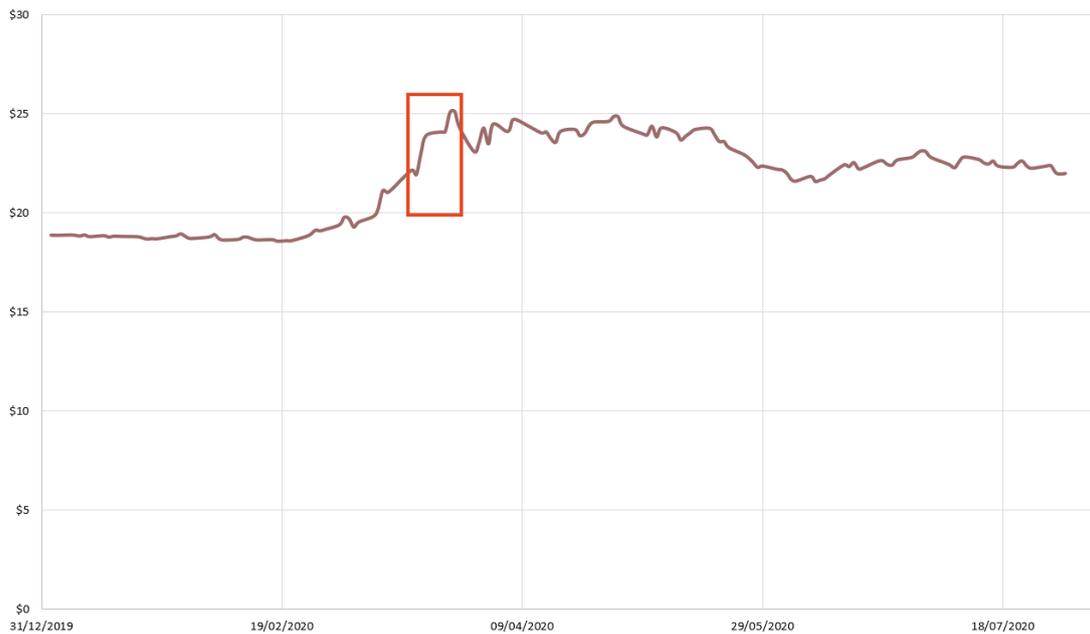
3.3.6 Escenarios de estrés

Como se mencionó en el capítulo 2 una de las metodologías más utilizadas a la hora de verificar la eficiencia del *VaR* son las pruebas de estrés o escenarios de estrés que buscan medir la incidencia que puedan tener determinadas situaciones extremas en los mercados, esto a raíz de la hipótesis de la que parte el Valor en Riesgo que considera condiciones normales de mercado.

La situación descrita al inicio de este capítulo puede ser tomada como un escenario de estrés, ya que fue considerada como un evento no esperado que generó grandes impactos en la economía mundial, incluyendo variaciones nunca antes vistas en la paridad USD/MXN.

Esta situación será utilizada para hacer un comparativo entre el Valor en Riesgo arrojado por las diferentes metodologías aplicadas y la pérdida real experimentada en los días más críticos de esta situación respecto a la última observación de la que se tiene información, que corresponde al 31 de julio de 2020.

Gráfica 11. Tendencia del precio de la paridad USD/MXN del 01 de enero al 31 de julio de 2020



Fuente: Elaboración propia con información obtenida de Banco de México

Como se observa en la gráfica anterior las variaciones más críticas en el precio de la paridad se dieron en el mes de marzo, más específicamente del 23 al 30 de marzo.

La pérdida y ganancia experimentada en esos periodos se obtuvo aplicando la misma metodología que en la simulación histórica y Montecarlo, usando como punto de aplicación la última observación donde el precio de la paridad es igual \$21.99.

Para las fechas ya mencionadas se tiene la siguiente información y para fines de un mejor entendimiento se colocaron las pérdidas como valores negativos y las ganancias como positivos.

Tabla 25. Pérdidas y ganancias experimentadas durante los momentos más críticos de la pandemia

Fecha	USD/MXN	Rendimiento	Reevaluación	P&L
20/03/2020	23.90	3.59%	22.781	0.7901
23/03/2020	24.09	0.78%	22.161	0.1705
24/03/2020	24.11	0.10%	22.013	0.0224
25/03/2020	25.08	3.93%	22.855	0.8646
26/03/2020	25.12	0.16%	22.026	0.0353
27/03/2020	24.29	-3.33%	21.257	-0.7332
30/03/2020	23.10	-5.06%	20.879	-1.1118
31/03/2020	23.51	1.78%	22.383	0.3918
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
31/07/2020	21.99	0.13%	22.020	0.0290

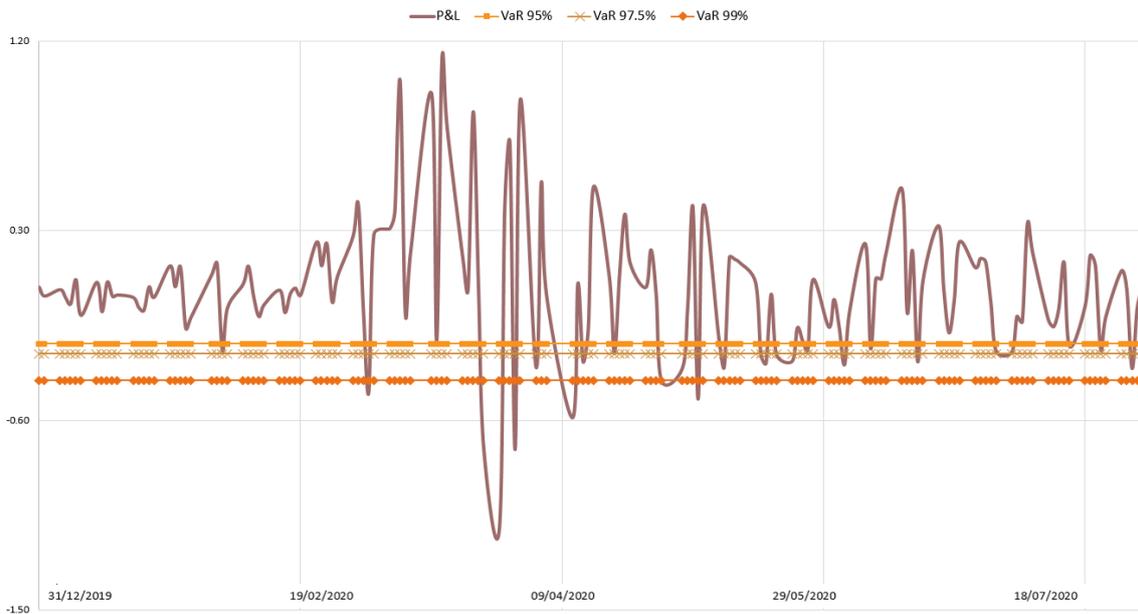
Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla anterior las pérdidas experimentadas el 27 y 30 de marzo fueron bastante altas, de hecho, para toda la información considerada en la aplicación de estas metodologías desde 2012, el 30 de marzo se experimentó la pérdida más grande de la historia.

Retomando la tabla resumen de los valores obtenidos para diferentes niveles de confianza del VaR se observa que la pérdida del 30 de marzo queda por encima de cualquier valor arrojado por todas las metodologías aplicadas incluyendo el $T - VaR$. Por otro lado, la pérdida experimentada el 27 de marzo queda cubierta únicamente por el VaR condicional con 99% de confianza.

Para observar esto de mejor manera, como ejemplo se tiene la siguiente grafica que muestra el comportamiento de las pérdidas y ganancias experimentadas desde principios del 2020 y los Valores en Riesgo por simulación histórica correspondientes a cada nivel de confianza.

Gráfica 12. Pérdidas y ganancias experimentadas desde inicios del año 2020 y VaR simulación histórica

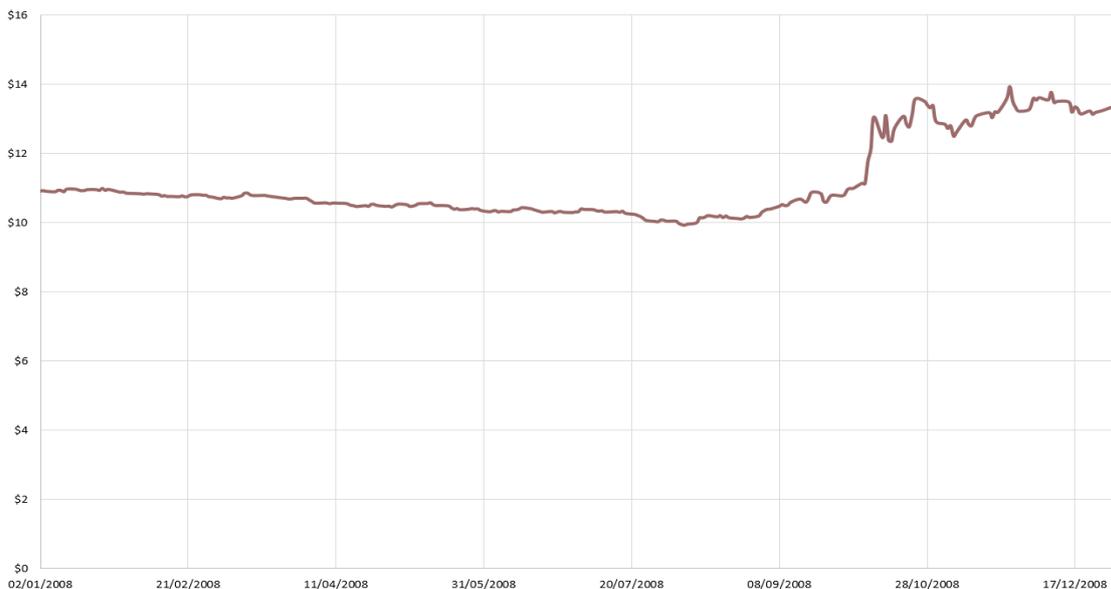


Fuente: Elaboración propia con información obtenida de Banco de México

De manera gráfica es sencillo observar las pérdidas que sobrepasan todos los niveles del *VaR* en relación al total de observaciones.

Otro escenario de estrés que tuvo fuertes impactos en la economía mundial fue la crisis del 2008 que tiene su origen en el colapso de las hipotecas subprime de EE.UU. La información correspondiente a este periodo no fue contemplada para la aplicación de las metodologías, sin embargo será utilizada como escenario de estrés.

Gráfica 13. Tendencia del precio del USD/MXN durante el año 2008



Fuente: Elaboración propia con información obtenida de Banco de México

Es evidente que a mediados de octubre se experimentó una de las variaciones más importantes a causa de la crisis económica de hecho es el 15 de octubre cuando se da la pérdida más grande de ese año.

Estas son algunas de las pérdidas y ganancias experimentadas durante esas fechas:

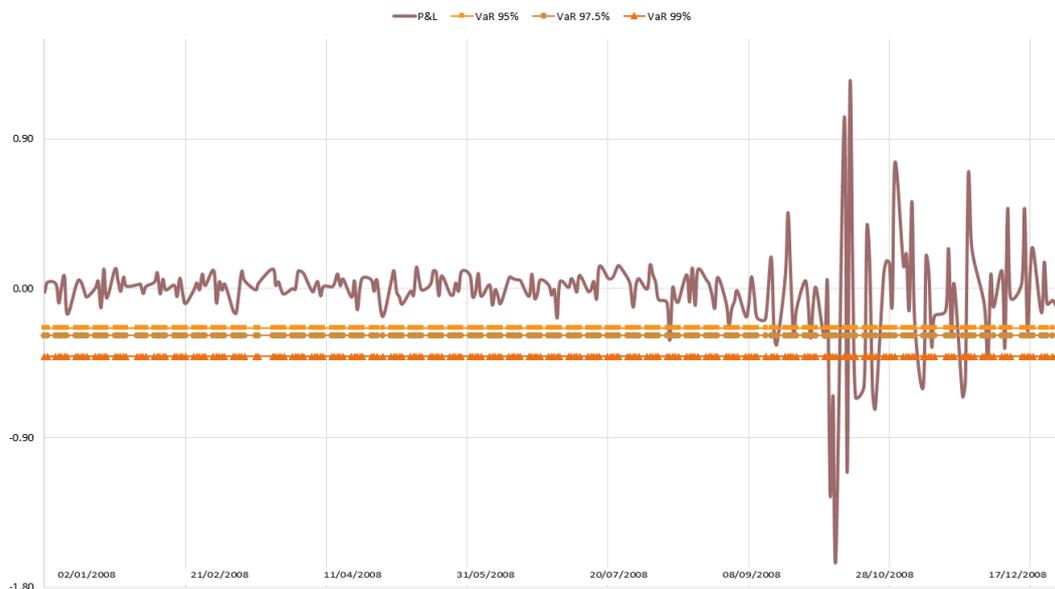
Tabla 26. Pérdidas y ganancias experimentadas durante los momentos más críticos de la crisis de 2008

Fecha	USD/MXN	Rendimiento	Reevaluación	P&L
13/10/2008	12.44	-4.70%	20.96	-1.0329
14/10/2008	13.09	5.04%	23.10	1.1086
15/10/2008	12.37	-5.60%	20.76	-1.2309
16/10/2008	12.35	-0.24%	21.94	-0.0521
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
31/07/2020	21.99			

Fuente: Elaboración propia

Al igual que en la pandemia, las pérdidas más grandes experimentadas en estas fechas no quedan cubiertas por el VaR en ninguna de las metodologías aplicadas. Como ejemplo, de manera gráfica se tiene lo siguiente:

Gráfica 14. Pérdidas y ganancias experimentadas en el año 2008 y el VaR simulación histórica



Fuente: Elaboración propia con información obtenida de Banco de México

Se observa que los escenarios de estrés utilizados son diferentes, pues en este último las variaciones en las pérdidas y ganancias presentadas en la paridad USD/MXN fueron muy volátiles en las últimas fechas, sin embargo, al igual que en el escenario anterior, hay pérdidas que sobrepasan el *VaR* para todos los niveles de confianza.

Capítulo 4. Conclusiones

El objetivo fundamental de esta tesis era identificar las fortalezas y debilidades de las empleadas por el *VaR* en la medición del riesgo de mercado principalmente en aquellos escenarios donde los supuestos desde los que parte no se ajustan del todo.

De esta manera, la aportación principal de este trabajo consiste en la aplicación de diferentes metodologías del *VaR* como lo es la simulación histórica, simulación Montecarlo, Valor en Riesgo condicional y backtesting a la paridad USD/MXN, cuyos resultados se compararon con las pérdidas más altas experimentadas en escenarios de estrés como lo fue la crisis económica del 2008 y la reciente pandemia ocasionada por el COVID-19 que afectó la economía mundial.

Como resultado de la investigación realizada acerca del impacto que tuvo la pandemia en la economía mundial se pudo observar y confirmar la gran volatilidad que se presenta en los mercados financieros, que, si bien es cierto que por la naturaleza del mercado no se puede esperar un comportamiento estable, también es evidente que cuando las condiciones externas que tienen un impacto en los mismos no siguen un patrón definido o esperado, esta volatilidad se presenta de manera más pronunciada.

En el caso de la pandemia que en México inició a finales de febrero de 2020, factores como el aislamiento, el cierre de pequeñas y grandes empresas, así como la incertidumbre acerca de lo que podía pasar con la economía mundial fueron determinantes en las variaciones que se presentaron en la paridad USD/MXN principalmente en los últimos días del mes de marzo y este mismo comportamiento se vio reflejado en el *VaR* reportado durante estos días. Este comportamiento pudo comprobarse en la construcción de la gráfica 10 de las fronteras superiores e inferiores del Valor en Riesgo, donde el cambio de piso experimentado por dichos valores es notorio. De esta manera se puede concluir que el *VaR* también se ve afectado por las volatilidades presentes en los mercados financieros buscando recoger las pérdidas experimentadas durante esos días.

Las ya mencionadas aplicaciones permitieron reforzar la definición del *VaR* como la pérdida máxima esperada a un horizonte de tiempo definido con un cierto nivel de confianza, este último parámetro se ve reflejado en la diferencia de los valores arrojados para cada nivel utilizado donde, como se esperaba, mientras mayor sea el nivel de confianza, mayor será la pérdida que se espera experimentar, esto permite concluir que el nivel de confianza utilizado deberá ser elegido en función de la cantidad de riesgo que se desee asumir independientemente de la metodología utilizada.

En relación a las diferencias observadas para las principales metodologías aplicadas, que fueron la simulación histórica y simulación Montecarlo, por un lado se observó que

el Valor en Riesgo arrojado por la segunda metodología es mayor que el obtenido por la simulación histórica, esto se ve relacionado con el número de escenarios contemplados para las pérdidas y ganancias, sin embargo esto no es necesariamente un hecho establecido porque depende completamente de la aleatoriedad de la misma simulación, como lo demuestra el valor obtenido para el nivel de confianza del 99%.

Por otro lado, el backtesting que es utilizado como método de evaluación de la eficiencia del *VaR*, mostró que el número de excepciones al Valor en Riesgo para ambas metodologías se encuentran dentro de un rango aceptable para cada nivel de confianza definido es decir que, de acuerdo con la prueba de Backtesting, los resultados arrojados por el Valor en Riesgo son una buena estimación de la pérdida máxima en la que se puede incurrir para la paridad USD/MXN, esto para ambas metodologías. La única diferencia observada entre los resultados se dio en el nivel de confianza del 95%, donde el número de excepciones al *VaR* para la simulación Montecarlo está muy por debajo de las excepciones a la simulación histórica, lo que podría señalar una fortaleza de una metodología sobre la otra, sin embargo, este comportamiento no se repitió para los otros dos niveles de confianza, de hecho, el número de excepciones fue muy similar para ambas metodologías.

Dicho lo anterior y analizando las diferencias observadas entre la simulación Montecarlo y simulación histórica, se llegó a la conclusión de no se puede asegurar que una metodología es mejor que la otra, ya que, si bien parten desde procedimientos diferentes, ambas cumplen su propósito que es el señalar pérdida máxima esperada. La única diferencia que se considera es importante tener en cuenta, principalmente a la hora de elegir aquella metodología que se llevará a cabo a la aplicación es la manera en que ambas recogen la volatilidad.

Por un lado, la simulación histórica como su nombre lo indica se basa en la historia de los valores que haya tenido el activo, instrumento o portafolio al que se esté aplicando para obtener las pérdidas y ganancias esperadas a un determinado momento en el tiempo, esto va a permitir reflejar el riesgo inmediato a la hora de calcular el *VaR*. Por ejemplo, en el caso de la paridad con la que se trabajó, si la información histórica muestra que en el último mes del que se tiene información el precio del USD/MXN va en aumento, el riesgo de que esto continúe pasando se verá reflejado en el Valor en Riesgo. Sin embargo, ahí mismo entra una de las debilidades y es que es poco eficiente que la metodología sea aplicada con una gran cantidad de información histórica, ya que se volvería un procedimiento que implicará grandes costos de diferente tipo, por lo que al no contemplar toda la historia se están dejando fuera muchos comportamientos que pudieran volver a presentarse en un futuro. Retomando el ejemplo, para la aplicación de este trabajo la información utilizada abarcó del 2012 al 2020, dejando de lado las

grandes variaciones que se presentaron en la crisis económica del 2008 y esto es algo que se debe tener en consideración a la hora de elegir esta metodología.

En cuanto a la simulación Montecarlo se observa una ventaja respecto a la metodología anterior, ya que su aplicación permite ampliar la gama de escenarios, por lo que podría considerarse como un mejor acercamiento a la máxima pérdida probable, sin embargo, las simulaciones realizadas parten, al igual que la metodología anterior, de información histórica, por lo que para poder reflejar escenarios que queden fuera de esta información sería necesario realizar una gran cantidad de simulaciones, mayores a las utilizadas en este trabajo y esto implicaría, nuevamente, grandes costos principalmente de tiempo, que se vuelve muy poco óptimo en los contextos en los que se suele aplicar estos procedimientos.

Dicho lo anterior, se puede concluir que la decisión de qué metodología será aplicada dependerá por completo de una perspectiva personal o de negocio y que debe tener en consideración las ventajas y desventajas de cada una de ellas y recordando que el *VaR* se trata de una probabilidad y que en este sentido el nivel de confianza seleccionado juega un papel muy importante.

Otra de las cosas que se considera se tiene que tener en cuenta a la hora de aplicar alguna de las metodologías del *VaR* son los supuestos de los que parte, principalmente el que su aplicación considera condiciones normales de mercado, supuesto que se rompe en el momento en que se presentan escenarios de estrés como los utilizados en la última aplicación de este trabajo que son considerados como situaciones que han marcado la economía de todos los países, generando grandes impactos en los mercados provocando, entre muchas otras cosas, fluctuaciones importantes en las variaciones de la paridad USD/MXN.

Para el primer escenario de estrés se utilizó la pandemia mundial por COVID. Mediante el ejercicio se observaron las pérdidas y ganancias que se experimentaron el 31 de agosto del 2020 de acuerdo con la información histórica, siendo los últimos días del mes de marzo los que presentaron una mayor volatilidad generando las pérdidas más grandes registradas para la información utilizada. Estas pérdidas quedaron por encima del *VaR* para ambas metodologías y para todos los niveles de confianza incluyendo el $T - VaR$.

En la gráfica 12 del tercer capítulo fue sencillo observar el comportamiento descrito anteriormente, volviéndose más evidentes aquellas pérdidas que no fueron cubiertas por el *VaR*, pero a través de la gráfica también se logró tener una visualización del número de pérdidas que sobrepasaron los Valores en Riesgo y dado que la información utilizada abarca los precios de la paridad durante dichos periodos, el backtesting recoge esas pérdidas, por lo que según los resultados obtenidos por esta metodología, aun

cuando el *VaR* no cubre el riesgo que representan esas pérdidas, sigue siendo un buen indicador de la máxima pérdida probable. Todo esto también está relacionado con lo ya mencionado respecto al uso de información histórica donde el riesgo inmediato reflejado en la historia será contemplado por el Valor en Riesgo.

El segundo escenario utilizado fue la crisis económica experimentada en 2008, donde la paridad USD/MXN se vio gravemente afectada provocando un cambio de piso en el precio de esta que se ha mantenido hasta la actualidad. A diferencia del primer escenario, es importante recalcar que la información de esta crisis no fue utilizada a la hora del cálculo del *VaR*, se utilizó únicamente como ejemplo de escenario de estrés para ver que tanto se ajusta el Valor en Riesgo cuando se presentan este tipo de condiciones en el mercado.

Los resultados arrojaron que, al igual que en el primer escenario, durante los días más volátiles y críticos de estos periodos el *VaR* no cubrió las pérdidas experimentadas, de hecho, este escenario presentó una mayor cantidad de variaciones en los precios de la paridad lo que generó pérdidas muy significativas durante varios días que no pudieron ser prevista por el Valor en Riesgo para ninguno de los niveles de confianza.

También es importante mencionar otra de las aplicaciones utilizadas que fue el $T - VaR$. Esta metodología permite obtener la pérdida promedio esperada una vez que el Valor en Riesgo es superado, sin embargo, los supuestos de los que parte son los mismos, lo que se vio reflejado en el comparativo con las pérdidas experimentadas en los escenarios de estrés, pues al partir del supuesto de condiciones normales de mercado no logra recoger esas pérdidas.

Todo lo mencionado anteriormente muestra que el *VaR* es una buena metodología para medir el riesgo de mercado, en este caso para una paridad del mercado de divisas, sin embargo, tiene ciertas limitaciones que deben ser consideradas y tomadas en cuenta a la hora de realizar su aplicación, una de ellas son las ya mencionadas para cada procedimiento relacionado con la forma en que recogen las volatilidades. Otra de sus limitaciones tiene que ver con los escenarios de estrés, pues el riesgo presente y el impacto que pueden generar en los mercados financieros no es tomado en cuenta por esta metodología de modo que no se ve reflejado en los valores obtenidos, por lo tanto, utilizarla como la única forma de medir el riesgo de mercado no reflejaría por completo el riesgo al que se está expuesto, lo que no podría ser considerado como una buena administración de riesgo.

Y fue justo la pandemia ocurrida en 2020 la que permitió remarcar la necesidad de una buena gestión de los riesgos financieros, pues hizo evidente que en el momento menos esperado se pueden presentar situaciones que generen impactos importantes en la economía de los países, por lo tanto, en los mercados financieros y aunque no pueden

ser previstas es necesario operar a través del conocimiento de que existen y pueden presentarse en cualquier momento.

Todas estas limitaciones dan paso a futuras líneas de investigación pues se relacionan con lo señalado con anterioridad por el Comité de Supervisión Bancaria de Basilea donde, a causa de las deficiencias observadas en la crisis del 2008 en toda la regulación utilizada para la medición de los riesgos financieros, a partir del 2009 se comenzaron a realizar reformas sobre el marco del riesgo de mercado lo que dio lugar a la revisión fundamental de la cartera de negociación o por sus siglas en inglés FRTB (Fundamental Review of the Trading Book) cuyas reformas fueron aprobadas y comenzaran su aplicación en el año 2022 y que, entre muchas otras cosas, propone el sustituir el VaR por el Expected Shortfall también conocido como $T - VaR$ así como un mayor énfasis en las pruebas de estrés.

Glosario

Activo: Títulos contables que otorgan al comprador el derecho a recibir un ingreso futuro que proviene del vendedor.

Aleatorio: Característica que se asocia a un evento o fenómeno que bajo las mismas condiciones iniciales presenta resultados diferentes, lo que impide predecir un resultado exacto en un momento determinado.

Amortización: Reintegración de un capital, generalmente un pasivo, mediante la distribución de pagos en el tiempo

Arbitraje: Estrategia financiera que consiste en aprovechar la diferencia de precio entre diferentes mercados sobre un mismo activo financiero para obtener un beneficio económico.

Beneficio: Ganancia o exceso de los ingresos sobre los gastos.

Covarianza: Medida estadística que señala la relación lineal que existe en dos variables.

Cualitativo: Características que no pueden ser medidas con valores numéricos y que se relacionan con cualidad, como el sexo, estado civil, profesión, etc.

Cuantitativo: Características numéricas como edad, peso, estatura, etc.

Desviación estándar: Medida estadística que indica cuanta dispersión hay en un conjunto de datos respecto a la media de los mismos.

Distribución de probabilidad: Función de una variable aleatoria que asigna una probabilidad a cada evento definido sobre la variable.

Ecuación diferencial: Ecuación matemática que relaciona una función con sus derivadas.

Esperanza condicional: Valor esperado de una variable aleatoria respecto a una distribución de probabilidad condicional.

Estimación: Proceso mediante el que se establece el valor que debe tener un parámetro según deducciones realizadas a partir de estadísticos.

Extrapolación: Proceso de estimar más allá del intervalo de observación original, el valor de una variable en base a su relación con otra variable.

Falacia: Argumento que parece valido, pero no lo es.

Liquidez: Capacidad que tiene una persona, una empresa o una entidad bancaria para hacer frente a sus obligaciones financieras.

Matriz: Conjunto de números ordenados en columnas y filas.

Movimiento geométrico Browniano: Proceso estocástico en tiempo continuo que resulta de una transformación de un proceso de Wiener estándar.

Muestra: Subconjunto de datos perteneciente a una población de datos.

Opción call: Opción de compra que da a su comprador el derecho a comprar un activo subyacente a un precio predeterminado en una fecha concreta.

Opción put: Opción de venta da a su poseedor el derecho a vender un activo a un precio predeterminado hasta una fecha concreta.

Pasivo: Compromisos o deudas adquiridas en un período determinado.

Parámetro: Variable que aparece en una ecuación cuyo valor se fija a voluntad.

Ponderación: Equilibrar o determinar el peso de datos estadísticos.

Portafolio de inversión: Determinada combinación de activos financieros en los cuales se invierte.

Probabilidad: Medida del grado de certidumbre de que dicho suceso pueda ocurrir. Se expresa con un número que va del 0 al 1, donde un suceso imposible tiene probabilidad cero y un suceso seguro tiene probabilidad uno.

Puntos básicos: Centésima parte de un punto porcentual (1 pb = 0.01 %).

Renta fija: Característica de los instrumentos financieros con bajo riesgo asociado y una rentabilidad que, aunque reducida en comparación a otro tipo de inversiones, es conocida de antemano.

Renta variable: Tipo de inversión en la que la recuperación del capital invertido y la rentabilidad de la inversión no están garantizadas debido a que la rentabilidad de la renta variable depende de distintos factores.

Solvencia: Al igual que la liquidez, es la capacidad que tiene una persona, una empresa o una entidad bancaria para hacer frente a sus obligaciones financieras, pero en este caso se trata de obligaciones a largo plazo.

TIR (Tasa interna de retorno): Media geométrica de los rendimientos futuros esperados de una inversión.

Variable: Característica o cualidad de un evento o suceso que está propensa a adquirir diferentes valores, mismos que pueden ser medidos.

Variable aleatoria: Función que asigna un valor, usualmente numérico, al resultado de un experimento aleatorio.

Varianza: Medida de dispersión que representa la variabilidad de una serie de datos respecto a su media.

Bibliografía

- ALEXANDER C. (1996): *"The handbook of Risk Management and Analysis"*, John Wiley & Sons.
- ALEXANDER C. (1997): *"Risk Management and Analysis Measuring and Modelling Financial Risk"*, John Wiley & Sons.
- ARAGONÉS J. y BLANCO C. (2000): *"Valor en Riesgo: Aplicación a la Gestión Empresarial"*, Pirámide.
- Banco Bilbao Vizcaya Argentaria (2016): *"Frente al riesgo se puede ser propenso o adverso"*, BBVA. Recuperado de: <https://www.bbva.com/es/frente-al-riesgo-se-puede-propenso-adverso/>
- Banco Bilbao Vizcaya Argentaria (2017): *"El mercado de divisas, qué es y cómo funciona"*, BBVA. Recuperado de: <https://www.bbva.com/es/mercado-divisas-que-es-como-funciona/>
- Banco Bilbao Vizcaya Argentaria (2018): *"El mercado de divisas y sus participantes"*, BBVA. Recuperado de: <https://www.bbva.com/es/mercado-divisas-y-sus-participantes/>
- Banco Bilbao Vizcaya Argentaria: *"Renta fija III: Gestión de Riesgos. Duración y convexidad"*, Aula Banca Privada
- Banco de México (2019): *"Resultados de la encuesta realizada por el Banco de Pagos Internacionales (BIS) sobre lo volúmenes de operación en los mercados cambiarios de derivados durante abril de 2019"*
- Bank for International Settlement (BIS): *"Recent innovations and international banking"* (1986)
- (1997) *"Principles for the Management of Interest Rate Risk"*
 - (1998) *"Operational risk management"*
 - (2008) *"Range of practices and issues in economic capital modelling"*
 - (2010) *"Basilea III: Marco regulador global para reforzar los bancos y sistemas bancarios"*
 - (2016) *"Requerimientos mínimos de capital por riesgo de Mercado"*
 - (2017) *"Resumen de las reformas de Basilea III"*
 - (2017) *"Preguntas frecuentes sobre requerimientos de capital por riesgo de mercado"*
 - (2019) *"El marco para el riesgo de mercado en pocas palabras"*
- BEST P. (1998): *"Implementing Value at Risk"*, John Wiley & Sons.

BETRELL K. (2020): “FOREX - Dólar sube por preocupaciones sobre coronavirus y aranceles”. Recuperado de:

<https://www.infobae.com/america/agencias/2020/06/24/forex-dolar-sube-por-preocupaciones-sobre-coronavirus-y-aranceles-2/>

CASTILLO N. (2011): “VaR: Análisis para inversiones en divisas (Tesis de grado)”, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2020): “COVI-19 tendrá graves efectos sobre la economía mundial e impactará a los países de América Latina y el Caribe”. Recuperado de: <https://www.cepal.org/es/comunicados/covid-19-tendra-graves-efectos-la-economia-mundial-impactara-paises-america-latina>

Comité del Mercado Cambiario Mexicano (2019): “Mercado Cambiario en México: Operación del peso mexicano y otras divisas a través de plataformas electrónicas”

DE LA LUZ L., SÁNCHEZ A. y ZURITA J. (2015): “La crisis financiera internacional de 2008 y algunos de sus efectos económicos sobre México”, Scielo. Retomado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-10422015000600128

DE LARA A. (2008): “Medición y control de riesgos financieros”, Limusa.

DENUIT M., DHAENE J., KAAS R. y GOOVAERTS M. (2005): “Actuarial Theory for Dependent Risk”, John Wiley & Sons.

DOWD K. (1998): “Beyond Value at Risk. The New Science of Risk Management”, John Wiley & Sons.

ELTON E. (1995): “Modern Portfolio Theory and Investment Analysis”, John Wiley & Sons.

FERIA J.M. (2005): “El riesgo de mercado, su Medición y Control”, Delta Publicaciones.

JORION P. (2003): “Financial Risk Management. Handbook”, John Wiley & Sons.

JORION P. (1995): “Predicting Volatility in the Foreign Exchange Market”, Journal Finance.

JORION P. (2001): “Value at risk; the New Benchmark for Controlling Derivatives Risk”, The McGraw-Hill Companies.

KHWAJA A. (2016): “The default risk charge”, Clarus Financial Technology. Recuperado de: <https://www.clarusft.com/frtb-the-default-risk-charge/>

KUPIEC P. (1995): “Techniques for Verifying the Accuracy of Risk Management Models”, The Journal of Derivatives

- MARKOWITZ H. (1959): *“Portfolio Selection: Efficient Diversification of Investments”*, John Wiley & Sons.
- MARSHALL C. y SIEGEL M. (1997): *“Value at Risk: Implementing a Risk Measurement Standard”*, The Journal of Derivatives.
- MASCAREÑAS J. (1999): *“Innovación Financiera. Aplicaciones a la Gestión Empresarial”*, The McGraw-Hill Companies.
- McNEIL A. (2005): *“Quantitative Risk Management: Concepts, Techniques and Tools”*, Princeton Series.
- MERTON H. Miller (1999): *“Los mercados de Derivados”*, Gestión 2000.
- NOVALES A. (2016): *“Valor Riesgo”*, Departamento de Economía Cuantitativa Universidad Complutense
- Organización Mundial de la Salud (2020): *“La COVID-19 podría aumentar el número de personas que viven en la pobreza extrema a más de 1.000 millones en 2030”*
- (2020) *“Las cuarentenas, clave para controlar el COVI19”*
- (2020) *“La inversión extranjera cae a la mitad por la pandemia”*
- (2020) *“Para responder a la pandemia no hay que elegir entre la salud y la economía: OMS”*