

Universidad de Buenos Aires

Facultad de Ciencias Económicas

Modelos de Volatilidad y Medidas de Riesgo sobre el Bitcoin

tesina de grado

Seminario de Integración y Aplicación | Profesor: Eduardo Melinsky

Alumno: Dylan Guelman

Registro: 885147

Tutor: Alejandro Sokol

**Índice**

[1 Introducción 3](#_Toc73964767)

[2 Alcance 4](#_Toc73964768)

[3 Criptomonedas 4](#_Toc73964769)

[3.1 Funcionamiento 5](#_Toc73964770)

[3.2 ¿Pueden considerarse las criptomonedas dinero? 6](#_Toc73964771)

[3.3 Actores principales 7](#_Toc73964772)

[4 Volatilidad 9](#_Toc73964773)

[4.1 Modelo EWMA (EXPONENTIALLY WEIGHTED MOVING AVERAGE) 10](#_Toc73964774)

[4.2 Modelo GARCH (1,1) (Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity) 11](#_Toc73964775)

[4.3 EGARCH(1,1) (*Exponential GARCH)* 12](#_Toc73964776)

[4.4 GJR-GARCH (1, 1) 13](#_Toc73964777)

[5 Medidas de Riesgo 13](#_Toc73964778)

[5.1 Valor a Riesgo (VaR) 13](#_Toc73964779)

[5.2 Expected Shortfall (ES) 14](#_Toc73964780)

[5.3 Construcción de Modelos 16](#_Toc73964781)

[6 Backtesting 17](#_Toc73964782)

[7 Aplicación de Mercado 19](#_Toc73964783)

[7.1 Data 19](#_Toc73964784)

[7.2 Modelos 20](#_Toc73964785)

[7.3 Medidas de Riesgo 22](#_Toc73964786)

[7.4 Backtesting 24](#_Toc73964787)

[8 Conclusión y Comentarios Finales 25](#_Toc73964788)

[9 Bibliografía 25](#_Toc73964789)

# Introducción

Una criptomoneda es un activo digital que puede utilizarse como medio de cambio y basa su seguridad en algoritmos criptográficos. La primera (y más famosa) de ellas es el Bitcoin.

El 31 de octubre de 2008 un documento circuló por primera vez en una lista de difusión de correos electrónicos de aficionados de la criptografía. El título del mismo era “Bitcoin P2P e-cash paper” y estaba firmado por un tal Satoshi Nakamoto, seudónimo de una persona (o grupo de personas) del cual aún se desconoce la identidad real.

Hoy en día son más de 7800 las criptomonedas que existen, con una capitalización de mercado de más de 1.300 mil millones de dólares. Cada whitepaper es un mundo independiente, donde su autor (o autores) define las características a voluntad.

Aunque aún no hay ningún país que haya aceptado a ninguna de ellas como “moneda de curso legal”, son aceptadas por muchos comercios alrededor del mundo y utilizadas para el envío de dinero entre personas, por lo tanto, a las monedas emitidas por los gobiernos que circulan alrededor del mundo, se han sumado ahora las privadas.

En la gestión integral de riesgos, se buscan medidas que puedan resumir en una sola cifra el riesgo de la cartera, y que puedan brindar la información necesaria para constituir un capital acorde para que la institución financiera pueda hacer frente a dicho riesgo. En este trabajo se tratan particularmente medidas de riesgo que puedan servir como herramientas para establecer un capital económico para hacer frente a un determinado tipo de riesgo. El *Valor a Riesgo (VaR)* y el *Expected Shortfall (ES)* son intentos de proporcionar un número único que resume el riesgo total en una cartera.

Se realizará un análisis de las medidas más tradicionales y luego una aplicación a la gestión del riesgo de mercado, utilizando datos de la criptomoneda Bitcoin sobre la cual se aplicarán las medidas en cuestión. Para ello, se contará con la ayuda de la herramienta informática Python.

El objetivo de la tesina será mostrar distintos modelos para estimar la volatilidad del Bitcoin para así mostrar diferentes metodologías a la hora de calcular las medidas de riesgo y luego testearlas, de forma tal de poder analizar si los modelos funcionan correctamente.

En la primera sección del presente trabajo se presenta una introducción a las criptomonedas, esto es, como y cuando surgieron, como funcionan y los agentes involucrados para su funcionamiento y si las criptomonedas pueden considerarse como dinero. En la segunda sección se detalla el alcance y las limitaciones del presente trabajo. En la tercera sección se presentan los distintos modelos para estimar la volatilidad, tales como el GARCH (1, 1), EGARCH (1, 1), GJR-GARCH (1, 1) y EWMA. En la cuarta sección se describen las medidas de riesgo *VaR* y *ES* y la construcción de los modelos a utilizar. En la quinta sección se describen las pruebas para testear las medidas de riesgo correspondientes. En la sexta sección, se ve una aplicación de mercado, detallándose la información que se utilizó, la parametrización y resultados de los modelos de volatilidad utilizados, las medidas de riesgo y el *backtesting* correspondiente. Finalmente, en la séptima sección se encuentran las conclusiones y comentarios finales sobre los resultados obtenidos.

# Alcance

Este trabajo toma en consideración a las criptomonedas como una mercancía (“commodities”) o instrumento financiero que se negocia en los mercados, independientemente de las cuestiones legales y/o regulatorias que pudieren corresponder por la naturaleza del instrumento o por las características de los distintos intermediarios participantes. Este trabajo no analiza la naturaleza intrínseca que justifique valor alguno de una criptomoneda, y está limitado a la aplicación de técnicas estadísticas de análisis de valores mobiliarios a los fines de contar con instrumentos que contribuyan al tratamiento del riesgo de mercado de éstos.

Como es de esperar, toda operación con criptomonedas implica una exposición a riesgo para los inversores. Dicha exposición surge de la conjunción de riesgos de diferente índole, tales como el riesgo de mercado, de crédito, operacional y estratégico, entre otros. El objetivo del presente trabajo es realizar un análisis del riesgo de mercado que puede acarrear una operación sobre la criptomoneda Bitcoin, entendiéndose como riesgo de mercado a las pérdidas que se puedan llegar a sufrir por cambios en el precio de mercado de la mencionada criptomoneda. Dado que el análisis se realiza de forma individual sobre este tipo de riesgo, no se analiza ni su correlación con otros tipos de riesgo ni el riesgo resultante de la conjunción de éste con los otros descriptos anteriormente. Para ello, se realizan diversos supuestos, como, por ejemplo, que las operaciones con Bitcoin no presentan riesgo de crédito para ninguna de las contrapartes, que no cabe la posibilidad de una pérdida por fraude o por errores operativos por parte de los intermediarios (o cualquier otro tipo de riesgo operacional), que no hay ningún tipo de regulación sobre los criptoactivos que pueda afectar y/o limitar su operatoria, etc.

Este trabajo no tiene como finalidad explicar cómo operar, ni recomendar operaciones, con el instrumento sino brindar una aplicación de metodologías de análisis del riesgo de mercado que trae aparejado el criptoactivo. Cada inversor debe realizar su propio análisis de los distintos riesgos a la hora de tomar una decisión al operar con este tipo de instrumentos.

# Criptomonedas

Una criptomoneda es un activo digital que puede utilizarse como medio de cambio y basa su seguridad en algoritmos criptográficos. La primera (y más famosa) de ellas es el Bitcoin, cuyo *whitepaper* fue difundido por primera vez el 31 de octubre del 2008, en pleno auge de la crisis denominada “*Subprime*”. Pero esta no es la única, y fue de hecho el puntapié inicial para una ola de cripto activos que le sucedieron, cada uno con su propio *whitepaper* que determina sus características como la cantidad a emitir, los elementos que determinarán su cotización o el sistema de gobernabilidad.

Otro elemento distintivo de estos activos es su “descentralización”, es decir, basar su funcionamiento en nodos distribuidos por todo el mundo que aportan la capacidad de sus equipos informáticos para garantizar el funcionamiento y la transparencia de la tecnología que sostiene a las criptomonedas.

Por último, es importante destacar la transparencia que garantiza la tecnología Blockchain, donde todas las transacciones entre agentes que se generen quedan registradas en un bloque de información que se suscribe a la cadena ya existente y queda guardada una copia para cada nodo que participe de la misma, a su vez garantizando la privacidad de cada usuario por mostrar únicamente la dirección de la billetera virtual del usuario. De esta manera, no se puede alterar (fácilmente al menos) el registro de transacciones y falsificarlas, se necesitaría engañar a toda la red de nodos.

Y ahora ya no son únicamente entes privados quienes han lanzado criptomonedas: para eludir el bloqueo comercial, Venezuela lanzó en febrero de 2018 el Petro, aunque con magros resultados y uso por parte de sus ciudadanos. China es otro ejemplo, lanzando su propia Blockchain en abril de 2020 para sembrar los cimientos de lo que sería un “cripto-yuan”, proyectado para 2021. Los Estados y Bancos Centrales del mundo desde hace tiempo vienen observando el crecimiento y la presencia de estos activos con particular atención, no solo para poder regular en consecuencia y evitar que generen problemas en el sistema financiero, sino también para tomar elementos de esta tecnología y encontrarle aplicaciones que permitan mejorar el funcionamiento actual de sus propios sistemas.

El 31 de octubre de 2008 es una fecha clave en el desarrollo de los instrumentos monetarios, pues en plena crisis, que fue denominada “*subprime*” recibiendo este nombre por los préstamos a gente de baja reputación crediticia que (entre otros factores que no vienen al caso en este trabajo) la desencadenaron, un documento circuló por primera vez en una lista de difusión de correos electrónicos de aficionados de la criptografía. El título del mismo era “Bitcoin P2P e-cash paper” y estaba firmado por un tal Satoshi Nakamoto, seudónimo de una persona (o grupo de personas) del cual aún se desconoce la identidad real.

Se presenta así el Bitcoin en su forma original (hoy existen otras criptomonedas que toman su nombre, pero no son el proyecto que se fundó originalmente, como Bitcoin Cash o Bitcoin SV): una versión puramente Peer-to-peer (P2P) de efectivo electrónico que permitiría enviar pagos online de una parte a la otra sin pasar por una institución financiera.

El cuerpo del correo electrónico solo listaba algunas de sus principales características y daba una descripción escueta de su proyecto, del cual se explaya en un link adjunto y que prometía entre otras cosas, eliminar el problema del “*double spending*”, anonimato y no necesitar un tercer agente en el cual confiar. Hay antecedentes de entusiastas que han probado a desarrollar proyectos similares, como Nick Szabo con BitGold o David Chaum con DigiCash, pero sus tecnologías no han logrado persistir en el tiempo por distintos motivos.

Es entonces, dicha fecha de publicación, el inicio de la ola de criptomonedas que conocemos en la actualidad, por ser la primera vez que el mundo conoció de un proyecto que daría origen a cientos que le sucedieron. Hoy en día son más de 7800 las criptomonedas que existen, con una capitalización de mercado de más de 1.300 mil millones de dólares. Cada whitepaper es un mundo independiente, donde su autor (o autores) define las características a voluntad.

Todas las criptomonedas del mundo, excepto el Petro venezolano (PTR) lanzado por el gobierno de Nicolás Maduro en 2018, han sido lanzadas por agentes privados. No hay bancos centrales ni Estados que se alineen detrás de ninguna de ellas como lo hacen con el dinero fiduciario. Por ejemplo, detrás del Bitcoin se encontró el mencionado Nakamoto, detrás de la plataforma Ethereum (ETH) está Vitalik Buterin, detrás de Litecoin (LTC) está Charlie Lee y así podríamos seguir con todas. Aunque aún no hay ningún país que haya aceptado a ninguna de ellas como “moneda de curso legal”, son aceptadas por muchos comercios alrededor del mundo y utilizadas para el envío de dinero entre personas, por lo tanto, a las monedas emitidas por los gobiernos que circulan alrededor del mundo, se han sumado ahora las privadas.

## Funcionamiento

Pasando a su funcionamiento y a sus definiciones, una criptomoneda se puede definir como un activo digital que basa su seguridad en algoritmos criptográficos y en una tecnología revolucionaria denominada “Blockchain”. Esta tecnología consiste en un registro descentralizado donde todas las transferencias que se hagan por esa red quedan guardadas en orden cronológico, y cada nodo tiene una copia de la cadena existente hasta entonces.

La información se almacena en bloques de datos que a su vez están conectados entre sí de manera sucesiva y son firmados con llaves criptográficas. La validez de los registros se lleva a cabo por los nodos, que son voluntarios en todo el mundo que aportan la capacidad de sus equipos informáticos y a aquel que logre descifrar la llave para firmar el bloque, se lo recompensa con una cantidad determinada de la criptomoneda de la red en la cual participa.

Todas las transferencias son públicas y cualquiera puede revisar todas las que se hayan incluido en un bloque de información, otorgando así una alta transparencia. Pero, también, garantiza la privacidad de sus usuarios ya que no se publican sus nombres y apellidos, sino que únicamente se muestran las transacciones en forma de hash, una cadena de números y letras.

Reconocidos autores en el ambiente de las criptomonedas, como Andreas Antonopoulos o los hermanos Don y Alex Tapscott, rescatan de esta tecnología que su aplicación puede no limitarse únicamente al dinero, sino extenderla a servicios en otros ámbitos y aplicaciones (como el Sector de Servicios Financieros, Salud, Seguros, Inmobiliaria, Música, Logística y Cadena de Suministro, etc.). Al estar su funcionamiento descentralizado, por distribuirse entre los nodos, es una red que nunca se apaga, por lo que funciona las 24 horas del día, todos los días del año.

## ¿Pueden considerarse las criptomonedas dinero?

El dinero debe cumplir tres funciones fundamentales: medio de cambio, reserva de valor y unidad de cuenta. La primera de ellas parece cumplirse sin problemas, pues ese es el propósito original de Bitcoin y de muchas otras criptomonedas, el poder servir como un sistema de transacciones fácil, rápido y, sobre todo, sin ningún tipo de fronteras. En esta funcionalidad, incluso, supera en ciertos aspectos los servicios con los que hoy contamos, por ejemplo, para el envío de dinero a personas que puedan estar muy lejos físicamente. Cualquiera puede pagarle hoy a un comerciante en cualquier momento y que se encuentre en cualquier otra parte del mundo de manera rápida y eficiente, sin las demoras y los altos costos que puede presentar un banco comercial o las empresas que se dedican a envíos internacionales de dinero. También estaría ahorrándose la burocracia que pueden presentarse por controles impuestos por las agencias gubernamentales. Por último, y más controversial, también se sortean los controles de capitales que los Estados pueden imponer, permitiendo así una libre circulación de capitales entre fronteras.

En segundo lugar, está la de reserva de valor. Uno aceptará utilizar estas monedas si cree que no solo se seguirán aceptando en el futuro, sino que también mantengan su valor. Aquí se plantea por primera vez la presencia de las “Stablecoins”. Una stablecoin es una criptomoneda cuyo protocolo está armado para que mantenga un valor fijo a lo largo del tiempo. Las de mayor market cap son Tether (USDT), USD Coin (USDC) y Paxos Standard (PAX), aunque la lista es larga y sigue (https://es.beincrypto.com/aprende/guia-completa-mejores-stablecoins-2020/). Estas mencionadas, por ejemplo, están fijas al valor de 1 dólar por token. También hay casos que defienden su paridad fija contra, por ejemplo, el dólar, a través de contratos inteligentes que buscan regular la oferta a través de una tasa de interés como el Multi-Collateral DAI. Hay Stablecoins en cambio que respaldan su valor en reservas de monedas fiat que son auditables, como se hace con el Tether. La moneda fiat es moneda de curso legal cuyo valor no deriva del hecho de ser un bien físico o mercancía, sino por ser emitido y respaldado por un gobierno. Dicho esto, es discutible si las monedas que regulan su valor a través de oferta y demanda son buenas reservas de valor dada su alta volatilidad, pero ya no con las monedas de paridad fija. Decir que estas últimas no son una reserva de valor, es indirectamente afirmar que tampoco lo serían los dólares estadounidenses. A pesar de presentar una menor volatilidad en casi todos los casos, hay monedas en todo el mundo que podemos afirmar que han perdido su función como reserva de valor, pero aún al día de hoy se siguen usando y las consideramos como dinero, siendo el ejemplo extremo el bolívar venezolano cuyo poder adquisitivo se ha ido erosionando por culpa de la persistente inflación que azota al país. Entonces la alta volatilidad no implica necesariamente que no puedan utilizarse estos activos como reservas de valor.

Por último, toca analizar la función de unidad de cuenta. Un bloque de información no es más que un libro contable, digital, publico y encriptado, donde las transacciones están denominadas en la criptomoneda determinada. De esta forma, se puede afirmar que cumplen la función de unidad de cuenta, al menos en términos nominales. Aunque el valor varíe y la costumbre hoy sea expresar precios en moneda local, uno puede expresar un precio en Bitcoins, en Ethers o en tokens de Litecoin, y hacer la conversión luego a la moneda que desee.

Sin perjuicio de las consideraciones vertidas sobre medio de cambio, reserva de valor y unidad de cuenta, no se tiene al momento una economía donde la estructura de precios de bienes y servicios esté expresada íntegramente en una criptomoneda -aunque recientemente El Salvador ha declarado por Ley al bitcoin como de curso legal faltando la correspondiente reglamentación. Por lo tanto, esta situación limita sustancialmente la aplicación del concepto de “dinero” con relación a las criptomonedas.

## Actores principales

El ambiente cripto posee entonces una lista de actores principales que es bien recopilada y descripta por el Banco Central Europeo en su trabajo “Virtual currency schemes – a further análisis” de febrero de 2015:

* **Inventores**: crean la criptomoneda y desarrollan la parte técnica de su red. Pueden ser conocidos (como MakerDAO) o no (como Nakamoto). Algunos se mantienen involucrados luego del lanzamiento en el mantenimiento de técnico, como hace la Bitcoin Foundation.
* **Emisores**: son los usuarios con la capacidad de emitir nuevas unidades de la moneda. En esquemas centralizados como Ripple el emisor es la misma entidad administradora, y en contrapunto, en las descentralizadas como Bitcoin, son los usuarios quienes emiten.
* **Mineros**: son los usuarios que aportan su capacidad informática al servicio de la validación de transacciones y su posterior incorporación a la cadena de información. Son un elemento clave en los esquemas descentralizados porque son los responsables de evitar el problema de “double-spending” o transacciones fraudulentas. Por su trabajo aportado, reciben unidades de la criptomoneda como recompensa. Por lo tanto, en esquemas descentralizados, los mineros cumplen la misión de ser los emisores también.
* **Proveedores de servicios de procesamientos**: son los que facilitan las transferencias entre usuarios. En esquemas descentralizados también lo hacen los mineros.
* **Usuarios**: serán los ciudadanos que elijan operar con estos activos, ya sea para la compra de bienes y servicios a negocios locales, pagos a comerciantes en otro país o para enviar remesas internacionales. Los usuarios podrán hacerse acreedores de estos activos a través de:
  + Compras directas del criptoactivos
  + Participar en actividades que paguen en criptoactivos
  + Minar
  + Recibir pagos por un bien o actividad en criptoactivos
  + Recibir donaciones en criptoactivos
* **Proveedores de billeteras virtuales**: Empresas que ofrecen sus servicios de billeteras virtuales para guardar las llaves privadas de los usuarios, iniciar transacciones y ver el historial de las mismas. Estas funcionan como una interfaz para los usuarios y a pesar de la facilitad y contribución para la adopción masiva de este tipo de activos en usuarios inexpertos, han sido objetos de críticas por ser instituciones centralizadas (que irían en muchos casos contra el espíritu original de la mayoría de las cripto) las que guardan llaves privadas que no son propias. Uno de los más críticos es el reconocido autor Andreas Antonopoulos, que en todos sus libros cita la frase “Not your keys, not your coins”. Con esto apunta a decir que delegar las llaves privadas a una institución privada tiene sus riesgos como con un banco comercial tradicional. Ejemplo de esto puede ser el servicio de storage que ofrecía Mt. Gox, que en febrero de 2014 presentó su quiebra tras un ataque en el que denunció como “extraviados” 750.000 bitcoins de sus clientes y 100.000 propios (cotizados todos en 473 millones de dólares en ese entonces). Los clientes que no eran dueños “auténticos” de sus llaves vieron desvanecerse sus tenencias y obligados a enfrentar judicialmente a la compañía.
* **Exchanges**: son empresas que permiten comprar o vender criptomonedas a un tipo de cambio expuesto contra monedas fiat o mismo contra otras criptomonedas. Muchas han evolucionado y no solo ofrecen este servicio, sino también estadísticas y gráficos para análisis técnico. Y, por último, y muy importante para la adopción en la vida cotidiana, muchos han trabajado con comercios para convertir pagos en criptomonedas al instante a monedas fiat para evitar la volatilidad. Así, el comercio acepta un método adicional de pago y no corre riesgo de que entre la compra y la acreditación de los fondos la volatilidad lo perjudique. Los más conocidos hoy en Argentina son Ripio, SatoshiTango y recientemente se incorporó Buenbit, cuyas operaciones iniciales se limitaban al Multi Collateral DAI y está ampliando sus horizontes hacia otras monedas.
* **Plataformas de trading**: funcionan como nexos entre compradores y vendedores y su diferencia con los exchanges y que no se involucran en las transacciones, en el sentido que uno no le compra a la plataforma, sino a otro usuario.
* **Otros**: el Banco Central Europeo (ECB, por sus siglas en inglés *European Central Bank*) hace esta categoría para agrupar a aquellos que se ven involucrados de manera indirecta en el ambiente cripto. Están aquí por ejemplo los fabricantes de computadoras o equipos para el minado, desarrolladores de software, fabricantes de cajeros automáticos que vendan criptomonedas, proveedores de servicios financieros en criptomonedas que facilitan la inversión en start-ups o derivados financieros.

Es importante destacar también los riesgos que presentan estos activos. La característica del anonimato ha sido el factor fundamental en este sentido, puesto que muchas actividades ilegales han sido financiadas con Bitcoin u otras criptomonedas. El caso más resonante hasta ahora ha sido el del sitio web Silk Road, utilizado como una plataforma para compra y venta de todo tipo de actividades, e inaccesible para la gran mayoría de usuarios de internet por estar alojado en la Deep Web, una parte de internet al que no se puede acceder a través de los navegadores comunes y requiere de conocimientos informáticos más profundos. En Silk Road era posible adquirir prácticamente todo lo imaginable, desde drogas hasta sicarios, pasando por una infinidad de categorías y la única moneda aceptada para llevar adelante estas transacciones era Bitcoin. La difícil trazabilidad que le otorga el anonimato fue fundamental para elegirla como medio de cambio oficial del sitio y tras el arresto del creador del sitio, Ross Ulbricht, el nombre Bitcoin ha sido manchado y siempre ha sido visto de reojo con sospechas sobre sus dudosas legalidad y usos.

Las principales entidades financieras toman como el riesgo principal de estos activos la facilidad que otorgan para el lavado de dinero, argumentando al anonimato de las transacciones y difícil trazabilidad de las mismas a pesar de estar en un sistema transparente como la Blockchain. Al figurar únicamente las direcciones de la billetera, es difícil asociar y probar la apropiación de los fondos a una persona en particular.

# Volatilidad

La volatilidad de una variable, σ, se define como la desviación estándar del rendimiento proporcionado por la variable por unidad de tiempo cuando el rendimiento se expresa mediante capitalización continua. Cuando se utiliza la volatilidad para la gestión de riesgos, la unidad de tiempo suele ser un día. De modo que la volatilidad es la desviación estándar del rendimiento compuesto continuamente por día.

Si definimos como el valor de la variable al final del día *i*. El rendimiento diario compuesto continuamente para la variable en el día *i* es:

Por lo tanto, una definición alternativa de la volatilidad diaria de una variable es la desviación estándar del cambio proporcional de la variable durante un día. Esta es la definición que se utiliza habitualmente en la gestión de riesgos.

Si asumimos que los rendimientos de cada día son independientes, con la misma varianza, la varianza de los retornos en T días es T veces la varianza de los retornos en un día. Esto significa que la desviación estándar del rendimiento durante T días es √T veces la desviación estándar de la rentabilidad durante un día. Esto es consistente con el adagio "La incertidumbre aumenta con la raíz cuadrada del tiempo".

Se ha demostrado que la volatilidad es mucho mayor en días hábiles que en días no hábiles. Como resultado, los analistas tienden a ignorar fines de semana y días festivos al calcular y utilizar volatilidades. Sin embargo, estos análisis se han hecho para cualquier activo de mercado donde los fines de semana y días festivos no hay intercambio alguno. A diferencia de esto, las criptomonedas pueden ser intercambiadas los 365 días del año, incluyendo fines de semana y días festivos.

Suponiendo que los rendimientos en días sucesivos sean independientes y tengan la misma desviación estándar, entonces

Un enfoque para estimar la volatilidad para el día *n*, , es igualarlo a la desviación estándar de la . Cuando se utilizan las m observaciones más recientes en la junto con la fórmula habitual para la desviación estándar, este enfoque da:

Donde es la media de las :

Para fines de gestión de riesgos, se asume que es cero. La justificación de esto es que el cambio esperado en una variable en un día es muy pequeño en comparación con la desviación estándar de cambios (incluso si la variable aumentó o disminuyó bastante rápido durante las *m* observaciones). También, *m - 1* se reemplaza por *m*. Esto nos aleja de una estimación insesgada de la volatilidad a una estimación de máxima verosimilitud.

Entonces, la formula para la varianza queda simplificada como:

Esta ecuación da igual peso a cada . El objetivo es estimar , la volatilidad del día *n*. Por tanto, tiene sentido dar más peso a datos recientes. Un modelo que hace esto es

La variable es la cantidad de peso que se le dio a la observación hace *i* días. Las *α’s* son positivas. Si se eligen en base a que cuando *i > j*, menor peso se les da a las observaciones más viejas. A su vez, la suma de las variables de peso debe sumar 1

Otra alternativa es suponer que hay una tasa de variación media y que se le debe dar algo de peso. Esto lleva al modelo que tome la siguiente forma

Donde es la tasa de variación a largo plazo y es el peso asignado a . Como los pesos deben sumar la unidad, tenemos

Esto se conoce como el modelo de heterocedasticidad condicional autorregresiva, ***ARCH (m)****.* Fue sugerido por primera vez por Engle. La estimación de la varianza se basa en una varianza promedio a largo plazo y *m* observaciones. Cuanto más vieja la observación, menos peso se le da. Definiendo , el modelo en la ecuación se puede escribir

## Modelo EWMA (EXPONENTIALLY WEIGHTED MOVING AVERAGE)

El modelo de media móvil ponderada exponencialmente (EWMA) es un caso particular de la ecuación

Donde los pesos, , disminuyen exponencialmente a medida que retrocede en el tiempo. Específicamente, donde λ es una constante entre cero y uno.

Este esquema de ponderación conduce a una fórmula particularmente simple para actualizar las estimaciones de volatilidad. La fórmula es

La volatilidad estimada para el día *n* (realizada al final del día *n-1*) es calculada en base a (la estimación que se hizo al final del día *n-2* de la volatilidad para día *n-1*) y (el cambio porcentual diario más reciente).

Si se empiezan a descomponer las estimaciones de las varianzas en función del modelo planteado *m* veces, la ecuación resulta ser:

Para valores de *m* muy grandes, el término es lo suficientemente pequeño para ser ignorado y se puede estimar la varianza directamente de la siguiente forma.

En la ecuación previa, . Los pesos para disminuye a una tasa λ a medida que retrocedemos en el tiempo. Cada peso es λ veces el peso anterior.

El enfoque EWMA está diseñado para rastrear cambios en la volatilidad. Suponiendo que hay un gran movimiento en la variable de mercado el día n-1 de modo que es grande.

Esto hace que la estimación de la volatilidad actual se mueva al alza. El valor de λ determina qué tan sensible es la estimación de la volatilidad diaria al cambio porcentual diario más reciente. Un valor bajo de λ conduce a que se le dé mucho peso a cuando se calcula . En este caso, las estimaciones producidas para la volatilidad en días sucesivos son en sí misma muy volátiles. Un valor alto de λ (un valor cercano a 1) produce estimaciones de la volatilidad diaria que responden relativamente lentamente a la nueva información proporcionada por el cambio porcentual diario.

De esta manera se tiene una fórmula fácil de aplicar para el cálculo de las varianzas. Solo hay que elegir el valor deseado para el factor de decrecimiento. Normalmente se escoge un valor λ = 0,94.

## Modelo GARCH (1,1) (Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity)

El modelo de heterocedasticidad condicional autorregresiva generalizada, ***GARCH***, propuesto por *Bollerslev* en 1986, es un modelo autorregresivo generalizado que captura las agrupaciones de volatilidad de las rentabilidades a través de la varianza condicional.

En GARCH (1,1), se calcula a partir de una tasa de varianza promedio a largo plazo, , así como de y . La ecuación para GARCH (1,1) es:

Donde es el peso asignado a , α es el peso asignado a y β es el peso asignado a . Como los pesos deben sumar uno:

El modelo EWMA es un caso particular de GARCH (1,1) donde γ = 0, α = 1 - λ, y β = λ.

El “(1,1)” en GARCH (1,1) indica que se basa en la observación más reciente de y la estimación más reciente de la varianza. El modelo GARCH (p, q) más general calcula a partir de las observaciones *p* más recientes en y las estimaciones *q* más recientes de la varianza. GARCH (1,1) es, con mucho, el más popular de los modelos GARCH.

Configurando , el modelo GARCH (1,1) también se puede escribir

Para un modelo GARCH (1,1) estable, se requiere que α + β <=1. De lo contrario, la ponderación aplicada a la varianza a largo plazo es negativa.

Intuitivamente, el pronóstico de varianza GARCH se puede interpretar como un promedio ponderado de tres pronósticos de varianza diferentes:

* Uno es una varianza constante que corresponde al promedio de largo plazo.
* El segundo es la nueva información que no estaba disponible cuando se realizó el pronóstico anterior.
* El tercero es el pronóstico que se hizo en el período anterior.

Las ponderaciones de estos tres pronósticos determinan qué tan rápido cambia la varianza con nueva información y qué tan rápido vuelve a su media a largo plazo.

Se han propuesto otros modelos GARCH que incorporan novedades asimétricas. Estos modelos están diseñados para que dependa del signo de . Podría decirse que los modelos son más apropiados que GARCH (1,1) para acciones. Esto se debe a que la volatilidad del precio de una acción tiende a estar inversamente relacionada con el precio, por lo que un negativo debería tener un efecto mayor en que el mismo positivo.

## EGARCH(1,1) (*Exponential GARCH)*

Uno de los modelos que permite el efecto asimétrico de las noticias es el modelo **EGARCH**. Un problema con el modelo GARCH estándar es que es necesario asegurarse de que todos los coeficientes estimados sean positivos. Nelson (1991) propuso una especificación que no requiere restricciones de no negatividad. Siendo

Donde α captura el efecto de signo y γ captura el efecto de tamaño. El parámetro de persistencia para este modelo es β, es una constante que representa el efecto magnitud o de simetría en el modelo ( significa un modelo simétrico), tal que un valor implica que las innovaciones positivas son más desestabilizantes que las negativas y viceversa. Una diferencia con el modelo GARCH (1, 1) es que la varianza condicional se escribe en función de las innovaciones estandarizadas pasadas, en lugar de las innovaciones pasadas.

La ecuación para la varianza condicional está en forma log-lineal. Independientemente de la magnitud de , el valor implícito de nunca puede ser negativo. Por tanto, se permite que los coeficientes sean negativos.

## GJR-GARCH (1, 1)

El modelo **GJR-GARCH** propuesto por *Glosten, Jagannathan y Runkle*, es una simple extensión de GARCH con un término adicional añadido para dar cuenta de posibles asimetrías. La volatilidad se estima de la siguiente manera:

Donde  1 si , 0 en otro caso.

GJR-GARCH (1, 1) es una versión asimétrica de GARCH (1, 1), donde refleja la naturaleza asimétrica de la respuesta de los inversores a los rendimientos de las acciones y los índices y conduce a shocks positivos y negativos que tienen diferentes efectos sobre la volatilidad condicional. representa un parámetro de asimetría. Un choque positivo aumentará la volatilidad en α en *n*; un choque negativo aumentará la volatilidad en α + γ en *n*. La persistencia depende de este parámetro a través de α + β + γκ, donde κ denota el valor esperado de los residuos estandarizados.

En ambos modelos, EGARCH (1, 1) y GJR-GARCH (1, 1), la asimetría surge si γ> 0 por lo que ambos siempre muestran asimetría.

# Medidas de Riesgo

En la gestión integral de riesgos, se buscan medidas que puedan resumir en una sola cifra el riesgo de la cartera, y que puedan brindar la información necesaria para constituir un capital acorde para que la institución financiera pueda hacer frente a dicho riesgo.

El **Valor a Riesgo (VaR)** y el **Expected Shortfall (ES)** son intentos de proporcionar un número único que resume el riesgo total en una cartera. El VaR fue iniciado por JPMorgan y es ampliamente utilizado por tesoreros corporativos y administradores de fondos, así como por instituciones financieras. La medida era usada en la actuaría mucho antes de que fuera renombrado bajo el nombre de VaR, pero el término apareció públicamente por primera vez en 1993, y se ha convertido con el tiempo en la medida de riesgo más popular para cuantificar ciertos riesgos en entidades financieras. Es la medida que los reguladores han utilizado tradicionalmente para muchos de los cálculos que realizan relacionados con el establecimiento de requisitos de capital por riesgo de mercado, riesgo de crédito y riesgo operacional.

El uso de las medidas de riesgo puede ser tanto para propósitos internos relacionados con la gestión de riesgos, como para cumplir con requerimientos de capital impuestos por los entes reguladores de las entidades financieras o compañías aseguradoras.

## Valor a Riesgo (VaR)

La medida de riesgo más tradicional es conocida como Valor a Riesgo (VaR). Esta, consiste en encontrar la máxima pérdida a la que se enfrenta la institución para un horizonte temporal determinado, dado un nivel de confianza elegido previamente, bajo el supuesto de que la cartera no se modifica a lo largo de todo el plazo preestablecido.

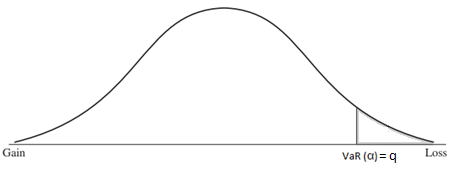
Esta medida se puede resumir en la siguiente frase:

*"Con un* α *% de probabilidad, la perdida no excederá más de V durante el período T."*

La variable V es el VaR de la cartera. Es una función de dos parámetros: el horizonte temporal, T, y el nivel de confianza, α%. El VaR es el nivel de pérdida durante un período de tiempo T que se está α% seguro de que no se superará.

El VaR se puede calcular a partir de la distribución de probabilidad de ganancias durante el tiempo T o de la distribución de probabilidad de pérdidas durante el tiempo T. Entendiendo a las ganancias como valores negativos y a las pérdidas como valores positivos, para determinar el Valor a Riesgo se busca aquel valor de la distribución que acumula una probabilidad de α.

En otras palabras, el cálculo del VaR consiste concretamente en buscar un cuantil (q) de la distribución de pérdidas esperadas, determinado por el nivel de confianza asignado al VaR. Así, si por ejemplo se quiere calcular un VaR a 1 día con un nivel de confianza del 99%, se debe buscar el cuantil N° 99 de la distribución de pérdidas a 1 día.



La gran ventaja del VaR como medida de riesgo es que es simple y fácil de entender. Simple porque proporciona un número único que resume todos los factores de riesgo, y fácil de entender porque su interpretación es sencilla: es la mayor pérdida esperada para el α% de las veces.

El gran problema de la medida recae en lo sucedido en esas pocas ocasiones en las cuales la pérdida excede al VaR. Dicho problema se origina porque la medida no otorga ninguna información sobre el comportamiento de las pérdidas en exceso del VaR, es decir, sobre la cola de la distribución. Esto puede ocasionar grandes problemas, ya que, si dicha distribución tiene colas pesadas, puede que las pérdidas que exceden al VaR sean muy grandes en relación con el mismo, generando que la institución financiera incurra en una pérdida de una magnitud mucho peor de la esperada y comprometiendo incluso, en algunos casos, la solvencia de la institución.

## Expected Shortfall (ES)

Una de las medidas para suplir la falencia del VaR, es conocida como Expected Shortfall (ES), Tail Value at Risk (TVaR) o Conditional Tail Expectation (CTE). Es una de las más utilizadas ya que es exigida por los entes reguladores, dados los lineamientos dispuestos por el Comité de Basilea.

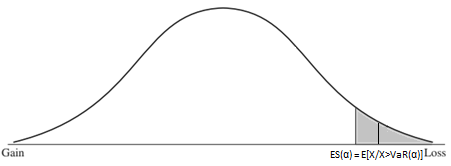
Mientras que VaR hace la pregunta: "¿Qué tan mal se pueden poner las cosas?", ES pregunta: "Si las cosas empeoran, ¿cuál es la pérdida esperada?". ES, como VaR, es función de dos parámetros: T (el horizonte temporal) y α (el nivel de confianza). Es la pérdida esperada durante el tiempo T condicionada a que la pérdida sea mayor que el percentil α% de la distribución de la pérdida. En términos estadísticos:

En los casos donde se trata de una distribución discreta, esta definición puede no funcionar, ya que el valor obtenido del VaR puede caer en una masa de probabilidad de manera tal que la distribución acumulada por este valor sea mayor al nivel de confianza establecido.

Para un mismo nivel de confianza y horizonte temporal, el VaR nunca puede ser superior al ES de una misma cartera. La idea de esta medida por lo tanto es brindar una información más contundente sobre el comportamiento de las pérdidas que la que puede otorgar el VaR, ya que tiene en cuenta cómo se desarrolla la cola de la distribución.

En este sentido tiene una gran ventaja sobre el VaR, aunque en contrapartida tiene algunas desventajas notables. En primer lugar, estimar el comportamiento en las colas de variables relacionadas con retornos financieros no es una tarea simple, por lo cual realizar un cálculo con alto grado de precisión del ES suele ser una complicación. Además, la interpretación de los resultados no es tan sencilla como la del VaR. Por otro lado, la medida no termina de complementar las falencias del VaR, ya que da cuenta de la esperanza en los casos más extremos, pero no de la dispersión. Finalmente, si bien existen métodos para hacerlo, realizar un testeo retrospectivo de la metodología empleada para calcular el ES (Backtesting) es un procedimiento difícil, mientras que para el VaR existen formas sencillas y eficientes para hacerlo.

Si se cuenta con la función de densidad de la variable aleatoria que representa las pérdidas de la cartera, el ES se puede obtener mediante:



El numerador se corresponde a la esperanza por encima del VaR, no condicionada a que la variable Perdida Esperada supere el VaR (es decir, se esta esta ponderando un cero para todo lo que se encuentra por debajo del VaR). El denominador representa la probabilidad de que la variable supere el VaR y, por lo tanto, al estar dividiendo a la esperanza antes mencionada, la condiciona de manera tal que la misma representa la esperanza de la variable cuando esta es mayor al VaR.

## Construcción de Modelos

Para construir modelos, la metodología a implementar consiste en crear un modelo lineal que pueda explicar la distribución conjunta de las variables que afectan la cartera. El modelo lineal más básico supone un comportamiento normal de la cartera. Este supuesto hace que el mismo sea más fácil de aplicar, pero atenta contra su precisión. Por otra parte, otra simplificación que se suele aplicar al mismo es que la esperanza de los retornos a través del horizonte de tiempo escogido es igual a 0. Si se eligen horizontes pequeños (como por ejemplo 1 día), este supuesto no es tan problemático. Además, es difícil encontrar modelos de medias que brinden predicciones certeras de la esperanza de los retornos.

El primer paso, entonces, para construir el modelo es encontrar la varianza del activo. Para ello, se utilizan los datos históricos de los retornos geométricos. Una vez obtenida la varianza (y, por lo tanto, la volatilidad), el VaR y ES para un horizonte h y confianza α, de una cartera de valor W (en este caso será el precio del Bitcoin), se calcula:

Donde representa el cuantil α de una Normal con media 0 y varianza 1. Esto implica que el modelo lineal básico supone que la cartera tiene un comportamiento normal en cuanto a los movimientos en su valor.

Cuando se trata del Bitcoin, puede no tener sentido asumir normalidad, ya que implicaría que puede tomar valores negativos. En estos casos, resulta más conveniente asumir que los rendimientos logarítmicos son quienes siguen una distribución normal, lo que significa que los movimientos del precio del Bitcoin ahora tienen un comportamiento Log-normal. La varianza calculada en este caso representa la variabilidad de los retornos geométricos, y las medidas se calcularían de la siguiente manera:

Otro método para calcular el VaR y el ES es mediante Simulación (en este caso, un método numérico). Con los parámetros estimados, se calcula la volatilidad para cada modelo en particular. Luego se simula el retorno a un día para obtener el precio al día siguiente, partiendo del último precio de la información disponible (), asumiendo que la cartera esta compuesta por un Bitcoin de valor S.

La volatilidad estimada en las formulas del punto *‘4. Volatilidad’* depende de la volatilidad pasada y de la realización de los shocks aleatorios con distribución *N(0,1).* Y a su vez, se debe tener en cuenta el supuesto implícito en cada formula, donde inicialmente se asume que se trata de un proceso estocástico y para cada “día” se tiene la misma distribución de la variable aleatoria rendimiento (tanto como función y con los mismos parámetros). Luego, con este nuevo retorno, se calcula la volatilidad del siguiente día para poder simular el retorno y, por consiguiente, el precio. Así se va simulando un camino de *h* días. Este procedimiento se repite *n* veces, siempre partiendo de .

Así, se tienen *n* simulaciones de un camino de *h* días para el precio del Bitcoin. Tanto para el día 1 como para el día *h* (trabajados por separado, pero con la misma metodología), se toma el percentil α% de los *n* precios simulados, para luego restarle el y así obtener el Valor a Riesgo en cada uno de los casos.

El ES, por otro lado, será el valor promedio de la Pérdida Esperada cuando la probabilidad acumulada sea mayor al nivel de confianza α%. El nivel de confianza elegido es de 99%, 95% y 90%.

# Backtesting

El Backtesting es un marco estadístico formal que consiste en verificar que las pérdidas reales estén en línea con las pérdidas proyectadas. Este procedimiento es esencial para verificar si el VaR está bien calibrado. En caso de no estar bien calibrado, el modelo deberá ser reexaminado por supuestos erróneos, mala elección de parámetros o una inexactitud en el modelo mismo. El Backtesting es un proceso para comparar sistemáticamente los pronósticos del VAR con los rendimientos reales. Este proceso es exclusivamente informativo para los gestores de riesgos. El Backtesting también es importante porque es una de las razones por las que los reguladores bancarios permiten que los bancos utilicen sus medidas de riesgo internas para determinar la cantidad de capital regulatorio necesario para respaldar sus carteras comerciales.

El Backtesting compara el VAR diario con las ganancias y pérdidas realizadas al día siguiente. Si la pérdida real es peor que el VAR, el evento se registra como una excepción o *hit*. Las pruebas de excepción se centran únicamente en la frecuencia de excepciones. Esto es consistente con la idea de que VAR es simplemente un cuantil. Luego, el administrador de riesgos cuenta el número de excepciones *x* en una ventana con *T* observaciones.

Para corroborar la eficacia del VaR, existen dos pruebas muy populares para su testeo (una de ellas exigida por la regulación internacional). Éstas son el Test de Kupiec (1995) y el Test de Christoffersen (1998).

El Test de Kupiec, también conocido como *unconditional coverage*, consiste en evaluar si la cantidad de excepciones del VaR (la cantidad de veces que falló), estén correlacionadas con el nivel de confianza establecido para la medida. Con un nivel de confianza α, se espera que el modelo falle en una proporción p = (1-α) de las veces. Tomando como información para el test la cantidad de excepciones y la cantidad de observaciones totales, se crea el estadístico para realizar la prueba chi-cuadrado correspondiente. La hipótesis nula para el mismo es que el estadístico es igual a 0 mientras que la alternativa es que este es mayor a 0. Esto significa que se realiza la prueba con la hipótesis alternativa de que las excepciones esperadas son en efecto mayores a las especificadas bajo la hipótesis nula.

El Test de Christoffersen es una prueba para verificar la independencia entre las excepciones. Para ello se deben encasillar todas las observaciones en función de lo sucedido cada día en relación con el día anterior. Con esta información se construye el estadístico y se realiza también una prueba chi-cuadrado. En este caso, la hipótesis nula indica que las excepciones son independientes (el estadístico es igual a 0), mientras que la hipótesis alternativa es que hay dependencia entre las fallas (el estadístico es mayor a 0)

Para llevar a cabo el *test* de Kupiec se deben contar el total de las fallas o *“Hits”* (*N*), y teniendo en cuenta el total de las observaciones (*T*) durante el año de prueba, se puede obtener el factor *π*:

De esta forma se puede construir el estadístico de prueba que sigue una distribución chi-cuadrado con un grado de libertad (esta es una adaptación del *test* original hecha por Christoffersen),

Con esta información se escoge el nivel de confianza y se realiza el *test*. La hipótesis nula para el mismo es que el estadístico es igual a 0 mientras que la alternativa es que es mayor a 0.

Para el *test* de Christoffersen por su parte, se debe encasillar a las observaciones en una de las cuatro categorías siguientes:

* N00: El modelo no falló y tampoco lo hizo el día anterior
* N01: El modelo falló, pero no había fallado el día anterior
* N10: El modelo no falló, pero si había fallado el día anterior
* N11: El modelo falló y también lo hizo el día el anterior

Con estos datos se pueden obtener los siguientes valores de *π* condicionados:

A partir de estos datos se arman dos funciones para el *test*:

La prueba intenta explicar que, si los *hits* efectivamente son independientes, A y B no deberían diferir mucho entre sí (de hecho, sin son iguales puede asumirse independencia sin continuar con el procedimiento). El estadístico para este caso es el siguiente:

Las hipótesis son iguales a las del *test* de Kupiec. La hipótesis nula es que el estadístico es igual a 0 y la hipótesis alternativa es que el mismo es mayor.

La última alternativa es realizar las dos pruebas simultáneamente, bajo el *conditional coverage.* Para ello se suman los estadísticos de cada *test* y se realiza la prueba igual que en los casos anteriores, donde el nuevo estadístico sigue una distribución Chi-Cuadrado, pero con dos grados de libertad en vez de uno.

Los estadísticos están construidos pensando a la variable que representa los *hits* como una variable que sigue una distribución binomial. La idea de las pruebas es mostrar que las excepciones se comportan efectivamente como variables de una binomial con *p* (parámetro) igual al nivel de error seleccionado para el VaR, y que además las variables son independientes entre ellas.

# Aplicación de Mercado

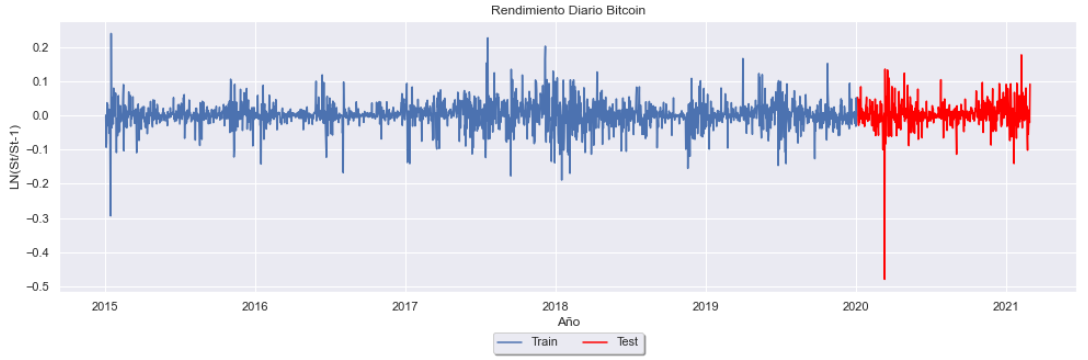
## Data

Como información histórica, se utilizaron datos sobre los movimientos diarios durante 5 años (2015/01/01 a 2020/01/05, 1830 datos), armando su respectiva serie de tiempo para los precios y para los retornos geométricos. Luego para el backtesting correspondiente, se utilizó el último año en cuestión, hasta la fecha de análisis (2020/01/06 al 2021/03/01, 421 datos). No se hizo un análisis del contexto económico para la elección de los períodos.

Esta información se descargó de una librería de Python llamada “cryptocompare”. Existen otras librerías para descargar la información (como Yahoo Finance, Investing o Blockchain), sin embargo, no tomaban en cuenta que el mercado de las criptomonedas funciona las 24 horas, los 365 días del año, por lo que se optó por cryptocompare.

A diferencia de las acciones que cotizan en el mercado de valores, el Bitcoin cotiza las 24 horas del día, los 7 días de la semana. Es por esto que el calendario anual tiene 365 (o 366 si es año bisiesto) observaciones, a diferencia del mercado de acciones que funciona de 9:30 a 16 horas, los 255 días hábiles del año.





Para llevar adelante la aplicación de las medidas de riesgo se presume que las condiciones pasadas se mantendrán en el futuro, lo que permite utilizar la información histórica para realizar estimaciones sobre las pérdidas esperadas. De esta forma, es posible realizar una aplicación objetiva de las medidas de riesgo en función de los lineamientos de Basilea, aunque no reflejan el contexto socioeconómico en el cual se aplican.

## Modelos

El primer paso fue verificar las condiciones para la modelización ARIMA-GARCH.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Test** | **Estadístico** | **P-Valor** | **Valor Crítico (1%)** | **Resultado** |
| **ADF** | -43.7259 | 2,2E-16 | -3.4339 | La serie es estacionaria |
| **KPSS** | 0.1536 | 0.1 | 0.347 | La serie es estacionaria |
| **ARCH LM** | 161.0559 | 0 | 0.05 | Hay efecto ARCH |

Los primeros valores, correspondientes al test de **Dickey-Fuller Aumentado**, muestran que la hipótesis nula de que hay raíz unitaria (la serie es estacionaria) fue rechazada.

La segunda fila muestra los resultados para la prueba de **Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin** (KPSS), si bien es similar al test ADF, la diferencia está en que la hipótesis nula del test KPSS es que la serie es estacionaria, por lo tanto la interpretación del p-valor es lo opuesto al de Dickey-Fuller. En este caso, la hipótesis nula de que la serie es estacionaria no se rechaza.

La tercera fila ilustra los resultados para la prueba de **multiplicadores de Lagrange**. La decisión también indica rechazar la hipótesis nula que indica que no hay efecto ARCH (heterocedasticidad condicionada).

Esto implica que se pueden utilizar modelos de la familia GARCH para modelizar el comportamiento de la volatilidad del Bitcoin. En consecuencia, se eligió el modelo ARIMA que mejor se ajusta al comportamiento histórico de la misma. Se hizo una comparación de los modelos ARIMA(0,0,0), ARIMA(0,0,1), ARIMA(0,1,0), ARIMA(0,1,1), ARIMA(1,0,0), ARIMA(1,0,1), ARIMA(1,1,0), ARIMA(1,1,1) y los resultados arrojaron que el mejor modelo siguiendo los criterios de información AIC (*Akaike Information Criteria*) y BIC (*Bayesian Information Criteria*), es el ARIMA (0;0;0), y por lo tanto, se puede despreciar la media.

Con esta información, se calibraron los modelos. Los parámetros fueron estimados mediante el método de Maxima Verosimilitud.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Parametro** | **GARCH(1,1)** | **GJR-GARCH(1,1)** | **EGARCH(1,1)** |
| **ω** | 0.000031 | 0.000031 | 0.026394 |
| **α** | 0.1 | 0.1 | 0.3258 |
| **γ** | 0.879996 | 0.01 | 0.050569 |
| **β** | - | 0.875 | 0.990446 |

La volatilidad estimada para cada uno de los modelos mencionados anteriormente se refleja en la siguiente tabla:

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Metodo** | **Volatilidad** | **AIC** | **BIC** | **Log-Verosimilitud** |
| **GARCH (1,1)** | 0.0276663 | 7500.47 | 7472.91 | 3755.23 |
| **GJR-GARCH** | 0.02733618 | 7502.06 | 7468.98 | 3757.03 |
| **EGARCH** | 0.03434702 | 7625.83 | 7592.76 | 3818.92 |
| **EWMA** | 0.0264344 |  |  |  |

Como podemos notar, el modelo EGARCH estima una volatilidad mayor al resto de los modelos. Estos resultados no indican qué modelo estima mejor la volatilidad, pero al realizar el calculo del VaR y ES y su respectivo Backtesting, se puede ver qué modelo funciona.

La selección de los modelos se hace utilizando el criterio de información de Akaike (AIC) y el criterio de información bayesiana (BIC):

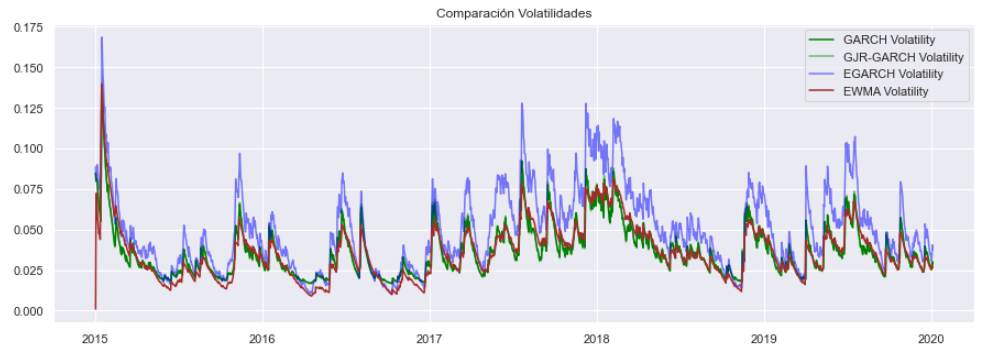
Donde L es el valor maximizado del logaritmo de la función de verosimilitud, T es el número de observaciones y k es el número de parámetros estimados en el modelo. Entre los modelos ARCH y GARCH, que satisfacen los supuestos de no correlación de los residuales y de los residuales al cuadrado, se escoge el de menor valor de BIC o AIC. El mejor modelo representado según el criterio AIC es el GARCH (1,1) y según el criterio BIC, el mejor modelo es el GJR-GARCH.

En estadística, la función de verosimilitud (a menudo llamada simplemente verosimilitud) mide la bondad de ajuste de un modelo estadístico a una muestra de datos para valores dados de los parámetros desconocidos. Se forma a partir de la distribución de probabilidad conjunta de la muestra, pero se considera y se utiliza como una función de los parámetros únicamente, por lo que se tratan las variables aleatorias como fijas en los valores observados.

La verosimilitud es una medida que dice qué tan probable es que obtenga un conjunto de datos como el que tiene, dada la ecuación de regresión. Entonces, cuanto mayor sea el valor de probabilidad, mejor es el ajuste del modelo. Según este criterio, el mejor modelo representado es el EGARCH.

Como en los tres criterios de selección no hay una tendencia clara por algún modelo en particular, no se puede saber a priori cual de todos estima mejor la volatilidad.

En el siguiente grafico se ve la comparación de las volatilidades:



## Medidas de Riesgo

Asumiendo que los rendimientos logarítmicos son quienes siguen una distribución normal y, por lo tanto, los movimientos en los precios tienen un comportamiento Log-normal, las medidas se calcularían de la siguiente manera.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Metodo** | **σ** | **VaR a 1 dia** | | | **VaR a 10 dia** | | |
| **0.99** | **0.95** | **0.9** | **0.99** | **0.95** | **0.9** |
| **GARCH (1,1)** | 0.0276663 | 486.3 | 339.7 | 262.7 | 1626.9 | 1106.7 | 841.82 |
| **GJR-GARCH** | 0.0273362 | 480.3 | 335.6 | 259.6 | 1605.9 | 1092.9 | 831.58 |
| **EGARCH** | 0.034347 | 607.5 | 423.2 | 326.7 | 2060.1 | 1388 | 1049.5 |
| **EWMA** | 0.0264344 | 464.1 | 324.4 | 251 | 1548.7 | 1055.4 | 803.67 |

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Metodo** | **σ** | **ES a 1 dia** | | | **ES a 10 dia** | | |
| **0.99** | **0.95** | **0.9** | **0.99** | **0.95** | **0.9** |
| **GARCH (1,1)** | 0.0276663 | 560.2 | 429.3 | 363.2 | 1897.3 | 1422 | 1188.7 |
| **GJR-GARCH** | 0.0273362 | 553.3 | 424 | 358.8 | 1872.4 | 1403.8 | 1173.8 |
| **EGARCH** | 0.034347 | 700.8 | 535.7 | 452.7 | 2413.3 | 1794.2 | 1493.2 |
| **EWMA** | 0.0264344 | 534.5 | 409.7 | 346.8 | 1804.7 | 1354.5 | 1133.2 |

Mediante el método de Simulación previamente explicado, se calculó el VaR y ES a 1 y 10 días para niveles de confianza del 99%, 95% y 90%, calculado con 100.000 simulaciones.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Metodo** | **σ** | **VaR a 1 dia** | | | **VaR a 10 dia** | | |
| **0.99** | **0.95** | **0.9** | **0.99** | **0.95** | **0.9** |
| **GARCH (1,1)** | 0.0276663 | 460.1 | 330.1 | 258.1 | 1495.5 | 1040.9 | 812.68 |
| **GJR-GARCH** | 0.0273362 | 454.3 | 325.6 | 256.1 | 1502.6 | 1034.9 | 806.67 |
| **EGARCH** | 0.034347 | 568.3 | 412 | 323.8 | 1281.9 | 933.67 | 740.84 |
| **EWMA** | 0.0264344 | 436.4 | 312.6 | 246 | 1370 | 971.98 | 761.04 |

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Metodo** | **σ** | **ES a 1 dia** | | | **ES a 10 dia** | | |
| **0.99** | **0.95** | **0.9** | **0.99** | **0.95** | **0.9** |
| **GARCH (1,1)** | 0.0276663 | 527 | 410.5 | 350.7 | 1756.2 | 1323 | 1119.6 |
| **GJR-GARCH** | 0.0273362 | 519.6 | 405.8 | 346.9 | 1757.9 | 1321 | 1114.9 |
| **EGARCH** | 0.034347 | 646.1 | 509.2 | 436.5 | 1443.5 | 1143.8 | 986.2 |
| **EWMA** | 0.0264344 | 496.5 | 388.5 | 332.6 | 1574.3 | 1211.7 | 1034.9 |

Y los gráficos correspondientes a cada simulación:

Gráfico, Gráfico de líneas

Descripción generada automáticamente

Gráfico, Gráfico de líneas

Descripción generada automáticamente

Imagen de la playa

Descripción generada automáticamente con confianza media

Gráfico

Descripción generada automáticamente

Donde el eje de abscisas y el de ordenadas representan los días y el precio simulado, respectivamente. Así, se muestra el camino de los 100.000 precios simulados, representados cada camino por un color distinto. El momento 0 en el eje de abscisas representa el día 2020/01/07 (primer precio simulado al día siguiente de la data disponible), y el momento 10 representa el día 2020/01/15.

## Backtesting

Se llevó a cabo el backtesting sobre los cálculos del VaR para un nivel de confianza del 99%. El horizonte temporal para cada observación fue establecido en h=1. Como los modelos fueron armados a la fecha 2020/01/06, se tomaron 421 observaciones de la pérdida de la cartera para el backtesting a partir de esa fecha, hasta el día 2021/03/01. Para llevar a cabo las metodologías a lo largo del backtesting, la información sobre rendimientos realizados utilizada para el mismo se ha ido agregando al set de datos históricos para actualizar la información a la hora de calcular las medidas para los días subsiguientes.

Para cada una de las metodologías presentadas se calcularon el número de excepciones, los valores de los distintos factores denominados π (necesarios para el test de independencia), y los valores de los estadísticos. Los resultados se exponen en las siguientes tablas.

La siguiente tabla contiene el cálculo de todos los factores necesarios para las pruebas.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Metodo** | **T** | **N** | **h** | **N00** | **N01** | **N10** | **N11** | **H01** | **H11** | **A** | **B** |
| **GARCH (1,1)** | 421 | 12 | 0.0285 | 396 | 12 | 12 | 0 | 0.0294 | 0 | 3.08E-24 | 2.10E-24 |
| **GJR-GARCH** | 421 | 12 | 0.0285 | 396 | 12 | 12 | 0 | 0.0294 | 0 | 3.08E-24 | 2.10E-24 |
| **EGARCH** | 421 | 8 | 0.019 | 404 | 8 | 8 | 0 | 0.0194 | 0 | 7.33E-18 | 6.16E-18 |
| **EWMA** | 421 | 13 | 0.0309 | 394 | 13 | 13 | 0 | 0.0319 | 0 | 1.00E-25 | 6.42E-26 |

Con estos valores, se construyó la siguiente tabla, que contiene los estadísticos para las 3 pruebas presentadas de *backtesting* para el Valor a Riesgo.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Metodo** | **LRUC** | **LRIND** | **LRCC** |
| **GARCH** | 9.70517047 | 0.76388932 | 10.4690598 |
| **GJR-GARCH** | 9.70517047 | 0.76388932 | 10.4690598 |
| **EGARCH** | 2.72623088 | 0.3491157 | 3.07534659 |
| **EWMA** | 11.9213505 | 0.89341522 | 12.8147658 |

Si se selecciona un nivel de confianza del 99% para cada *test*, entonces para el *unconditional coverage* y para el *test* de independencia el punto crítico es LRC = 6,635 (percentil 99 de la distribución Chi-Cuadrado con 1 gl), y para el *conditional coverage* el punto crítico es LRC = 9,21 (percentil 99 de la distribución Chi-Cuadrado con 2 gl). Bajo estas condiciones, solo el modelo EGARCH no es rechazado ya que los estadísticos son inferiores al punto crítico. En los otros casos, se rechazan las hipótesis nulas en el *unconditional coverage* y en el *conditional coverage*.

Si se elige una confianza un poco menor (95% suele ser una buena elección para un *test* de hipótesis) se puede realizar la prueba con una mayor significatividad. En este caso, para las dos primeras pruebas LRC = 3,841, y para la restante LRC = 5,991. Los resultados siguen siendo iguales que el caso donde el nivel de confianza es del 99%.

# Conclusión y Comentarios Finales

Las empresas deben asumir riesgos si quieren sobrevivir y prosperar. La principal responsabilidad de la gestión de riesgos es comprender la cartera de riesgos que la empresa está asumiendo actualmente y que planea asumir en el futuro y debe decidir si estos son aceptables y, si no lo son, qué medidas deben tomarse.

El objetivo del trabajo era analizar distintos métodos para estimar la volatilidad y así poder calcular el *Valor a Riesgo* y el *Expected Shortfall* para gestionar el riesgo de mercado. Ya sea para controlar la solvencia, realizar una valuación de cartera más eficiente y con la mejor combinación de riesgo-beneficio, hacer una correcta gestión de activos y pasivos (ALM por sus siglas en inglés *‘Asset and liability management’)*, realizar una estrategia de cobertura ante estos riesgos, etc.

La única metodología que no fue rechazada por el Backtesting fue el modelo EGARCH. Esto no significa que el resto de los modelos no funcionen para calcular las medidas de riesgo, sino que a la hora de elegir un modelo, el EGARCH es predominante por sobre el GARCH(1,1), GJR-GARCH y EWMA.

Este trabajo esta centrado sobre el Bitcoin, por lo que generalizar este resultado para el resto de las criptomonedas no seria lo correcto. Existen criptomonedas más estables (las llamadas *StableCoins*, como por ejemplo el *DAI*) y algunas otras creadas más recientemente (*ADA, CAKE, BNB, etc.*) que si bien pueden llegar a tener un comportamiento similar al Bitcoin, no se cuenta con la información suficiente para realizar el análisis.

En este trabajo se han presentado solo algunas de las variantes posibles a la hora de calcular el *Valor a Riesgo* o *Expected Shortfall* para gestionar el riesgo de mercado. Existen otras alternativas posibles para calcular las medidas de riesgo, como la teoría de valores extremos. También, es posible realizar un análisis más profundo en búsqueda del mejor modelo para estimar las volatilidades. Por otra parte, si bien los modelos presentados para estimar la volatilidad son muy utilizados y han logrado realizar buenas estimaciones, existe la posibilidad de probar otros modelos que puedan adaptarse mejor para este caso particular, o en todo caso, que refuercen que los escogidos son los mejores para la tarea. Incluso existe la posibilidad de construir modelos autorregresivos para estimar el Valor a Riesgo en función de estimaciones pasadas del mismo (modelos CAViaR).

Dado el amplio abanico de posibilidades con la que cuenta un gestor de riesgos, resulta prudente probar diferentes modelos para escoger el adecuado. Desafortunadamente, si bien las técnicas de *backtesting* proveen la posibilidad de poner a prueba los modelos, no son particularmente útiles para realizar una comparación entre ellos. El objetivo de dichas pruebas es testear la efectividad de las metodologías, no establecer un criterio para seleccionar la mejor entre ellas. La medida VaR tiene la característica de ser “elegible”, y por lo tanto podría analizarse si un modelo es mejor que otro, aunque esta no sea la finalidad de las pruebas aquí presentadas. Si un método muestra que ha sido eficaz para medir el riesgo al ser sometido a un proceso de *backtesting*, este puede ser empleado sin la necesidad de incurrir en la búsqueda del modelo “ideal”, ya que además de haber mostrado un buen funcionamiento, está respaldado por los recargos y metodologías complementarias como pueden ser las pruebas de estrés.

# Bibliografía

* “Bitcoin: A peer-to-peer Electronic Cash System”, Satoshi Nakamoto, 2008, pp. 1
* <https://es.tradingview.com/symbols/CRYPTOCAP-TOTAL/>
* Virtual currency schemes – a further analysis”, European Central Bank, 2012, pp. 7-9
* T. Bollerslev, “Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity,” Journal of Econometrics 31 (1986): 307–327.
* Box, G., y Jenkins, G. (1970). Time series analysis-forecasting and control. San Francisco: Holden day.
* Casas Monsegny, M., y Cepeda Cuervo, E. (2008). Modelos arch, garch y egarch: aplicaciones a series financieras. Cuadernos de economía.
* R. F. Engle, “Autoregressive Conditional Heteroscedasticity with Estimates of the Variance of U.K. Inflation,” Econometrica 50 (1982): 987–1008.
* Auza, J. y Larre, T. (2019). Modelización financiera mediante modelos híbridos ARIMA-GARCH: Evidencia para Argentina.
* Hull, J. (2012). *Risk management and financial institutions*. John Wiley & Sons.
* Hansen, P. R., y Lunde, A. (2005). A forecast comparison of volatility models: does anything beat a garch (1, 1)?. Journal of applied econometrics.
* Bessis, J. (2011). *Risk management in banking*. John Wiley & Sons.
* Boudoukh, J., Richardson, M., y Whitelaw, R. (1998). *The Best of Both Worlds: A Hybrid Approach to Calculating Value at Risk.* Risk 11.
* Crouhy, M., Galai, D., y Mark, R. (2006). *The essentials of risk management (Vol. 1)*. New York: McGraw-Hill.
* Dowd, K. (2007). *Measuring market risk*. John Wiley & Sons.
* Hardy, M. R. (2006). *An introduction to risk measures for actuarial applications*. SOA Syllabus Study Note, 548.
* Hull, J. y White, A. (1998). *Incorporating Volatility Updating into the Historical Simulation Method for Value at Risk*. Journal of Risk.
* Jorion, P. (2000). *Value at risk.*
* Kupiec, P. (1995). *Techniques for verifying the accuracy of risk measurement models.* The J. of Derivatives.