



Vigilada Mineducación

¿Ofrecen los criptoactivos beneficios de diversificación y eficiencia aplicando el modelo de Markowitz en un contexto de portafolios multiactivos?

Do cryptoassets offer diversification and efficiency benefits by applying the Markowitz model in a multi-asset portfolio context?

Por

Luis Alejandro González Díez¹

Tesis presentada como requisito parcial para obtener el título de
Magíster en Administración Financiera

Asesor

Juan Felipe Cardona Llano

UNIVERSIDAD EAFIT

Medellín, abril, 2022

¹ lgonza58@eafit.edu.co

© 2022 por Luis González
Todos los Derechos Reservados

Resumen

Esta investigación tiene como propósito analizar si los criptoactivos ofrecen bondades de diversificación y eficiencia en términos de riesgo/retorno en los portafolios multiactivos, con el incentivo de que hasta el momento no se han encontrado estudios similares. Para ello se utilizan métodos estadísticos y, posteriormente, a partir de la teoría moderna de portafolios de Markowitz, que permite la construcción de un portafolio óptimo dado un nivel de riesgo, se construyen tres portafolios con diferentes perfiles de riesgo: conservador, moderado y de mayor riesgo. Las optimizaciones se realizan con índices que representen cada clase de activo, a saber: MSCI Colcap Index (Colcap), COLTES Index (CTES), Bloomberg Commodity Index (BCOM) y Bloomberg Galaxy Crypto Index (BGCI). Finalmente se analiza el performance de los diferentes portafolios optimizados contra un *benchmark* que no incluye los criptoactivos.

Palabras claves: criptoactivos, portafolio óptimo, alfa, benchmark.

Abstract

The purpose of this research is to analyze whether crypto-assets offer diversification and efficiency benefits in terms of risk/return in multi-asset portfolios, with the incentive that so far no studies similar to the one proposed have been found. Statistical methods are used for this and, subsequently, based on Markowitz's modern portfolio theory, which allows the construction of an optimal portfolio given a level of risk, three portfolios with different risk profiles are constructed: conservative, moderate and high risk. Optimizations are performed with indices representing each asset class, namely: MSCI Colcap Index (Colcap), COLTES Index (CTES), Bloomberg Commodity Index (BCOM) y Bloomberg Galaxy Crypto Index (BGCI). Finally, the performance of the different optimized portfolios is analyzed against a benchmark that does not include crypto-assets.

Keywords: Crypto-assets, optimal portfolio, alpha, benchmark.

Contenido

1. Introducción	1
2. Marco teórico	3
3. Metodología	11
3.1 Recopilación de data histórica y datos elegidos para el análisis	11
3.2 Análisis de las correlaciones en diferentes marcos de tiempo.....	12
3.3 Optimización de los portafolios según el perfil de riesgo	12
3.4 Determinación del performance para los distintos portafolios óptimos.....	13
4. Resultados	14
4.1 Análisis de las correlaciones.....	14
4.1.1 Correlaciones de la renta variable frente a los criptoactivos	14
4.1.2 Correlaciones de la renta fija frente a los criptoactivos.....	17
4.1.3 Correlaciones de los commodities frente a los criptoactivos.....	20
4.2 Optimización de los portafolios.....	23
4.2.1 Portafolio conservador	25
4.2.2 Portafolio moderado	32
4.2.3 Portafolio de mayor riesgo.....	33
5. Conclusiones y recomendaciones.....	41
5.1 Conclusiones.....	41
5.2 Recomendaciones	42
6. Referencias	43

Índice de tablas

Tabla 1. Subclases de criptoactivos por industria	4
Tabla 2. Resumen de las estadísticas de los portafolios.....	39

Índice de figuras

Figura 1. Restricciones aplicadas en la optimización del portafolio conservador	12
Figura 2. Heat map de la correlación criptoactivos/equity desde 2010	14
Figura 3. Heat map de la correlación criptoactivos/equity desde 2013	15
Figura 4. Heat map de la correlación criptoactivos/equity desde 2015	15
Figura 5. Heat map de la correlación criptoactivos/equity desde 2017	16
Figura 6. Heat map de la correlación criptoactivos/equity desde 2020	16
Figura 7. Heat map de la correlación criptoactivos/renta fija desde 2010	17
Figura 8. Heat map de la correlación criptoactivos/renta fija desde 2013	18
Figura 9. Heat map de la correlación criptoactivos/renta fija desde 2015	18
Figura 10. Heat map de la correlación criptoactivos/renta fija desde 2017	19
Figura 11. Heat map de la correlación criptoactivos/renta fija desde 2020	19
Figura 12. Heat map de la correlación criptoactivos/commodities desde 2010.....	20
Figura 13. Heat map de la correlación criptoactivos/commodities desde 2013.....	21
Figura 14. Heat map de la correlación criptoactivos/commodities desde 2015.....	21
Figura 15. Heat map de la correlación criptoactivos/commodities desde 2017.....	22
Figura 16. Heat map de la correlación criptoactivos/commodities desde 2020.....	22
Figura 17. Retornos logarítmicos por clase de activo	24
Figura 18. Distribución de probabilidad de los retornos por clase de activo	24
Figura 19. Cuadro resumen 1. Retornos anualizados por clase de activo.....	25
Figura 20. Cuadro resumen 2. Ratio de Sharpe por clase de activo.....	25
Figura 21. Cuadro resumen 3. Pesos del portafolio conservador de mínima varianza	26
Figura 22. Cuadro resumen 4. Análisis del portafolio conservador de mínima varianza	26
Figura 23. Portafolios óptimos conservadores de mínima varianza.....	26
Figura 24. Cuadro resumen 5. Pesos del portafolio conservador de máximo ratio de Sharpe.....	27

Figura 25. Cuadro resumen 6. Análisis del portafolio conservador de máximo ratio de Sharpe...	27
Figura 26. Portafolios óptimos conservadores de máximo ratio de Sharpe	28
Figura 27. Backtesting del portafolio conservador con mínima varianza.....	29
Figura 28. Cuadro resumen 7. Pesos del benchmark conservador de mínima varianza	29
Figura 29. Cuadro resumen 8. Análisis del benchmark conservador de mínima varianza	30
Figura 30. Portafolios óptimos del benchmark conservador.....	30
Figura 31. Cuadro resumen 9. Pesos del benchmark conservador de máximo ratio de Sharpe.....	30
Figura 32. Cuadro resumen 10. Análisis del benchmark conservador de máximo ratio de Sharpe	31
Figura 33. Portafolios óptimos del benchmark conservador de máximo ratio de Sharpe.....	31
Figura 34. Backtesting del benchmark conservador de mínima varianza.....	31
Figura 35. Cuadro resumen 11. Análisis del portafolio moderado (equally weighted)	32
Figura 36. Cuadro resumen 12. Análisis del benchmark moderado (equally weighted)	33
Figura 37. Cuadro resumen 13. Pesos con mayor riesgo de mínima varianza.....	33
Figura 38. Cuadro resumen 14. Análisis con mayor riesgo de mínima varianza.....	34
Figura 39. Portafolios óptimos con mayor riesgo de mínima varianza.....	34
Figura 40. Cuadro resumen 15. Pesos con mayor riesgo de máximo ratio de Sharpe	35
Figura 41. Cuadro resumen 16. Análisis con mayor riesgo de máximo ratio de Sharpe	35
Figura 42. Portafolios óptimos mayor riesgo de máximo ratio de Sharpe	35
Figura 43. Backtesting con mayor riesgo de mínima varianza	36
Figura 44. Cuadro resumen 17. Pesos del benchmark con mayor riesgo de mínima varianza	37
Figura 45. Cuadro resumen 18. Análisis del benchmark con mayor riesgo de mínima varianza ..	37
Figura 46. Portafolios óptimos del benchmark con mayor riesgo de mínima varianza	37
Figura 47. Cuadro resumen 19. Pesos del benchmark con mayor riesgo de máximo ratio de Sharpe	38
Figura 48. Cuadro resumen 20. Análisis del benchmark con mayor riesgo de máximo ratio de Sharpe.....	38
Figura 49. Portafolios óptimos del benchmark con mayor riesgo de máximo ratio de Sharpe	38
Figura 50. Backtesting del benchmark mayor con mayor riesgo de mínima varianza	39

1. Introducción

Al finalizar la crisis financiera de 2008, un hombre que se hace llamar Satoshi Nakamoto creó la primera criptomoneda exitosa: el *bitcoin*,² “una moneda digital, descentralizada, parcialmente anónima, no respaldada por ningún gobierno u otra entidad legal y no canjeable por oro u otra mercancía” (Grinberg, 2012). A partir de dicho momento, la creación de activos digitales se ha incrementado de manera exponencial, y aunque el bitcoin ha recibido la mayor parte de esta atención, existen otras alternativas como el *litecoin* y monedas propuestas como Ripple. Asimismo, hay pasivos emitidos por entidades como Amazon y Facebook que también podrían caracterizarse como monedas digitales. (Dwyer, 2015)

Algunas personas los denominan bitcoin y monedas digitales similares como criptomonedas, porque los algoritmos subyacentes y la seguridad están íntimamente relacionados con los algoritmos criptográficos digitales. Una base de datos disponible públicamente registra cada transacción de dichos activos. Cada bitcoin está asociado con una dirección, y una transacción es un intercambio de bitcoins de una dirección a otra. Esta base de datos se denomina *blockchain*. Una transacción en bitcoin no es definitiva hasta que se incluye en las cadenas de bloques disponibles de muchas fuentes. (Dwyer, 2015)

Es claro entonces que el uso de los criptoactivos se ha hecho cada vez más frecuente, hasta el punto de que grandes *hedge funds* (fondos de cobertura) ya cuentan con fondos 100 % invertidos en activos digitales. Dadas las características de esta clase de activo, entre ellas la volatilidad, resulta muy arriesgada la asignación de todo un portafolio en criptomonedas; por tanto, en esta investigación se propone analizar la inclusión de los activos digitales en portafolios que también contengan activos tradicionales, para de esta manera responder a la pregunta *¿poseen los criptoactivos beneficios de diversificación y eficiencia en portafolios multiactivos?*

A fin de dar respuesta a la pregunta anterior, este trabajo aborda los siguientes aspectos: en primer lugar se analizan las correlaciones medidas en diferentes marcos de tiempo para determinar de qué manera responden los activos digitales ante los movimientos en el precio de los activos tradicionales; posteriormente se realiza una optimización de los portafolios, la cual

[...] juega un papel importante en la determinación de estrategias para inversores. Lo que los inversores esperan lograr a través de un portafolio optimizado es maximizar el rendimiento y

² Los términos en inglés aparecen escritos en cursivas solo en su primera aparición.

minimizar el riesgo del mismo [sic]. Los inversores tienen que equilibrar sus decisiones desde la contradicción entre el riesgo y el rendimiento de su inversión. Por tanto, no existe un único portafolio optimizado para satisfacer a todos los inversores. La cartera óptima está determinada por las preferencias de riesgo y rentabilidad del inversor. (Ivanova & Dospatliev, 2018)

Así se determinan tres diferentes portafolios para distintos perfiles de riesgo; por último se mide el desempeño de los portafolios optimizados bajo el modelo de Markowitz, determinando el alfa de cada uno respecto a un *benchmark* que será completamente igual a los portafolios optimizados, pero sin incluir los criptoactivos dentro de sus clases de activos.

2. Marco teórico

El mercado de capitales forma parte crucial del desarrollo y el crecimiento de las economías. De esta forma, un mercado sólido, profundo y eficiente brinda estabilidad al sistema financiero y garantiza el direccionamiento adecuado de los recursos entre ahorradores e inversionistas. Por el contrario, un mercado profundo, volátil y concentrado se convierte en un obstáculo para el progreso. (Bejarano Castillo *et al.*, 2019)

Con el avance y la inclusión de nuevos instrumentos ha sido posible que inversionistas profesionales y diversos agentes del mercado logren cada vez tener un set de activos más amplio en el espectro de inversión. A pesar de que en el marco legal colombiano el uso de los criptoactivos aún no está legalizado, actualmente se encuentra radicado el Proyecto de Ley 139 de 2021,³ que pretende reglamentar el uso de este tipo de instrumentos en el país.

Según Dwyer (2015), existen dos tipos de dinero electrónico: moneda y depósitos. La primera puede definirse como un activo que pasa de las manos de una persona a otra y que se evidencia por un saldo que mantiene su dueño. Los segundos pueden definirse como el dinero acreditado en una cuenta bancaria que se convierte en un pasivo de la institución. Así, el dinero electrónico generalmente es visto como un almacenamiento de valor en un medio electrónico, sea este una tarjeta o un disco duro. En este sentido, la moneda digital no es drásticamente diferente al almacenamiento electrónico del valor del depósito.

En noviembre de 2008, luego de la crisis financiera presentada a nivel mundial, un hombre que se identificaba a sí mismo como Satoshi Nakamoto publicó en el sitio web de la P2P Foundation un libro blanco acerca del bitcoin: *Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system*.⁴ En él, el autor expuso que el bitcoin es una moneda digital que no está controlada por bancos ni instituciones financieras y que no tiene un emisor centralizado, haciendo de esto una de las grandes características de la descentralización; y agregó que cualquier persona puede minarlo, comprarlo y venderlo, y recibir otras monedas digitales sin la identificación de los usuarios que participan en la transacción, lo que genera que las monedas digitales se caractericen por la seguridad y la confidencialidad. (Liu *et al.*, 2020)

³ Colombia, Congreso de la República (2021). *Proyecto de Ley 139*, “Por la cual se regulan los Servicios de Intercambio de Criptoactivos ofrecidos a través de las Plataformas de Intercambio de Criptoactivos” [ponentes H. R. Mauricio Andrés Toro Orjuela y H. R. Rodrigo Arturo Rojas Lara]. Disponible en <https://www.camara.gov.co/criptoactivos>

⁴ S. Nakamoto (2008). *Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system*. Ámsterdam: P2P Foundation. Disponible en <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>

No obstante lo anterior, el bitcoin no fue el primer criptoactivo en ser creado. Desde hace más de 40 años se ha tratado el problema de la privacidad por medio de la criptografía. En 1990, el doctor David Chaum, Ph. D. en Informática y Administración de Empresas de la Universidad de Berkeley en California, creó eCash, un sistema de pago digital que permitía pagar por internet de manera segura y anónima, lo que lo hacía un producto tecnológicamente perfecto; no obstante, la idea no fue exitosa en ese momento, ya que a los compradores en línea no les preocupaban ni la privacidad ni la seguridad.⁵

En 1997, Nick Szabo publicó el artículo “The god protocols”,⁶ que sirvió de base para que años más tarde Nakamoto desarrollara un nuevo protocolo que permitiría cambiar la forma de realizar transacciones electrónicas. Este protocolo es el fundamento de un creciente número de registros globalmente distribuidos llamados “cadenas de bloques” (*blockchains*) (Tapscott, D., & Tapscott, A., 2017). La tecnología del blockchain ha permitido la inclusión de un gran número de criptoactivos en el mercado, y aunque algunos han generado un desarrollo más robusto en la forma en la que se efectúan transacciones, otros son tan solo una simple réplica del código y no ofrecen una solución diferente a las existentes.

Por otro lado, dada la facilidad de creación de las criptomonedas, se originó un cierto grado de diversificación, y como consecuencia de ello han surgido más de 17.000 criptoactivos diferentes que tratan de resolver innumerables situaciones de las diversas industrias.

La Tabla 1 muestra las subclases de criptoactivos por industria.

Tabla 1. Subclases de criptoactivos por industria

	Sectores	Industrias	Criptoactivo
CRIPTOACTIVOS	Plataformas	- Contratos inteligentes - Monedas - Escalables - Monedas escalables - Privacidad	Ethereum, Solana, Bitcoin, Dogecoin, Polygon, Loopring, Tether, TerraUSD, Monero, Zcash
	Infraestructura	- Almacenamiento - Blockchain - IoT - Herramientas de desarrolladores	Filecoin, Ankr, Quant, VeChain, Chainlink, XYO, Helium
	Finanzas	- Exchanges descentralizados - Prestamos - Derivados - Inversiones	Uniswap, PancakeSwap, FTX Token, KuCoin, Aave, Maker perpetual, Yearn Finance
	Entretenimiento	- Videojuegos - Realidad virtual - NFTs - Herramientas para creadores	Axie Infinity, Gala, Decentraland, Enjin, Rarible, Rally, Audius, Theta

Fuente: elaboración del autor a partir de Sparkeline Capital (s. f.).

⁵ Para 1990 solo había alrededor de 100.000 computadores conectados a la red.

⁶ N. Szabo (1997). *The god protocols*. Austin, TX: Satoshi Nakamoto Institute. Disponible en <https://nakamotoinstitute.org/the-god-protocols/>

Teniendo en cuenta lo anterior y pensando en un contexto de construcción de portafolio, resultaría complejo en términos matemáticos y estadísticos analizar todo el universo de los criptoactivos; por tanto, en esta investigación se trabajan las correlaciones por activos individuales. Para la optimización de los portafolios se utilizan índices que representan el comportamiento de cada clase de activo. En el caso de la renta variable local se trabaja con el índice (*Index*) MSCI Colcap (Colcap); para las tasas locales, con el índice Coltes (CTES); para los *commodities*, con el índice Bloomberg Commodities (BCOM); y para los criptoactivos, con el índice Bloomberg Galaxy Cripto (BGCI).

Según Sierra Uribe, un índice bursátil se define como

Un indicador de la evolución de un mercado en función del comportamiento de las cotizaciones de los títulos más representativos. Se compone de un conjunto de instrumentos, acciones o deuda, y busca capturar las características y los movimientos de valor de los activos que lo componen. También es una medida del rendimiento que este conjunto de activos ha presentado durante un período de tiempo determinado. (Sierra Uribe, 2012)

Entrando en materia de la teoría moderna de portafolios, el Premio Nobel de Economía Harry Markowitz realizó importantes aportes con la publicación de su artículo “Portfolio selection” en 1952,⁷ cuyos conceptos amplió en su libro de 1959 *Portfolio selection: Efficient diversification of investments*.⁸

Cabe anotar que el fundamento de la teoría moderna de portafolios es un problema matemático en el cual un inversionista elige un portafolio según su aversión al riesgo y posteriormente lo soluciona mediante la optimización del retorno dado un nivel de riesgo medido por la desviación estándar. Según Hurtado Sánchez y Hoyos Burbano (2020), el modelo de Markowitz plantea la siguiente ecuación:

Ecuación 1. Modelo de Markowitz

$$\text{Min}\sigma^2(Rp) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i \times x_j \sigma_{ij}$$

sujeto a

$$E(Rp) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i \times E(R_j) = V^*$$

⁷ H. Markowitz (1952). Portfolio selection. *The Journal of Finance*, 7(1), 77-91. <http://links.jstor.org/sici?sici=0022-1082%28195203%297%3A1%3C77%3APS%3E2.0.CO%3B2-1>

⁸ H. Markowitz (1959). *Portfolio selection: Efficient diversification of investments*. New Haven, CT: Yale University Press. <http://www.jstor.org/stable/j.ctt1bh4c8h>

$$\sum_{i=1}^n x_i = \mathbf{1}$$

$$x_i \geq 0 (i = 1, \dots, n)$$

Fuente: Hurtado Sánchez & Hoyos Burbano (2020).

donde

X_i = peso del activo i

n = número de activos del portafolio

R_p = retorno del portafolio

σ^2 = varianza del rendimiento del portafolio

σ_{ij} = covarianza entre los activos i y j

$E(R_p)$ = retorno esperado del portafolio

Para la aplicación de la teoría de Markowitz es necesario conocer la definición de algunos conceptos inmersos en ella; por ejemplo, Klaus Neusser (2016) denomina por serie de tiempo a la trayectoria (observaciones o datos) o proceso estocástico, definiendo como proceso estocástico $\{X_t\}$ a la familia de variables aleatorias indexadas por $t \in T$ y definidas en algún espacio de probabilidad dado. Del mismo modo, Peter Brockwell y Richard Davis (2016) definen la serie temporal como el conjunto de observaciones x que ocurren en un determinado tiempo t . (Hurtado Sánchez & Hoyos Burbano, 2020)

El modelo de Markowitz proporciona un método para analizar un portafolio basado en la media, las correlaciones, la varianza y la covarianza de los retornos de los activos contenidos en él. De esta manera, un inversionista racional preferirá un portafolio con una pequeña varianza de los retornos y un alto retorno esperado.

En este momento resulta necesario ahondar sobre estos conceptos y sus ecuaciones.

El *coeficiente de correlación de Pearson* es un indicador de fuerza en el cual dos variables, X y Y , se vinculan y mide el grado de asociación entre ellas. Su representación matemática es la siguiente:

Ecuación 2. Coeficiente de correlación de Pearson

$$r_{xy} = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\left[\sum (X - \bar{X})^2 \sum (Y - \bar{Y})^2 \right]^{1/2}} = \frac{S_{XY}}{\sqrt{S_{XX} S_{YY}}}$$

Fuente: Hernández Lalinde *et al.* (2018).

La *covarianza* permite conocer el grado de coherencia que exhiben las dos variables X y Y , teniendo en cuenta que la covarianza de una variable con ella misma no es más que la varianza. Si los valores de X y Y tienden a ser mayores o menores que los de su media, la covarianza tendrá signo positivo; por el contrario, si los valores de X tienden a ser mayores o menores que los de su media, mientras que los valores de Y varían de forma inversa, tendrá signo negativo (Hernández Lalinde *et al.*, 2018). Su representación matemática es la siguiente:

Ecuación 3. Covarianza entre dos activos

$$COV(X, Y) \equiv \sigma_{XY} = E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]$$

Según el Corporate Finance Institute (CFI), los *retornos esperados* o el valor esperado de los retornos (*expected return*) son “una distribución de probabilidad de los posibles rendimientos que puede llegar a percibir una inversión. Estos se calculan como la suma producto entre los rendimientos históricos del activo y sus probabilidades de ocurrencia” (CFI, s. f.-a, traducción libre del autor).

Basado en la teoría de Markowitz, Tobin (1958) derivó los conceptos de *efficient frontier* (frontera eficiente) y *capital market line* (línea de mercado de capitales). Su modelo sugirió que los inversionistas del mercado, sin importar su nivel de tolerancia al riesgo, mantendrían portafolios idénticos según sus expectativas futuras; asimismo, concluyó que la única diferencia en los portafolios se derivaría de las proporciones entre los bonos y las acciones.

En 1964, Sharpe, Lintner y Mossin publicaron otra importante teoría: el CAPM (*capital asset pricing model*, modelo de valoración de activos financieros) (Mangram, 2013), que aportó un valioso avance en la teoría del equilibrio de los mercados, proporcionando a los inversionistas una valoración de los activos en función del riesgo sistémico. Además, se incorporó en los modelos de optimización el reconocido *ratio de Sharpe*, que “busca medir el desempeño de un portafolio y se define como el rendimiento promedio en exceso sobre la tasa libre de riesgo por unidad de volatilidad o de riesgo total. Este indicador también es conocido como *reward to volatility trade-off*” (Latorre Uribe, 2019). Su representación matemática es la siguiente:

Ecuación 4. Ratio de Sharpe

$$SR_p = \frac{(\bar{R}_p - r_f)}{\sigma_p}$$

La *frontera eficiente* representa la mejor combinación de activos –los que producen el máximo retorno esperado dado un nivel de riesgo– y adicionalmente describe la relación entre los retornos esperados de un portafolio. De esta manera, los portafolios óptimos resultantes a lo largo de su curva representarán los máximos retornos esperados en una inversión posible para un nivel de riesgo dado, y estos serán el promedio de una distribución de probabilidad de los posibles retornos. (Mangram, 2013)

La *diversificación*, que se refiere a la relación entre las correlaciones y el portafolio riesgoso, es un concepto reductor de riesgo que implica la asignación de inversiones en varios instrumentos financieros, industrias o categorías de inversión. (Mangram, 2013)

La *varianza del portafolio* es una medida de las desviaciones al cuadrado de los retornos logarítmicos de un activo (Bradford & Miller, 2009; Ross *et al.*, 1995). En un contexto de portafolios, este indicador mide la volatilidad de un activo, por lo que una varianza más alta indica mayor volatilidad.

Teniendo en cuenta que en esta investigación se analizan las bondades de la diversificación de los criptoactivos, resulta necesaria la construcción de un benchmark (o índice de referencia). Según el CFI, el *benchmark* es “una medida utilizada por inversores individuales e institucionales para analizar el riesgo y el rendimiento de una cartera” (CFI, s. f.-b, traducción libre del autor). En otras palabras, es un punto de partida inicial contra el cual se compara el portafolio teórico. El CFI recomienda seguir cuatro pasos básicos para la construcción de un benchmark:

- 1) Elegir la cartera que se va a medir.
- 2) Considerar la asignación de los activos.
- 3) Identificar los índices adecuados.
- 4) Calcular el rendimiento real frente al rendimiento de la cartera de referencia.

(CFI, s. f.-b)

Antes de continuar con la profundización del concepto de benchmark, resulta importante definir el *alfa* del portafolio, que mide el exceso de rendimientos (retornos) respecto al benchmark.

La construcción del benchmark se obtiene a partir de la optimización de un portafolio teórico. De esta manera existen portafolios de inversión que solo replican un benchmark determinado, y su único objetivo es obtener un alfa de 0; estos son llamados “portafolios pasivos”. Por otro lado existen “portafolios activos”, en los que su principal objetivo es vencer el benchmark y generar excesos de retornos (alfas).

Si el portafolio es de gestión activa, una vez se ha definido el benchmark que se debe vencer, sus administradores incrementarán o reducirán el riesgo tomando desviaciones con respecto a su índice, que pueden ser medidas mediante el *tracking error* (TE). Este indicador mide la desviación estándar de la diferencia entre los rendimientos del portafolio y los rendimientos del benchmark. La aplicación de un índice de referencia implica imponer un límite superior al nivel del TE en cada clase de activo, y es de esperar que los administradores ajusten su exposición al riesgo cuando los niveles del TE se encuentran cercanos al límite. (Rudolph & Sabat, 2016)

Cabe recordar que, en la legislación colombiana, el uso formal de los criptoactivos no se encuentra reglamentado. Sin embargo, con el objetivo de hacer esta investigación realista y aplicable, y considerando el objeto de estudio –analizar las bondades de diversificación y eficiencia de los criptoactivos en portafolios multiactivos–, se implementará esta optimización teniendo en cuenta tres tipos portafolios con diferentes perfiles de riesgo similares a los que se encuentran en los fondos privados (RAIS, régimen de ahorro individual con solidaridad) de pensiones en Colombia: conservador, moderado y de mayor riesgo, reglamentados en el Decreto 857 de 2011 (Colombia, Presidencia de la República, 2011). De esta manera se logrará analizar cuál es el impacto en los retornos del portafolio a medida que se incrementa o se disminuye la ponderación en los pesos asignados a los criptoactivos.

Para tener una mejor comprensión de lo expuesto anteriormente es necesario tener claro los conceptos de *fondo conservador*, *fondo moderado* y *fondo de mayor riesgo*, tomando como punto de partida la gestión eficiente de sus recursos por parte de las AFP (administradoras de fondos de pensiones) hasta el final del período de acumulación de aportes. Según el Decreto 857 de 2011, el fondo conservador procura el mejor retorno posible con baja exposición al riesgo; el fondo moderado, el mejor retorno posible con moderada exposición al riesgo; y el fondo de mayor riesgo, el mejor retorno posible con mayor exposición al riesgo. (Colombia, Presidencia de la República, 2011)

Por otra parte, la revisión de la literatura sobre los factores fundamentales que inciden en los precios de los criptoactivos arrojó diversos resultados. Qi *et al.* (2020) encontraron que existe cierta influencia de factores de mercado y macroeconómicos como el oro y tasa de la FED (Federal Reserve System, Sistema de la Reserva Federal de Estados Unidos) en los precios de estas monedas digitales. En sentido contrario, Guinda y Bhattacharyya (2021) afirmaron que no existía correlación alguna con los factores macroeconómicos como la inflación y el producto interno bruto, PIB.

Dyhrberg (2016) estudió la correlación del bitcoin, el oro y el dólar mediante el modelo GARCH (*generalized auto regressive conditional heteroskedasticity*, modelo auto-regresivo

con heterocedasticidad condicional), y los resultados sugirieron que el bitcoin está en una posición intermedia entre las monedas y los commodities; este autor también encontró que el bitcoin puede ser usado como una herramienta de aversión al riesgo en los inversionistas anticipando malas noticias.

Wang *et al.* (2020) utilizaron métodos avanzados para crear un modelo estructural de vectores auto-regresivos para cuatro variables: el bitcoin y los índices S&P 500, Nasdaq y Dow Jones, y concluyeron que su efecto en el mercado de renta variable es más débil que el efecto contrario: del mercado de renta variable sobre él; en otras palabras, demostraron la causalidad del mercado accionario sobre el bitcoin, lo cual permite inferir que los criptoactivos pueden brindar ciertas bondades para la diversificación de los portafolios.

Kumar y Ajaz (2019) expusieron que las correlaciones siguen un período cíclico natural, y que los precios de las criptomonedas están influenciados en gran medida por los movimientos del bitcoin; este hecho causa que la demanda de los criptoactivos se incremente cuando los precios del bitcoin aumentan. Adicionalmente, estos autores sugirieron no construir un portafolio completamente compuesto por criptomonedas, ya que podría ser riesgoso en el sentido de que los precios de la gran mayoría de las *altcoins* siguen el movimiento del bitcoin. (2019)

Aljinović *et al.* (2021) demostraron mediante un modelo basado en el método Promethee II (*Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations*, método de organización de clasificación de preferencia para el enriquecimiento de las evaluaciones) que los criptoactivos contribuyen a tener una mejor relación riesgo/retorno en el resultado de un portafolio. Con todo, su problema gira en torno a reconocer el criterio detrás del riesgo y el retorno, una importante consideración que debe ser tomada en cuenta en el proceso del *security selection*.

Finalmente, en la revisión global de la literatura se encontraron estudios que permiten para el desarrollo de esta investigación la selección de ciertos criterios para el análisis del portafolio óptimo multiactivo, ya que se ha demostrado que el precio de la gran mayoría de los criptoactivos sigue el del bitcoin o de las cinco principales criptomonedas medidas por su capitalización bursátil. Para este fin se utiliza el Bloomberg Galaxy Crypto Index (BGCI) para representar el universo de criptoactivos que permitirán obtener bondades de diversificación combinadas con activos tradicionales.

3. Metodología

Con el objetivo de analizar si los criptoactivos ofrecen bondades diversificadoras en los portafolios multiactivos, la investigación se lleva a cabo a través de los pasos que se exponen a continuación.

3.1 Recopilación de data histórica y datos elegidos para el análisis

Antes de realizar la optimización de un portafolio se deben obtener los datos con los cuales se va a trabajar. La principal fuente para este propósito es el software Bloomberg, que permite la obtención de los datos históricos requeridos. De él se extrae información de las diferentes clases de activos tanto en los *securities* individuales como en los índices utilizados. En este punto resulta importante describir cómo está compuesto cada índice por clase de activo.

MSCI Colcap Index (Colcap)

Creado en conjunto por el ponderador estadounidense MSCI (anteriormente Morgan Stanley Capital Internacional) y la Bolsa de Valores de Colombia (BVC), está diseñado para representar el rendimiento del mercado de renta variable local e incluye un mínimo de 25 *securities* y 20 emisores.

COLTES Index (CTES)

Contiene todos los bonos soberanos con vencimientos mayores a un año en tasa fija emitidos por el gobierno de Colombia, y sirve para representar la curva de rendimientos colombiana.

Bloomberg Commodity Index (BCOM)

Proporciona una amplia exposición a las materias primas, y se caracteriza porque ninguna materia prima o sector de estas lo domina.

Bloomberg Galaxy Crypto Index (BGCI)

Índice ponderado por capitalización de mercado limitado diseñado para medir el rendimiento de los mayores activos digitales negociados en dólares estadounidenses. Sus componentes elegibles se diversifican en diferentes categorías, incluidas las reservas de valor, los medios de intercambio, los protocolos de contratos inteligentes y los activos de privacidad.

3.2 Análisis de las correlaciones en diferentes marcos de tiempo

Una vez obtenida la información histórica de los últimos 12 años, se analizan las correlaciones entre las diferentes clases de activos en varios marcos de tiempo; de esta manera se evalúa si las correlaciones entre los activos tradicionales y digitales se han incrementado durante este período. Cabe destacar que el único criptoactivo del cual se tiene información histórica desde 2010 es el bitcoin (XBTUSD), aunque a medida que se avanza en el tiempo se incorporan nuevos activos digitales en el análisis. Estos cálculos se realizan en el software Python™ con la ayuda de las siguientes *libraries*: Panda™ para el manejo de los *dataframes* y Plotly™ para graficar las matrices de correlaciones.

3.3 Optimización de los portafolios según el perfil de riesgo

Teniendo en cuenta que se desea modelar portafolios óptimos multiactivos bajo tres perfiles de riesgo diferentes –conservador, moderado y de mayor riesgo–, el ejercicio de optimización de se realiza con diferentes restricciones. Para el caso del portafolio conservador se establecen las que se muestran en la Figura 1.

Figura 1. Restricciones aplicadas en la optimización del portafolio conservador

```
weights[COLCAP Index] > 0 and weights[CTES Index] > 0 and weights[BCOM Index] > 0  
and weights[BGCI Index] > 0 and weights[COLCAP] < 0.3 and weights[CTES Index] < 0.5  
and weights[BCOM Index] < 0.10
```

Fuente: elaboración del autor a partir de Python™.

Este portafolio restringe los componentes más riesgosos –*equity* (Colcap) y *commodities* (BCOM)–, asigna la posibilidad de alocar la mayor parte en renta fija (CTES) y deja libre el modelo para realizar la asignación de peso óptimo sobre los criptoactivos (BGCI).

Para el perfil de riesgo moderado se calcula un portafolio de pesos iguales para cada clase de activo, es decir, 25 % sobre cada uno.

Para el perfil de mayor riesgo se liberan en el modelo gran parte de las restricciones; incluso se permiten las ventas en corto para analizar si se mejora la eficiencia riesgo/retorno.

En todos los casos se optimizan los portafolios, primero minimizando la varianza (la volatilidad) y, posteriormente, maximizando el ratio de Sharpe utilizando un millón de simulaciones para encontrar el mínimo y el máximo, respectivamente. Para estos cálculos se utilizan las *libraries* Matplotlib™, Numpy™, Panda™ y Datetime™.

3.4 Determinación del performance para los distintos portafolios óptimos

En este punto se evalúa el desempeño de los portafolios en comparación con los benchmarks de cada uno. Caber recordar que se realizan los mismos procesos –restricciones, maximizaciones y minimizaciones– tanto en los portafolios como en los benchmarks, y que estos últimos no incluyen los criptoactivos dentro de su universo de inversión.

4. Resultados

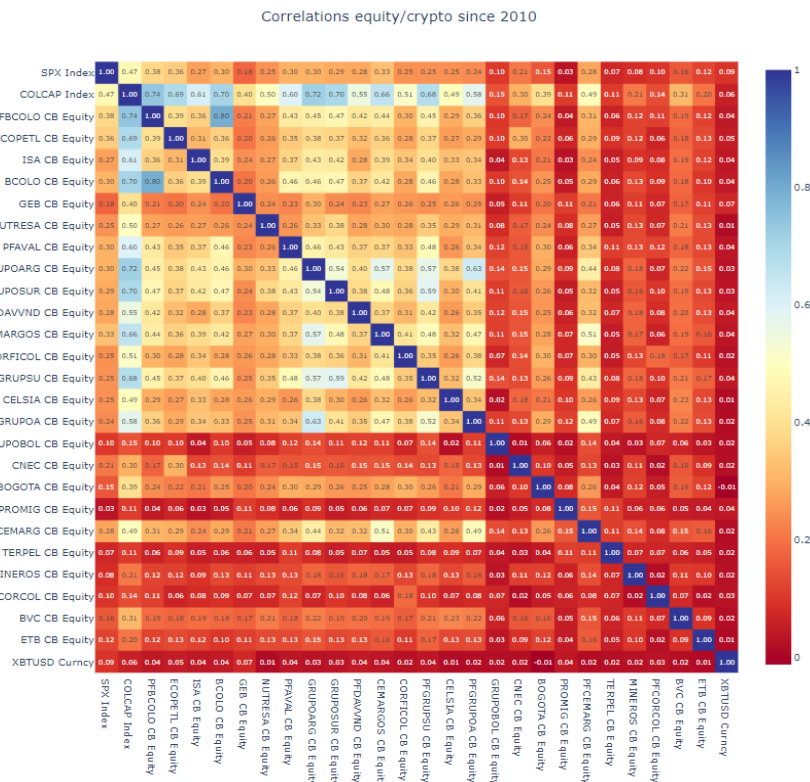
4.1 Análisis de las correlaciones

A continuación se describen en cinco diferentes ventanas de tiempo –2010, 2013, 2015, 2017 y 2020, respectivamente– las correlaciones de los activos digitales contra tres grandes grupos de activos: renta variable, renta fija y commodities. Se destaca el hecho de que a medida que se avanza en el tiempo se van incorporando en el análisis criptoactivos más nuevos, robusteciendo la data y los co-movimientos.

4.1.1 Correlaciones de la renta variable frente a los criptoactivos

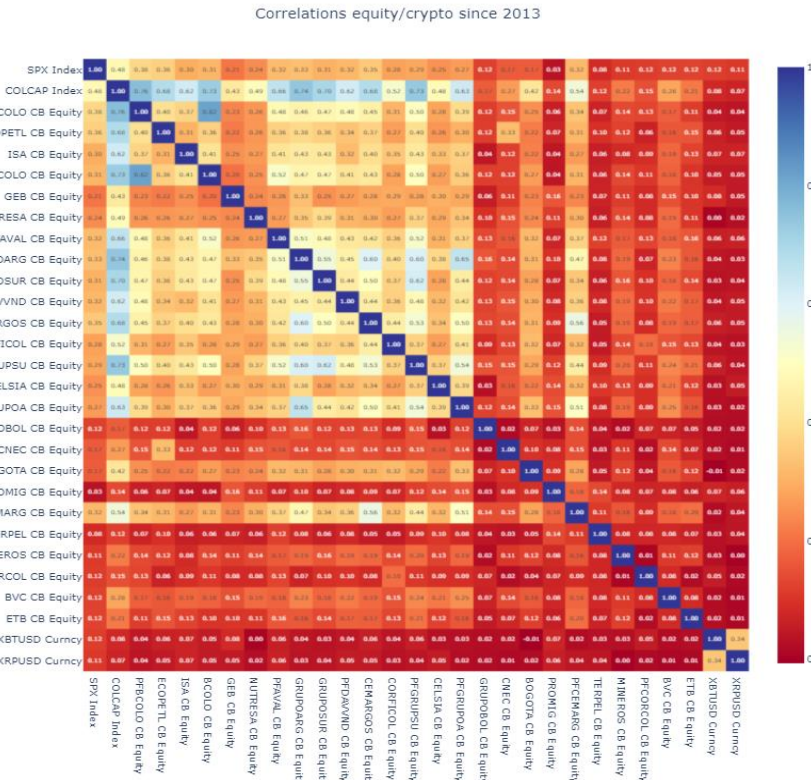
Las Figuras 2 a 6 muestran, respectivamente, *heat maps* de las correlaciones criptoactivos/equity en las cinco ventanas de tiempo asignadas.

Figura 2. Heat map de la correlación criptoactivos/equity desde 2010



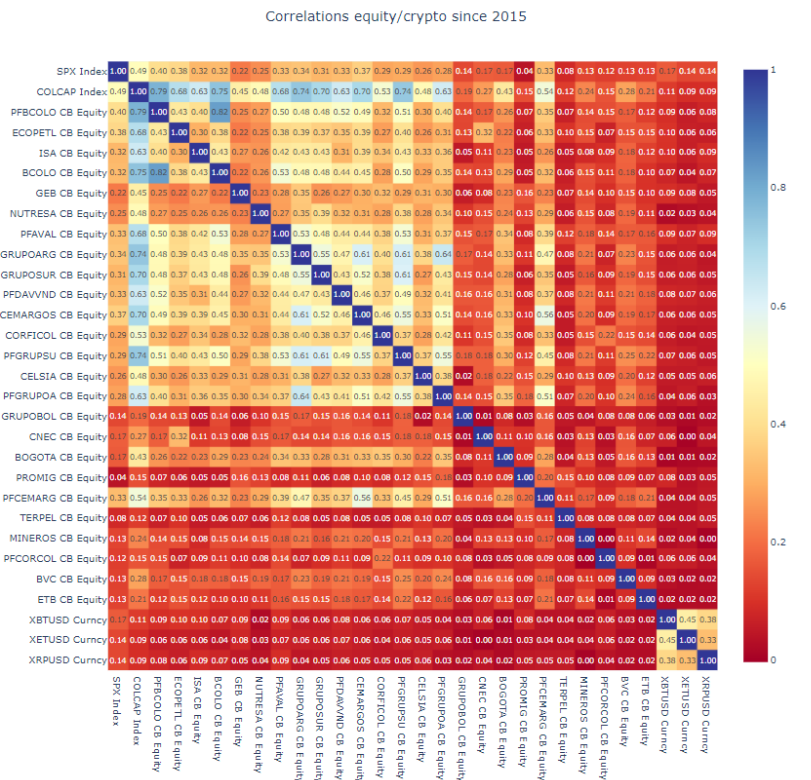
Fuente: elaboración del autor.

Figura 3. Heat map de la correlación criptoactivos/equity desde 2013



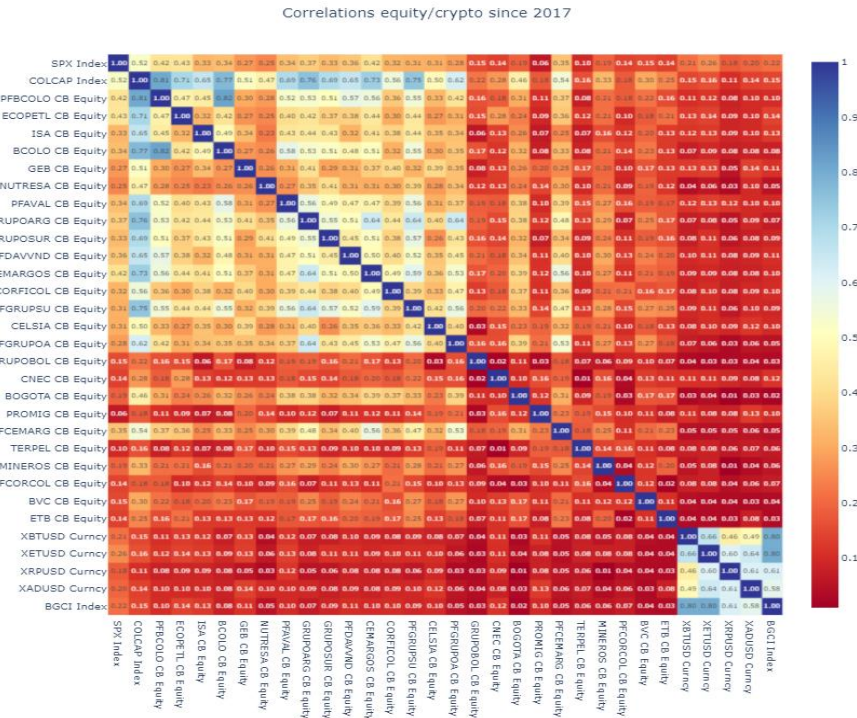
Fuente: elaboración del autor.

Figura 4. Heat map de la correlación criptoactivos/equity desde 2015



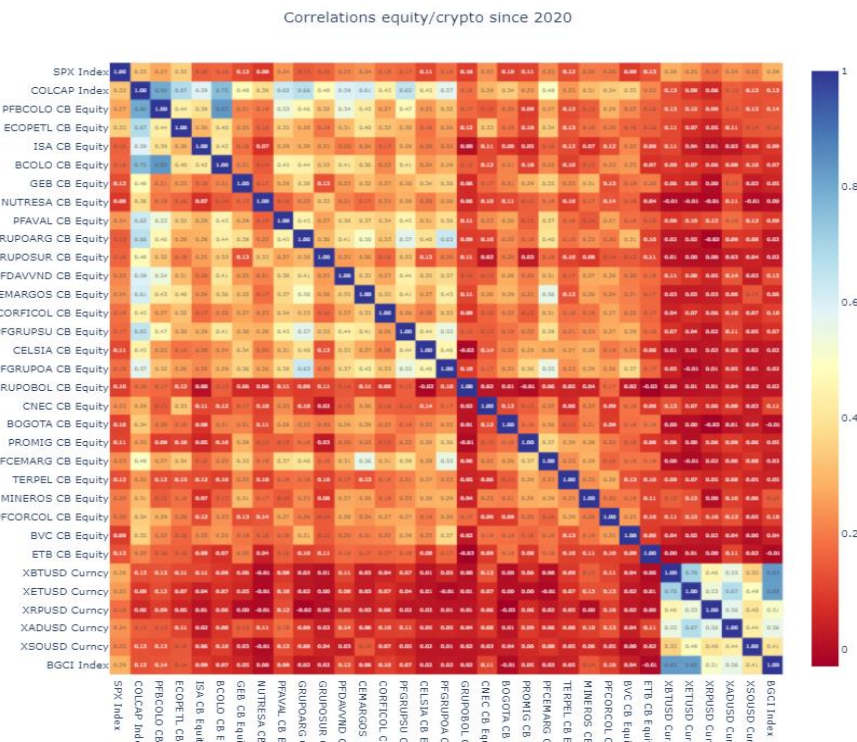
Fuente: elaboración del autor.

Figura 5. Heat map de la correlación criptoactivos/equity desde 2017



Fuente: elaboración del autor.

Figura 6. Heat map de la correlación criptoactivos/equity desde 2020



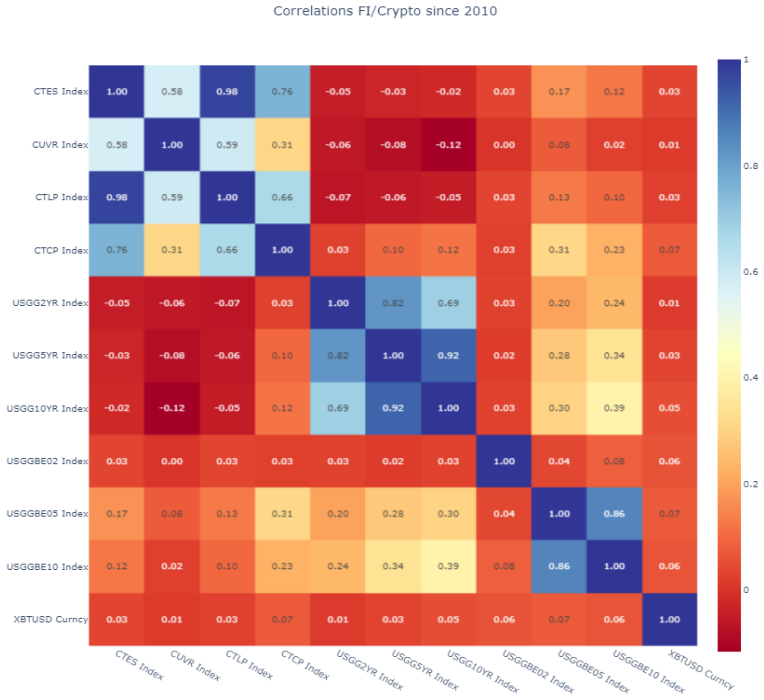
Fuente: elaboración del autor.

El análisis de correlaciones sugiere que a pesar de que en los últimos años se ha incrementado la correlación entre la renta variable tanto local como internacional y los activos digitales, aún continúa siendo baja. Si se conformara un portafolio únicamente con estos dos activos, probablemente la conclusión sería que los criptoactivos ofrecen bondades de diversificación. Cabe destacar que tampoco se encuentran correlaciones segregando el equity por sectores. Adicionalmente, la inclusión de activos digitales no incrementa exponencialmente las correlaciones.

4.1.2 Correlaciones de la renta fija frente a los criptoactivos

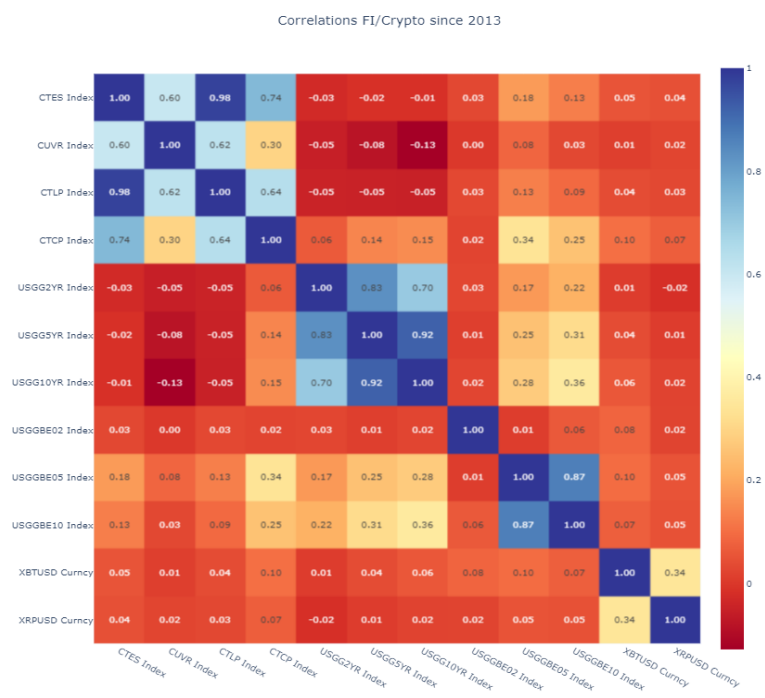
Las Figuras 7 a 11 muestran, respectivamente, heat maps de las correlaciones criptoactivos/renta fija más inflación en las cinco ventanas de tiempo asignadas.

Figura 7. Heat map de la correlación criptoactivos/renta fija desde 2010



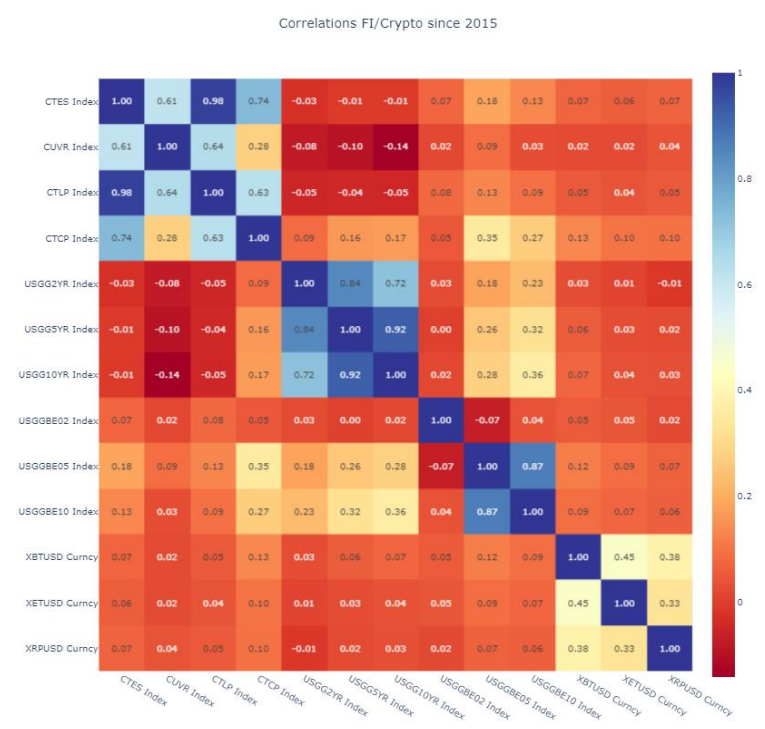
Fuente: elaboración del autor.

Figura 8. Heat map de la correlación criptoactivos/renta fija desde 2013



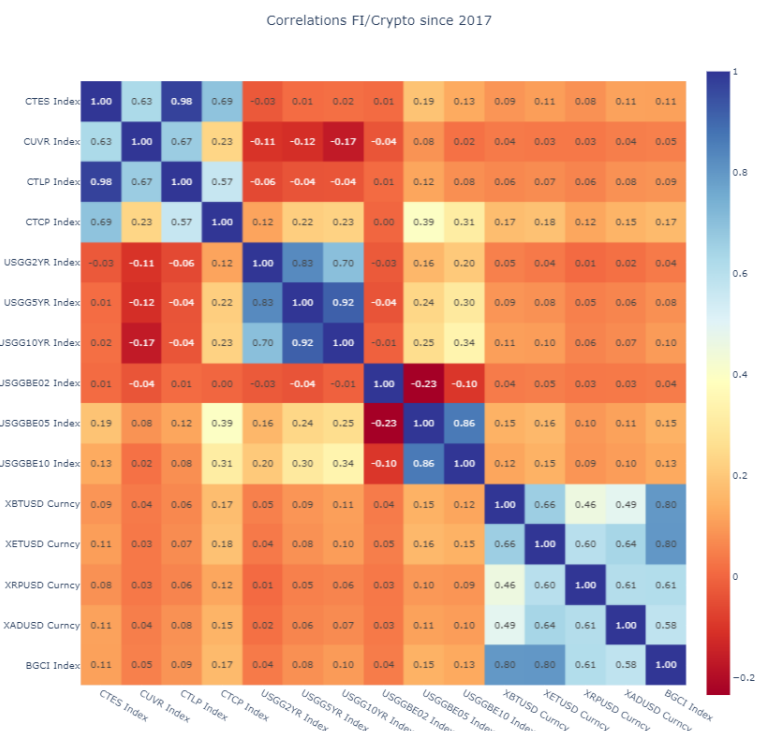
Fuente: elaboración del autor.

Figura 9. Heat map de la correlación criptoactivos/renta fija desde 2015



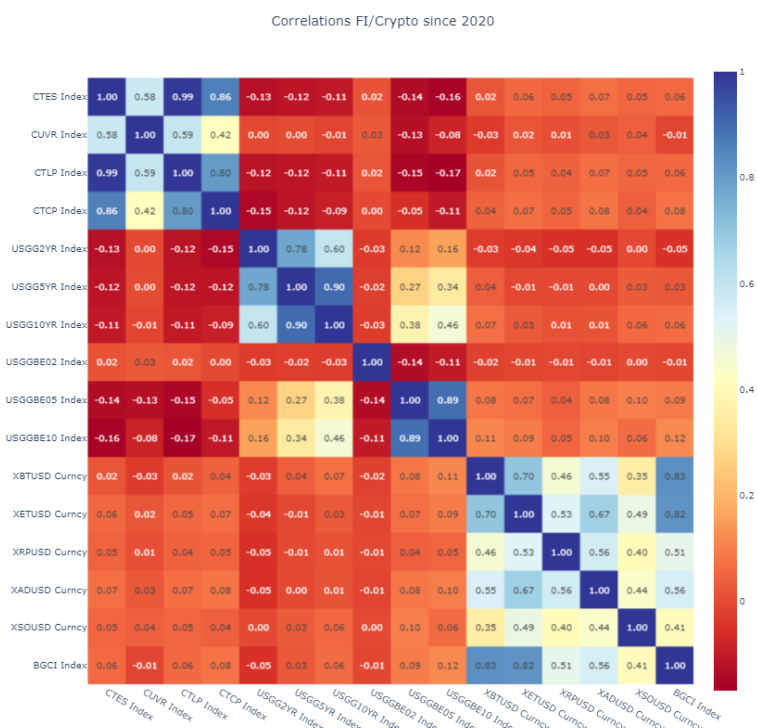
Fuente: elaboración del autor.

Figura 10. Heat map de la correlación criptoactivos/renta fija desde 2017



Fuente: elaboración del autor.

Figura 11. Heat map de la correlación criptoactivos/renta fija desde 2020



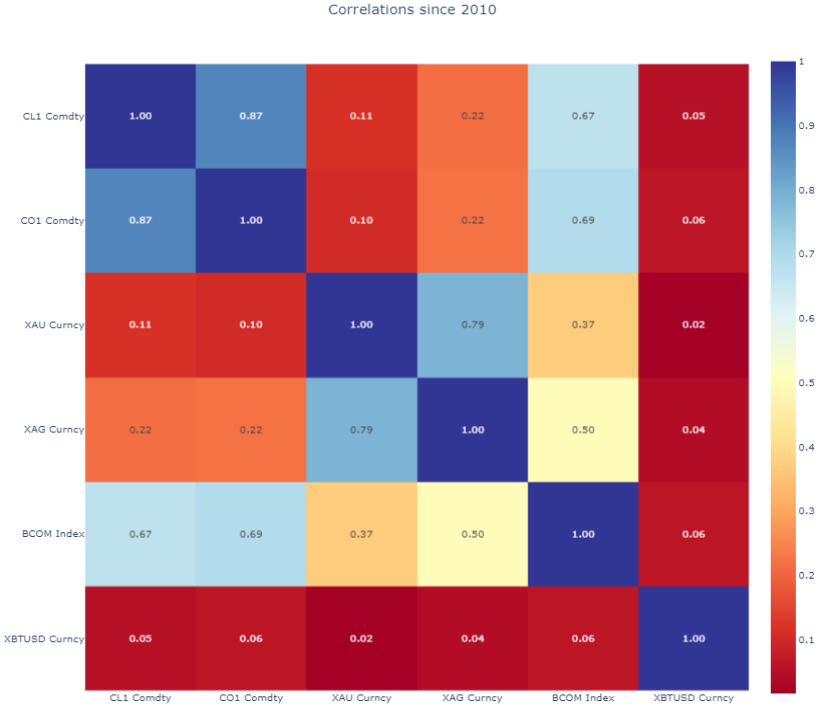
Fuente: elaboración del autor.

Los resultados para la renta fija e inflación frente a los criptoactivos resultan más interesantes que los de renta fija frente a estos. Para el caso de tasas locales e internacionales, se observa que las correlaciones desde 2010 son muy cercanas a 0, implicando que no existe una relación lineal entre ambas clases de activos; incluso, con el paso de los años, estas se mantienen estructuralmente bajas. En el comparativo entre inflaciones medidas vía *breakevens inflations* y TES UVR tampoco observan relaciones lineales positivas ni negativas, lo que permite concluir que los criptoactivos no son un buen vehículo de cobertura contra la inflación.

4.1.3 Correlaciones de los commodities frente a los criptoactivos

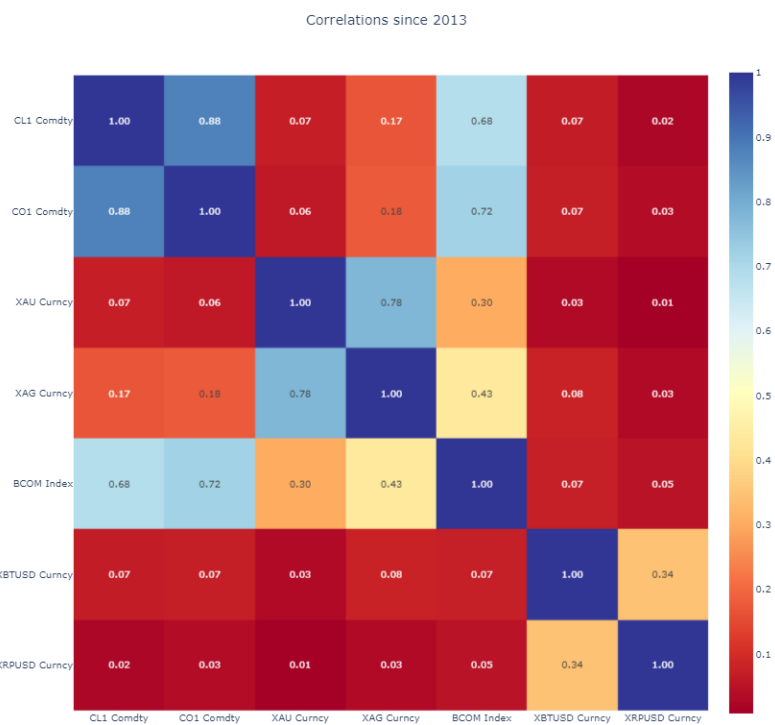
Las Figuras 12 a 16 muestran, respectivamente, heat maps de las correlaciones criptoactivos/commodities en las cinco ventanas de tiempo asignadas.

Figura 12. Heat map de la correlación criptoactivos/commodities desde 2010



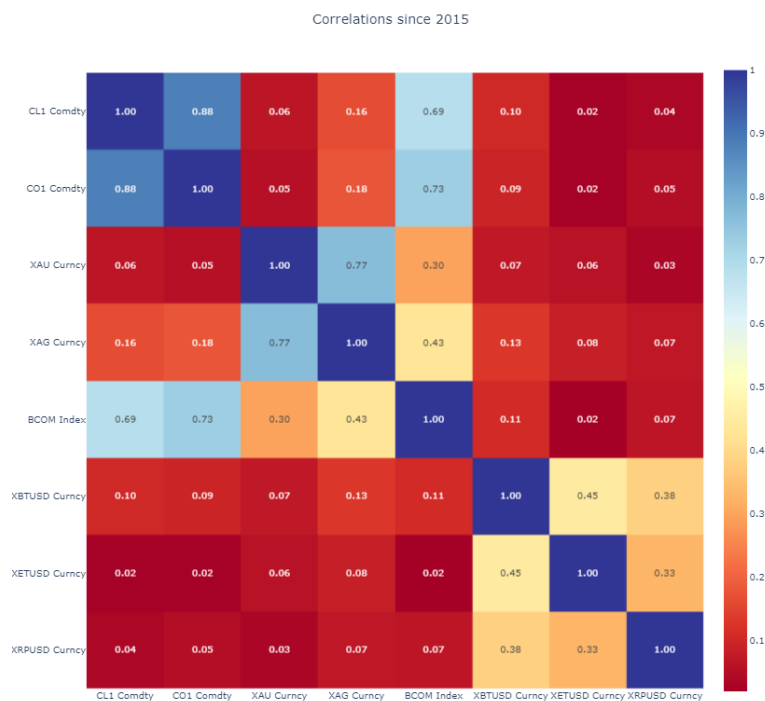
Fuente: elaboración del autor.

Figura 13. Heat map de la correlación criptoactivos/commodities desde 2013



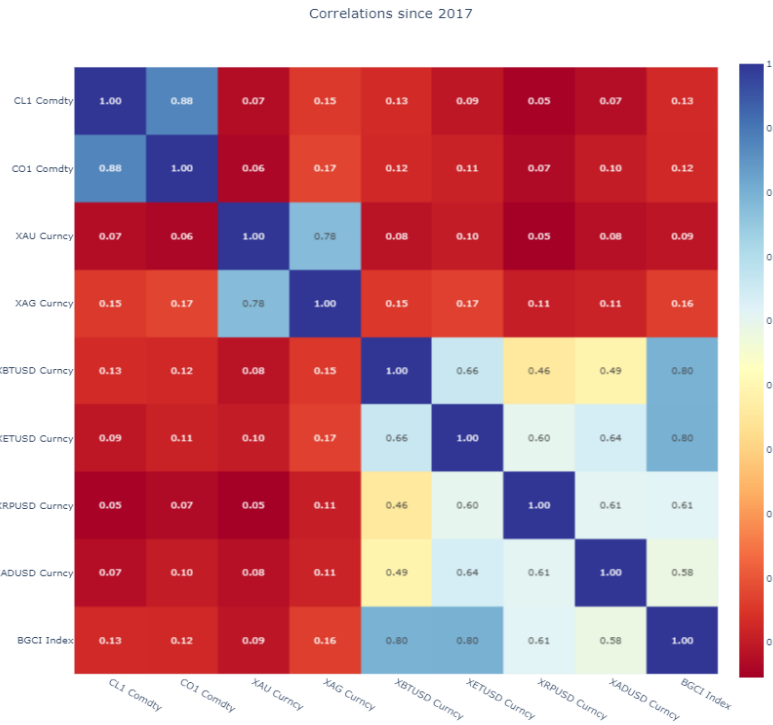
Fuente: elaboración del autor.

Figura 14. Heat map de la correlación criptoactivos/commodities desde 2015



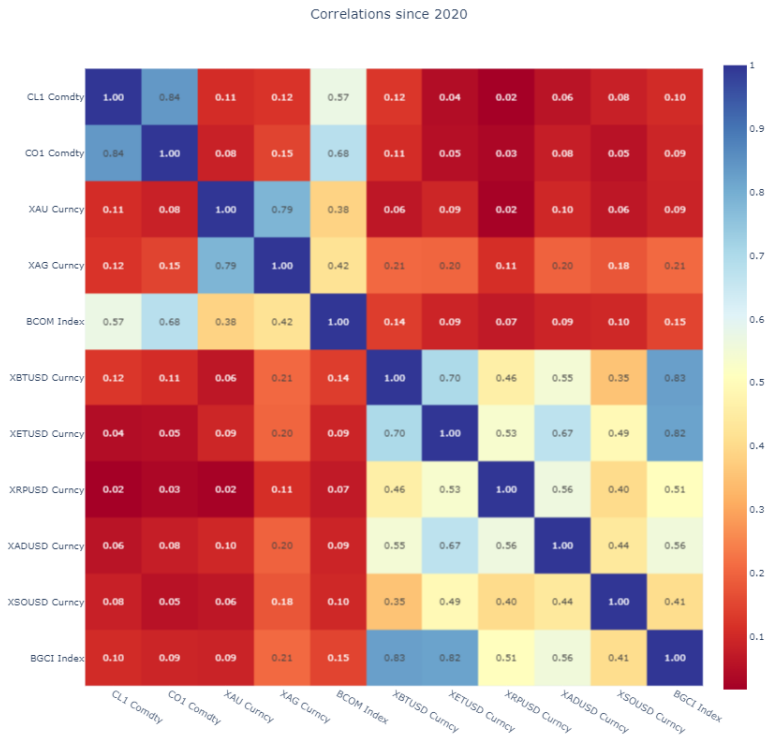
Fuente: elaboración del autor.

Figura 15. Heat map de la correlación criptoactivos/commodities desde 2017



Fuente: elaboración del autor.

Figura 16. Heat map de la correlación criptoactivos/commodities desde 2020



Fuente: elaboración del autor.

Realizando el mismo análisis comparativo entre los criptoactivos y los commodities, se observan resultados similares a las otras clases de activos, esto es, se mantienen relaciones lineales estructuralmente bajas. El activo que presenta una mayor correlación con los activos digitales es la plata (XAG), arrojando un resultado promedio de 0,20 para la última ventana de tiempo analizada; sin embargo, a pesar de la baja relación entre los activos, resulta interesante observar que es en la única clase en la cual en ningún momento se presentan correlaciones negativas, sugiriendo de esta manera una mayor linealidad positiva con los criptoactivos.

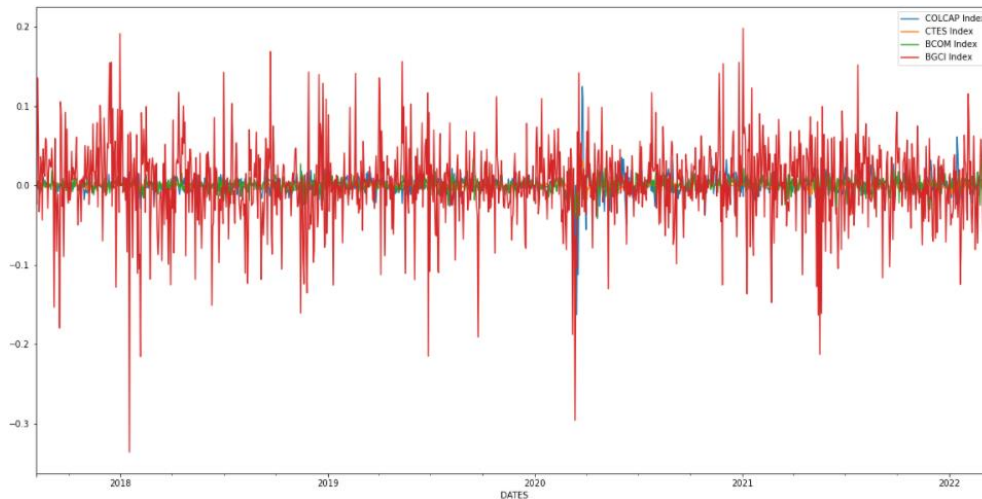
El gran hallazgo en el análisis de correlaciones entre todos los diferentes tipos de activos se presenta en que se logra demostrar que las bajas correlaciones ofrecen bondades diversificadoras. Por otro lado, se infiere que no se podría lograr una cobertura de los activos tradicionales utilizando criptoactivos. Ante posibles escenarios de estrés en el mercado, resulta poco probable que estos activos funcionen como un activo refugio.

Adicionalmente, resulta relevante incorporar en el análisis que los últimos años han sido atípicos en todo sentido a nivel de mercado, incluso a tal punto que en 2020 los precios del petróleo se tornaron en terreno negativo dado el exceso de oferta y los costos de almacenamiento. Por lo anterior, se presenta una fuerte dualidad, ya que es en estos últimos períodos donde más data se encuentra disponible para realizar los estadísticos. Realizando un análisis tendencial, se observa que, con el paso de los años, las correlaciones tanto negativas como positivas se han incrementado, lo cual podría significar que dentro de algunos años, con datos más robustos y bajo el supuesto de normalidad en el mercado, se logren observar unas correlaciones más estrechas.

4.2 Optimización de los portafolios

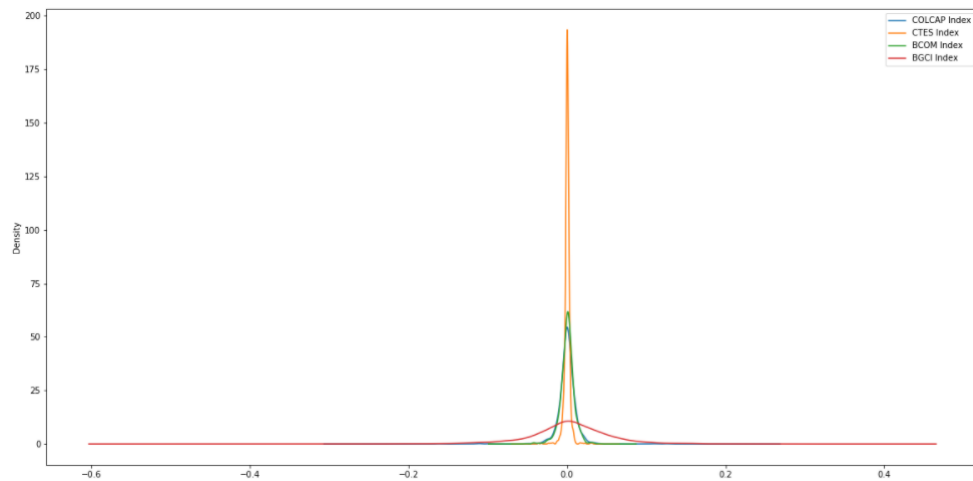
Antes de comenzar a analizar la forma cómo impactan los criptoactivos en los portafolios, se realizaron cálculos por cada clase de activo. El primer paso fue hallar los retornos en logaritmo natural y su distribución (densidades) de probabilidad [Figuras 17 y 18, respectivamente].

Figura 17. Retornos logarítmicos por clase de activo



Fuente: elaboración del autor.

Figura 18. Distribución de probabilidad de los retornos por clase de activo



Fuente: elaboración del autor.

Se observa que ninguno de los activos elegidos recae en escenarios superiores a 2 sigma. La clase de activo que tiene unas colas más pesadas es el BGCI, lo que indica una mayor probabilidad de que los precios se ubiquen en escenarios extremos; por ende, sugiere que es el activo de mayor volatilidad. El resto de activos se asemejan a una distribución normal, ponderando una baja probabilidad de eventos de cola.

Los retornos esperados anualizados individuales por clase de activo (*asset class*) se muestran en la Figura 19.

Figura 19. Cuadro resumen 1. Retornos anualizados por clase de activo

```
'COLCAP Index Retorno esperado anualizado': 0.01,  
'CTES Index Retorno esperado anualizado': 0.034,  
'BCOM Index Retorno esperado anualizado': 0.088,  
'BGCI Index Retorno esperado anualizado': 0.637}
```

Fuente: elaboración del autor a partir de Python™.

Los retornos esperados anualizados por asset class más altos fueron los de los criptoactivos, en línea con la premisa básica fundamental de las finanzas: a mayor riesgo, mayor retorno esperado. Para el caso del índice Colcap, se presenta un retorno marginalmente positivo. El bajo desempeño de este índice es explicado en gran medida por el período de marzo de 2020, donde logro caer 47 % y, dos años más tarde, el índice aún no ha logrado recuperarse del exacerbado retroceso motivado por la COVID-19 [Figura 20].

Figura 20. Cuadro resumen 2. Ratio de Sharpe por clase de activo

```
{'COLCAP Index Sharpe Ratio': -0.073,  
'CTES Index Sharpe Ratio': 0.155,  
'BCOM Index Sharpe Ratio': 0.453,  
'BGCI Index Sharpe Ratio': 0.747}
```

Fuente: elaboración del autor a partir de Python™.

El ratio de Sharpe por activo es congruente con los resultados de los retornos esperados. Se observa que los activos con mayor ratio son los digitales y el Colcap; incluso arroja un resultado negativo, indicando que su rendimiento fue menor que el activo libre de riesgo utilizado (Bonos del Tesoro de Estados Unidos a 10 años, UST10Y).

4.2.1 Portafolio conservador

Para este portafolio se realizaron un millón de simulaciones para encontrar los pesos óptimos, dadas las siguientes restricciones:

$$0 \geq \text{Colcap Index} \leq 30 \%$$

$$0 \geq \text{COLTES Index} \leq 50 \%$$

$$0 \geq \text{BCOM Index} \leq 10 \%$$

$$0 \geq \text{BGCI Index}$$

No se restringió el límite superior de los criptoactivos, ya que si se establecían límites máximos en todos los activos, el modelo arrojaba un óptimo de pesos igual a las restricciones dadas [Figuras 21, 22 y 23].

Portafolio conservador de mínima varianza

Figura 21. Cuadro resumen 3. Pesos del portafolio conservador de mínima varianza

```
{'COLCAP Index weight': 0.292,  
'CTES Index weight': 0.499,  
'BCOM Index weight': 0.098,  
'BGC Index weight': 0.11}
```

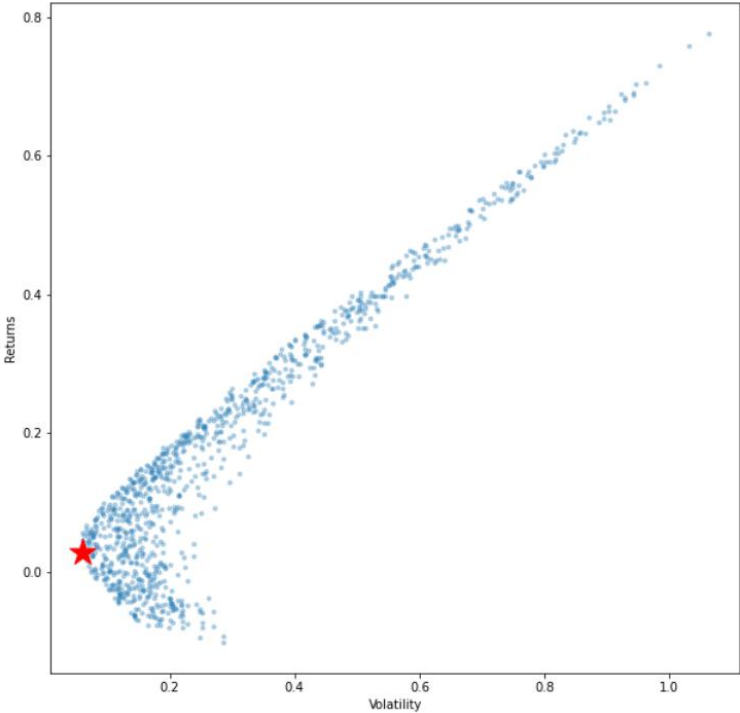
Fuente: elaboración del autor a partir de Python™.

Figura 22. Cuadro resumen 4. Análisis del portafolio conservador de mínima varianza

```
#####  
##### Analisis portafolio min variance #####  
#####  
La varianza anualizada del portafolio es: 1.7%  
La volatilidad anualizada del portafolio es: 13.2%  
El retorno esperado del portafolio es: 9.9%  
El ratio de sharpe portafolio es: 0.6
```

Fuente: elaboración del autor a partir de Python™.

Figura 23. Portafolios óptimos conservadores de mínima varianza



Fuente: elaboración del autor.

La solución discreta del portafolio óptimo no permite apalancamiento. El modelo llena casi en su totalidad los límites establecidos y queda poco rango de optimización. A pesar de que este es el portafolio de mínima varianza, la volatilidad anualizada logra ubicarse en niveles de 13,2 %. Los retornos esperados del portafolio son inferiores a la volatilidad. Bajo este perfil de riesgo y minimización, se puede inferir que no es la solución óptima. El componente Criptoactivos aporta un mayor riesgo al portafolio, sumado a un mal performance del componente de renta variable, llegando a un escaso retorno esperado de 9,9 % [Figuras 24, 25 y 26].

Portafolio conservador de máximo ratio de Sharpe

Figura 24. Cuadro resumen 5. Pesos del portafolio conservador de máximo ratio de Sharpe

Returns	0.287039
Volatility	0.343813
COLCAP Index weight	0.004491
CTES Index weight	0.485961
BCOM Index weight	0.098374
BGCI Index weight	0.411174
SharpeRatio	0.762154

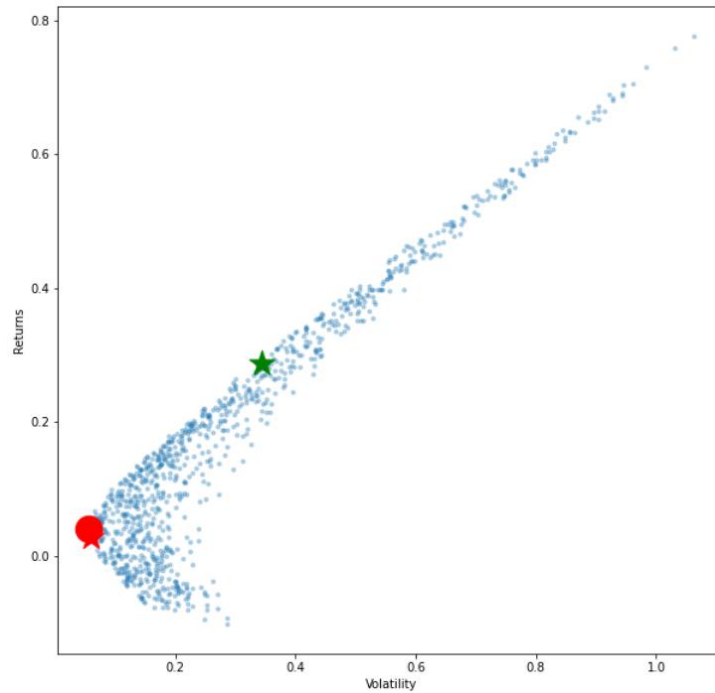
Fuente: elaboración del autor a partir de Python™.

Figura 25. Cuadro resumen 6. Análisis del portafolio conservador de máximo ratio de Sharpe

```
#####
##### Analisis portafolio max Ratio Sharpe #####
#####
La varianza anualizada del portafolio es: 11.8%
La volatilidad anualizada del portafolio es: 34.4%
El retorno esperado del portafolio es: 28.7%
El ratio de sharpe portafolio es: 0.8
```

Fuente: elaboración del autor a partir de Python™.

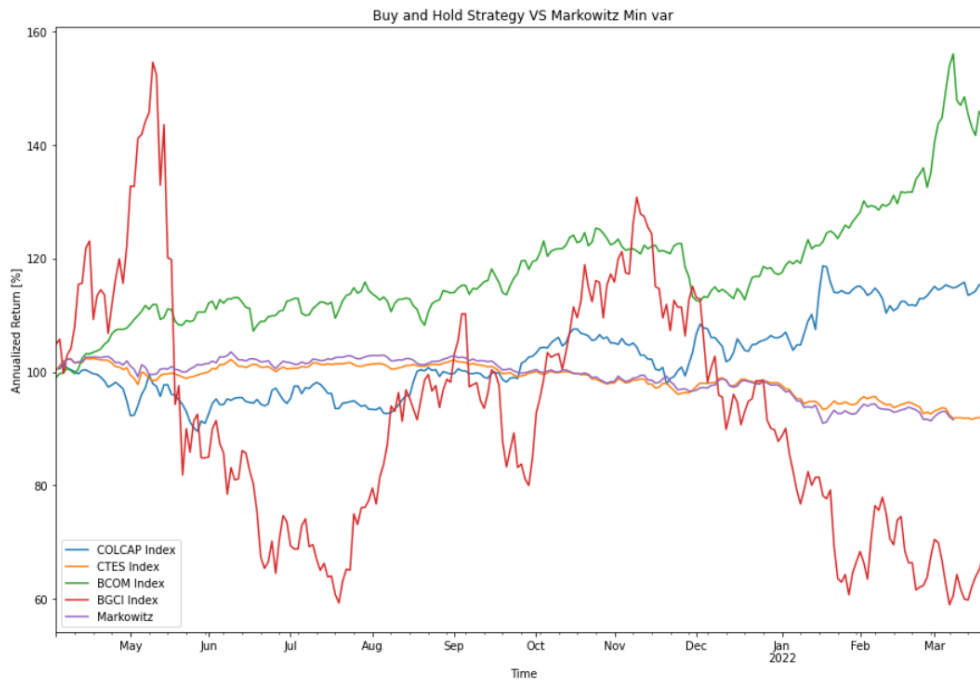
Figura 26. Portafolios óptimos conservadores de máximo ratio de Sharpe



Fuente: elaboración del autor.

La solución óptima maximizando el ratio de Sharpe mejora exponencialmente el perfil de eficiencia del portafolio. En este caso, el modelo le da un peso cercano a 0 al Colcap y realiza una mayor ponderación al BGCI; el resto de activos los llena casi en su totalidad vía restricciones. Este mayor peso que se les da a los criptoactivos mejora tangencialmente el retorno esperado del portafolio; sin embargo, es importante resaltar que aún sigue siendo mayor la volatilidad anualizada del portafolio. Respecto al ratio de Sharpe, este solo mejora en dos puntos básicos por esta vía de optimización [Figura 27].

Figura 27. Backtesting del portafolio conservador de mínima varianza



Fuente: elaboración del autor.

Realizando el *backtesting* del portafolio de mínima varianza frente a cada clase de activos individualmente, este logra ubicarse solo por encima de los criptoactivos. Se concluye que para este perfil de riesgo, los criptoactivos empeoran la eficiencia del portafolio e incrementan de manera exacerbada su volatilidad; esto no se ve reflejado en sus retornos.

Benchmark del portafolio conservador

Para el caso del benchmark, se elimina del portafolio la clase Criptoactivos [Figuras 28 a 34]. Las nuevas restricciones del portafolio son las siguientes:

$$0 \geq \text{Colcap Index} \leq 30 \%$$

$$0 \geq \text{COLTES Index} \leq 50 \%$$

$$0 \geq \text{BCOM Index}$$

Figura 28. Cuadro resumen 7. Pesos del benchmark conservador de mínima varianza

```
'COLCAP Index weight': 0.072,  
'CTES Index weight': 0.5,  
'BCOM Index weight': 0.428}
```

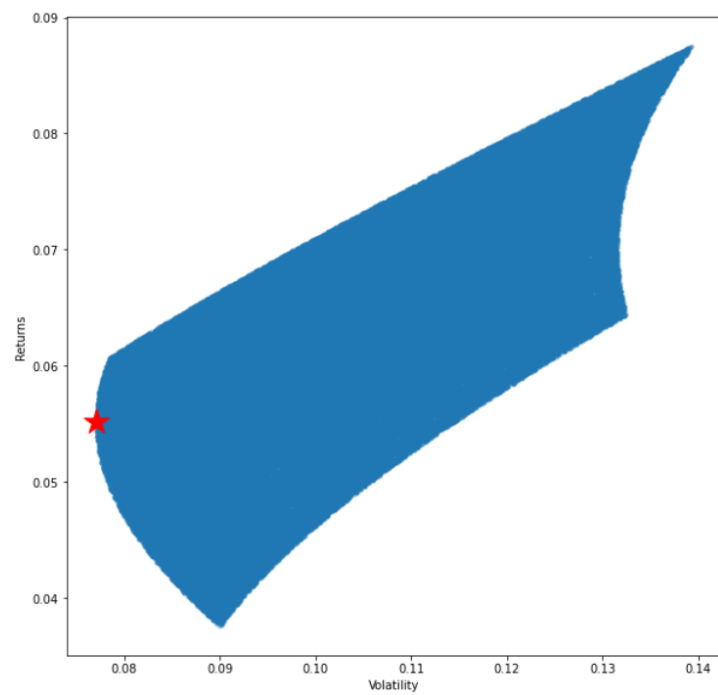
Fuente: elaboración del autor a partir de Python™.

Figura 29. Cuadro resumen 8. Análisis del benchmark conservador de mínima varianza

```
#####
##### Analisis portafolio min variance #####
#####
La varianza anualizada del portafolio es: 0.6%
La volatilidad anualizada del portafolio es: 7.7%
El retorno esperado del portafolio es: 5.5%
El ratio de sharpe portafolio es: 0.4
```

Fuente: elaboración del autor a partir de Python™.

Figura 30. Portafolios óptimos del benchmark conservador



Fuente: elaboración del autor.

Figura 31. Cuadro resumen 9. Pesos del benchmark conservador de máximo ratio de Sharpe

Returns	0.068025
Volatility	0.093448
COLCAP Index weight	0.00023
CTES Index weight	0.363681
BCOM Index weight	0.636296
SharpeRatio	0.460419

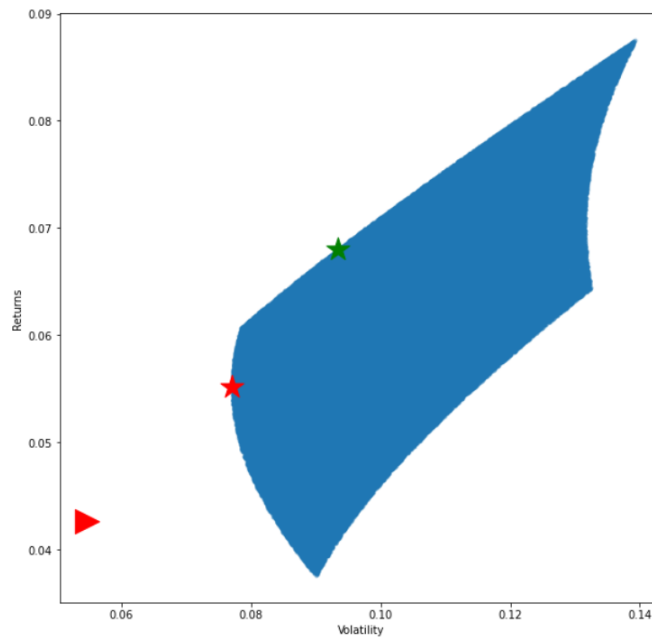
Fuente: elaboración del autor a partir de Python™.

Figura 32. Cuadro resumen 10. Análisis del benchmark conservador de máximo ratio de Sharpe

```
#####
##### Analisis portafolio max Ratio Sharpe #####
#####
La varianza anualizada del portafolio es: 0.9%
La volatilidad anualizada del portafolio es: 9.3%
El retorno esperado del portafolio es: 6.8%
El ratio de sharpe portafolio es: 0.5
```

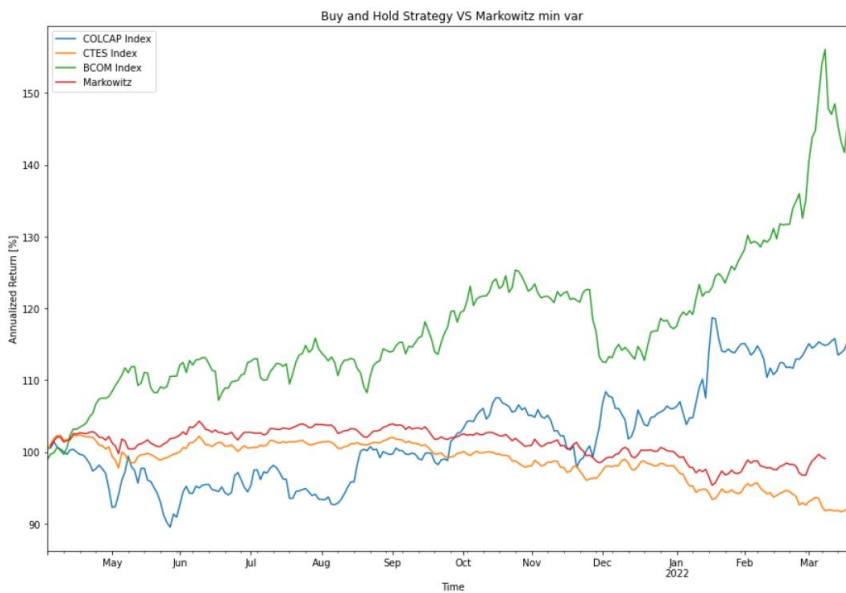
Fuente: elaboración del autor a partir de Python™.

Figura 33. Portafolios óptimos del benchmark conservador de máximo ratio de Sharpe



Fuente: elaboración del autor.

Figura 34. Backtesting del benchmark conservador de mínima varianza



Fuente: elaboración del autor.

Realizando el comparativo entre ambos portafolios conservadores bajo los dos métodos de optimización se obtiene un mayor retorno esperado cuando se incluye el componente Criptoactivos; sin embargo, en términos de retorno anualizado, tiene un mejor retorno anualizado el benchmark y, en términos de la eficiencia riesgo/retorno, incluir el BICI mejora potencialmente el portafolio. Es claro a simple vista que la fuerte baja de los criptoactivos de este año empeora el retorno absoluto del portafolio.

4.2.2 Portafolio moderado

En el caso del portafolio moderado no se realizó optimización y se asignaron pesos iguales (*equally weighted*) a cada clase de activo: 25 % [Figura 35].

Figura 35. Cuadro resumen 11. Análisis del portafolio moderado (equally weighted)

```
#####
##### Analisis portafolio equally weighted #####
#####
La varianza anualizada del portafolio es: 5.4%
La volatilidad anualizada del portafolio es: 23.2%
El retorno esperado del portafolio es: 19.2%
El ratio de sharpe portafolio es: 0.7
```

Fuente: elaboración del autor a partir de Python™.

Los resultados de este portafolio se ubican entre un punto medio del conservador. Claramente, el hecho de ponderar los activos iguales ayuda a mejorar el retorno esperado del portafolio; sin embargo, no alcanza a superar la eficiencia riesgo/retorno presentada en el conservador de máximo ratio de Sharpe; de hecho, la diferencia es casi de 10 %.

Benchmark del portafolio moderado

Al igual que en el benchmark del portafolio conservador, se elimina el componente del BICI y se ponderan los pesos iguales de los tres activos remanentes, quedando de esta manera cada uno con una ponderación de 33,3333 % [Figura 36].

Figura 36. Cuadro resumen 12. Análisis del benchmark moderado (equally weighted)

```
#####  
##### Analisis portafolio equally weighted #####  
#####  
La varianza anualizada del portafolio es: 1.1%  
La volatilidad anualizada del portafolio es: 10.3%  
El retorno esperado del portafolio es: 4.4%  
El ratio de sharpe portafolio es: 0.2
```

Fuente: elaboración del autor a partir de Python™.

Comparado con los anteriores, el portafolio no optimizado y ponderado con iguales pesos presenta el retorno esperado más bajo. Incluso, sin realizar optimizaciones y ponderando pesos iguales, resulta más beneficioso incluir el componente del BGCI para mejorar su eficiencia.

4.2.3 Portafolio de mayor riesgo

Para la optimización de este perfil de riesgo, se liberan la mayoría de restricciones en el modelo, poniendo así solo un límite superior a los activos de renta fija. Si no se establece este techo al momento de minimizar la varianza el portafolio, se acortaría en todos los activos y realizaría la mayor ponderación en el COLTES, siendo este el de menor sigma del portafolio. Se corrieron un millón de simulaciones y se permitieron las ventas en corto; de esta manera se pueden financiar activamente los activos de mejor retorno con los de peor retorno [Figuras 37, 38 y 39].

Portafolio con mayor riesgo de mínima varianza

Figura 37. Cuadro resumen 13. Pesos con mayor riesgo de mínima varianza

```
'COLCAP Index weight': 0.183,  
'CTES Index weight': 0.196,  
'BCOM Index weight': 0.612,  
'BGCI Index weight': 0.01}
```

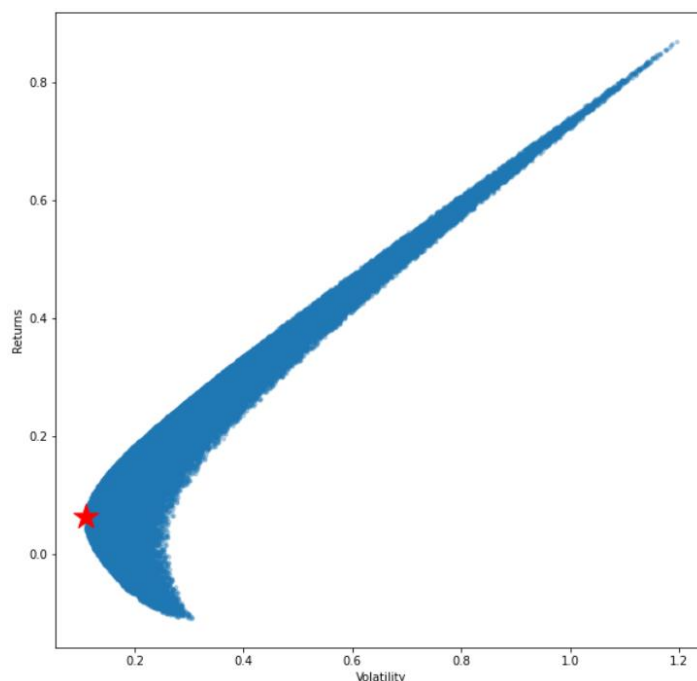
Fuente: elaboración del autor a partir de Python™.

Figura 38. Cuadro resumen 14. Análisis con mayor riesgo de mínima varianza

```
#####
##### Analisis portafolio min variance #####
#####
La varianza anualizada del portafolio es: 1.2%
La volatilidad anualizada del portafolio es: 10.9%
El retorno esperado del portafolio es: 6.8%
El ratio de sharpe portafolio es: 0.4
```

Fuente: elaboración del autor a partir de Python™.

Figura 39. Portafolios óptimos con mayor riesgo de mínima varianza



Fuente: elaboración del autor.

Como era de esperarse, la ponderación asignada al componente Criptoactivos se reduce al máximo, teniendo en cuenta que la minimización busca obtener la menor volatilidad posible del portafolio, y esta clase de activo es la de mayor sigma en el portafolio. Sorprende la escasa diferencia en los retornos esperados entre el portafolio conservador de mínima varianza y el de mayor riesgo [Figuras 40, 41 y 42].

Portafolio con mayor riesgo de máximo ratio de Sharpe

Figura 40. Cuadro resumen 15. Pesos con mayor riesgo de máximo ratio de Sharpe

```
{'COLCAP Index weight': -0.162,  
'CTES Index weight': 0.196,  
'BCOM Index weight': 0.743,  
'BGC I Index weight': 0.223}
```

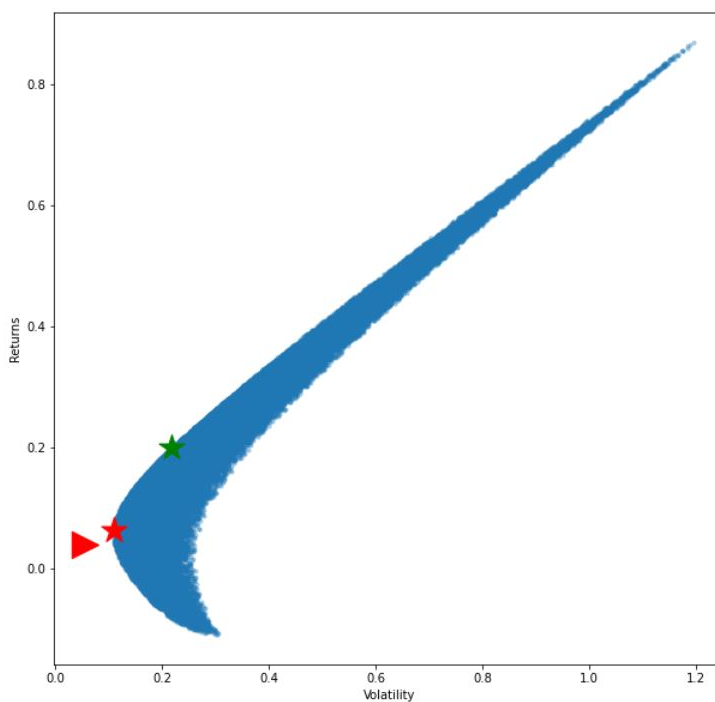
Fuente: elaboración del autor a partir de Python™.

Figura 41. Cuadro resumen 16. Análisis con mayor riesgo de máximo ratio de Sharpe

```
#####  
##### Analisis portafolio max Ratio Sharpe #####  
#####  
La varianza anualizada del portafolio es: 4.8%  
La volatilidad anualizada del portafolio es: 21.8%  
El retorno esperado del portafolio es: 21.2%  
El ratio de sharpe portafolio es: 0.9
```

Fuente: elaboración del autor a partir de Python™.

Figura 42. Portafolios óptimos mayor riesgo de máximo ratio de Sharpe



Fuente: elaboración del autor.

El portafolio riesgoso optimizado vía ratio de Sharpe se apalanca tomando una posición corta en el Colcap (16,2 %), para asignarle la mayor ponderación a la clase Commodities. Si se analiza el performance de este activo puntualmente, se observa que desde finales de 2020 se dio inicio al súper ciclo alcista de commodities, impulsado principalmente por su escasez de oferta, sumado a los problemas que se han venido presentando en los últimos años en las cadenas de suministros, que han ocasionado que se genere un incremento en los precios de estos activos vía la ley de oferta y demanda y una inflación que viene acelerándose fuertemente en los últimos meses. A pesar de que podría creerse que los criptoactivos tienen una mayor volatilidad y, por ende, un mejor retorno, si se analizan los movimientos en los commodities, estos han sido más estables y estructuralmente alcistas, mientras que los activos digitales han sufrido fuertes caídas en lo corrido de 2022. Se logra apreciar que este portafolio es el que tiene un *spread* más cerrado entre el riesgo y el retorno esperado. Además, es el portafolio que percibe un mayor ratio de Sharpe [Figuras 43 a 50].

Figura 43. Backtesting con mayor riesgo de mínima varianza



Fuente: elaboración del autor.

Benchmark del portafolio de mayor riesgo

Figura 44. Cuadro resumen 17. Pesos del benchmark con mayor riesgo de mínima varianza

```
{'COLCAP Index weight': 0.173,  
'CTES Index weight': 0.2,  
'BCOM Index weight': 0.628}
```

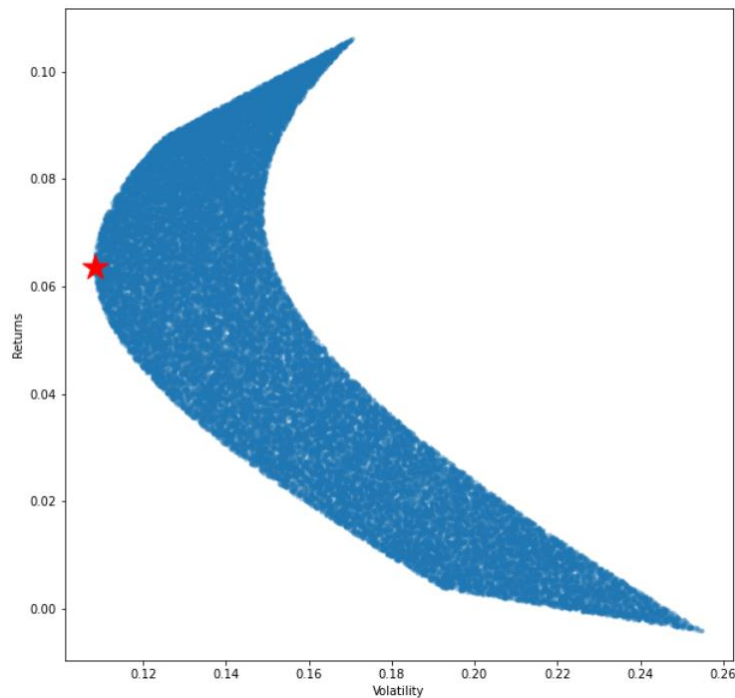
Fuente: elaboración del autor a partir de Python™.

Figura 45. Cuadro resumen 18. Análisis del benchmark con mayor riesgo de mínima varianza

```
#####  
##### Analisis portafolio min variance #####  
#####  
La varianza anualizada del portafolio es: 1.2%  
La volatilidad anualizada del portafolio es: 10.8%  
El retorno esperado del portafolio es: 6.3%  
El ratio de sharpe portafolio es: 0.4
```

Fuente: elaboración del autor a partir de Python™.

Figura 46. Portafolios óptimos del benchmark con mayor riesgo de mínima varianza



Fuente: elaboración del autor.

Figura 47. Cuadro resumen 19. Pesos del benchmark con mayor riesgo de máximo ratio de Sharpe

```
{'COLCAP Index weight': -0.142,  
'CTES Index weight': 0.195,  
'BCOM Index weight': 0.947}
```

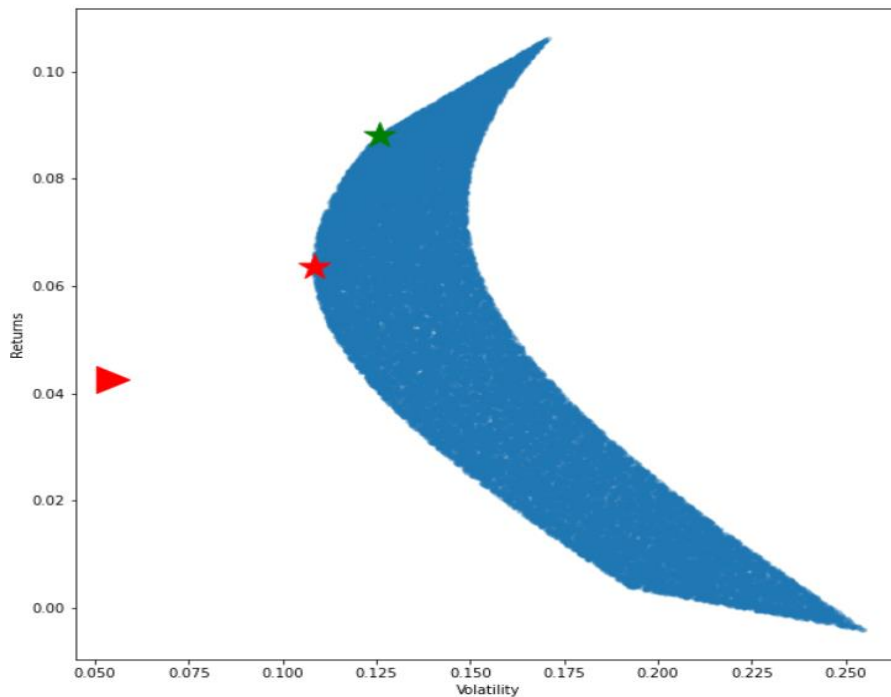
Fuente: elaboración del autor a partir de Python™.

Figura 48. Cuadro resumen 20. Análisis del benchmark con mayor riesgo de máximo ratio de Sharpe

```
#####  
##### Analisis portafolio max Ratio Sharpe #####  
#####  
La varianza anualizada del portafolio es: 1.6%  
La volatilidad anualizada del portafolio es: 12.6%  
El retorno esperado del portafolio es: 8.8%  
El ratio de sharpe portafolio es: 0.5
```

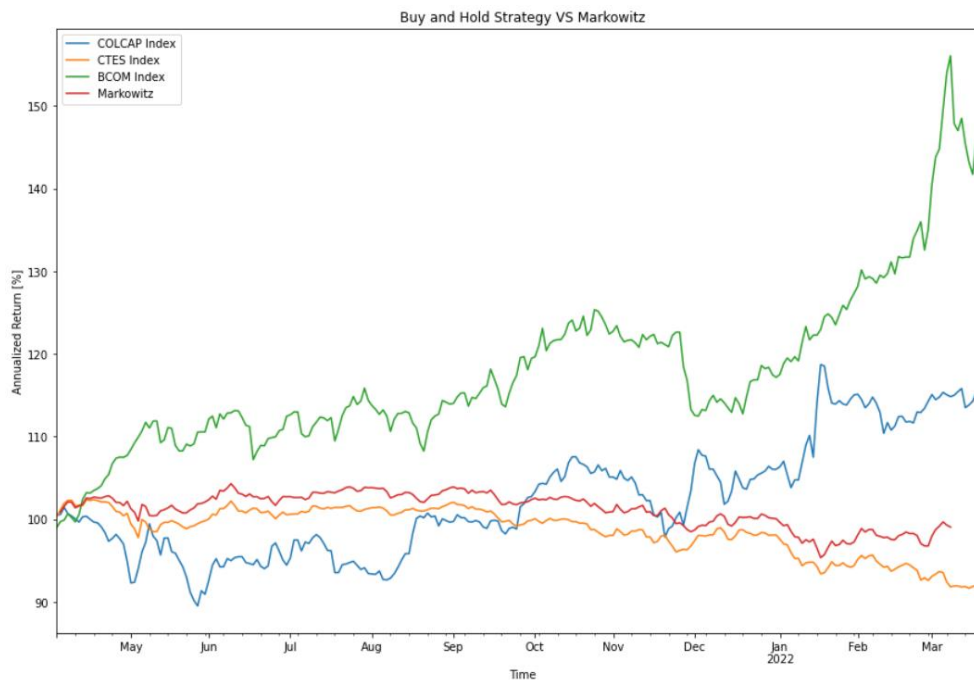
Fuente: elaboración del autor a partir de Python™.

Figura 49. Portafolios óptimos del benchmark con mayor riesgo de máximo ratio de Sharpe



Fuente: elaboración del autor.

Figura 50. Backtesting del benchmark mayor con mayor riesgo de mínima varianza



Fuente: elaboración del autor.

Realizando el comparativo entre el benchmark y el portafolio de mayor riesgo, las conclusiones son consistentes con los resultados obtenidos en el portafolio conservador. La inclusión de criptoactivos incrementa la volatilidad esperada del portafolio y, por ende, sus retornos. Sin embargo, al realizar el backtesting de la estrategia, resulta tener un mejor desempeño el benchmark, ya que el mal desempeño de los criptoactivos en el último año reducen significativamente los retornos anualizados del portafolio.

La Tabla 2 muestra el resumen de las estadísticas de los portafolios.

Tabla 2. Resumen de las estadísticas de los portafolios

Metodo	Optimizaciones	Portafolios			Benchmarks			Diferencias		
		CONSER	MODER	RIESGO	CONSER	MODER	RIESGO	CONSER	MODER	RIESGO
Min varianza	Erp min var	9,90%		6,80%	5,50%		6,30%	4,40%		0,50%
	Vol min var	13,20%		10,90%	7,70%		10,80%	5,50%		0,10%
	Sharpe	0,6		0,4	0,4		0,4	20,00%		0,00%
Max Sharpe	Erp max sharpe	28,70%	19,20%	21,20%	6,80%	4,40%	8,80%	21,90%	14,80%	12,40%
	Vol max sharpe	34,40%	23,20%	21,80%	9,30%	10,30%	12,60%	25,10%	12,90%	9,20%
	Sharpe	0,8	0,7	0,9	0,5	0,2	0,5	0,30	0,50	0,40

Fuente: elaboración del autor.

Se logra observar que los portafolios que tienen como componente activo el BGCÍ logran unos mayores retornos esperados, pero también una mayor volatilidad. El portafolio optimizado que recibe un mejor performance es el conservador, optimizando el máximo ratio de Sharpe –el que más restricciones tenía en el modelo–. La mejor relación riesgo/retorno la tiene el portafolio mayor riesgo optimizado por el ratio de Sharpe. Así, se logra concluir que la

inclusión de criptoactivos en los portafolios multiactivos mejora el perfil de retornos, lo que conlleva un mayor riesgo inherente.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Los criptoactivos presentan bajas correlaciones con los activos tradicionales, por lo que no se sugiere realizar cobertura de estos vía activos digitales. Si bien las correlaciones se han vuelto más visibles con el paso de los años y la inclusión de nuevos agentes en el mercado como los hedge funds, aún no se tienen elementos suficientes para demostrar co-movimiento o linealidades entre ellos. Los activos en los cuales se encontró una mayor correlación fueron los siguientes: (XAG), con una linealidad positiva de 21 %, y *breakevens inflations*, con una linealidad inversa entre los distintos nodos de aproximadamente -14 %.

A pesar de las pobres características de refugio seguro de crypto y su inestable relación con las expectativas de inflación basadas en el mercado, se logra demostrar que todavía esta opción no se encuentra correlacionada con la mayoría de las principales clases de activos en la sección. Por ende, se concluye que a pesar de sus altas volatilidades anuales y la ratio riesgo/retorno elevado, sí poseen bondades de diversificación en lo que compete a estructurar portafolios óptimos.

La ventana de tiempo analizada está marcada por fuertes volatilidades y períodos atípicos en el mercado. Desde el año en que se tiene un mejor perfil de datos comienzan a presentarse escenarios atípicos: COVID-19, choques inflacionarios por el lado de la oferta, problemas en las cadenas de suministros y conflictos geopolíticos que presionan aún más la inflación en general.

Al realizar el backtesting mediante una comparación *buy and hold*, se observa que el modelo tiene un performance relativo más bajo cuando se incluye el componente Criptoactivos que cuando no se utiliza. En gran parte, esto se debe al ciclo bajista en el cual se encuentran estos activos desde hace aproximadamente dos años, y al contar con este corto lapso de tiempo para realizar el análisis, esto afecta claramente el promedio de los retornos percibidos.

5.2 Recomendaciones

Realizar análisis de los componentes principales para determinar cuáles son los principales factores que afectan los criptoactivos y, de esta manera, realizar una mejor inclusión en un contexto de portafolios multiactivos.

Ampliar el análisis estadístico y econométrico, y realizar muestras de causalidad, colinealidad, homocedasticidad y heterocedasticidad.

Optimizar los portafolios con otros modelos más recientes, entre ellos el Black-Litterman.

6. Referencias

- Aljinović, Z., Marasović, B., & Šestanović, T. (2021). Cryptocurrency portfolio selection – a multicriteria approach. *Mathematics*, 9(14), s. pp. <https://doi.org/10.3390/math9141677>
- Bejarano Castillo, L. M., Díaz Tinoco, E., & Mesa Caballero, J., eds. (2019). *Caracterización del mercado de capitales colombiano: una perspectiva integral*. Bogotá: Asobancaria. <https://www.asobancaria.com/wp-content/uploads/dig-libro-mercado-de-capitales-colombiano-completo-14-de-agosto.pdf>
- Bradford D., J., & Miller, T. W. Jr. (2009). *Fundamentals of investments. Valuation and management* (5.ª ed.). Ciudad de Nueva York, NY: McGraw-Hill.
- Colombia, Presidencia de la República. (2011). *Decreto 857 de 2011*, “Por el cual se modifican los regímenes de inversión de los recursos de los fondos de cesantía y los de los fondos de pensiones obligatorias [...]”. Disponible en <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=41898>
- Corporate Finance Institute, CFI. (s. f.-a). *Expected return*. Disponible en <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/knowledge/trading-investing/expected-return/>
- Corporate Finance Institute, CFI. (s. f.-b). *What is a benchmark?* Disponible en <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/knowledge/trading-investing/benchmark/>
- Dwyer, G. P. (2015). The economics of bitcoin and similar private digital currencies. *Journal of Financial Stability*, 17, 81-91. <https://doi.org/10.1016/j.jfs.2014.11.006>
- Dyhrberg, A. H. (2016). Bitcoin, gold and the dollar – A GARCH volatility analysis. *Finance Research Letters*, 16, 85-92. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2015.10.008>
- Grinberg, R. (2012). Bitcoin: An innovative alternative digital currency. *Hastings Science and Technology Law Journal*, 4(1), 159-162. https://repository.uchastings.edu/hastings_science_technology_law_journal/vol4/iss1/3
- Guinda, M., & Bhattacharyya, R. (2021). Using principal component analysis on crypto correlations to build a diversified portfolio. *International Journal of Cryptocurrency Research*, 1(1), 26-50. <https://doi.org/10.51483/ijccr.1.1.2021.26-50>
- Hernández Lalinde, J. D., Espinoza Castro, J. F., & Peñalosa Tarrazona, M. E. (2018). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y

- suposiciones. *AVFT, Activos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, 37(5), 587-595.
- Hurtado Sánchez, N. V., & Hoyos Burbano, M. del M. (2020). *Estructuración de un portafolio óptimo de inversión en divisas latinoamericanas aplicando el modelo de Markowitz* [tesis de maestría, Universidad EAFIT, Medellín]. Disponible por descarga en <https://repository.eafit.edu.co/xmlui/handle/10784/17602>
- Ivanova, M., & Dospatliev, L. K. (2018). Application of Markowitz portfolio optimization on Bulgarian stock market from 2013 to 2016. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 117, s. pp. DOI10.12732/IJPAM.V117I2.5
- Kumar, A. S., & Ajaz, T. (2019). Co-movement in crypto-currency markets: Evidences from wavelet analysis. *Financial Innovation*, 5(1), s. pp. <https://doi.org/10.1186/s40854-019-0143-3>
- Latorre Uribe, E. (2019 2016). *Medidas de evaluación de desempeño de portafolio para sectores del S&P 500* [tesis de maestría, Universidad EAFIT, Medellín]. Disponible por descarga en <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/13568>
- Liu, M., Jotaki, H., & Takahashi, H. (2020). Analysis of the impact of crypto assets on portfolio risk-return performance. *JSAI Technical Report, Type 2 SIG*, issue BI-016, 10-13. https://doi.org/10.11517/jsaisigtwo.2020.BI-016_10
- Mangram, M. E. (2013). A simplified perspective of the Markowitz portfolio theory. *Global Journal of Business Research*, 7(1), 59-70. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=bth&AN=82211365&site=ehost-live>
- Qi, T., Wang, T., Zhu, J., & Bai, R. (2020). The correlation and volatility between bitcoin and the blockchain index. *International Journal of Crowd Science*, 4(2), 103-115. <https://doi.org/10.1108/IJCS-11-2019-0036>
- Ross, S. A., Westerfield, R. W., & Jaffe, J. (1995). *Corporate finance*. Burr Ridge, IL: Irwin Professional Publishing Co.
- Rudolph, H. P., & Sabat, J. (2016). *Building long-term portfolio benchmarks for pension funds in emerging economies*. Policy Research Working Paper n.º 7784. Washington, DC: World Bank. <https://doi.org/10.1596/1813-9450-7784>
- Sierra Uribe, Ó. M. (2012). *Índices bursátiles como estrategia de cobertura de riesgo en portafolios de renta variable en Colombia* [tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín]. Disponible por descarga en <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9695>
- Sparkline Capital (s. f.). Sitio web <https://www.sparklinecapital.com/>

- Tapscott, D., & Tapscott, A. (2017). *La revolución blockchain. Descubre cómo esta nueva tecnología transformará la economía global*. Zalla, Vizcaya, País Vasco: Deusto.
- Tobin, J. (1958). Liquidity preference as behavior towards risk. *The Review of Economic Studies*, 25(2), 65-86. <https://doi.org/10.2307/2296205>
- Wang, X., Chen, X., & Zhao, P. (2020). The relationship between bitcoin and stock market. *International Journal of Operations Research and Information Systems*, 11(2), 22-35. <https://doi.org/10.4018/ijoris.2020040102>