

**ESTUDIO PRELIMINAR SOBRE EL USO DE DRON DURANTE EL PROCESO
DE PAVIMENTACIÓN EN CAMINOS DE ASFÁLTO**

Esteban Díaz Baeza



Los Ángeles

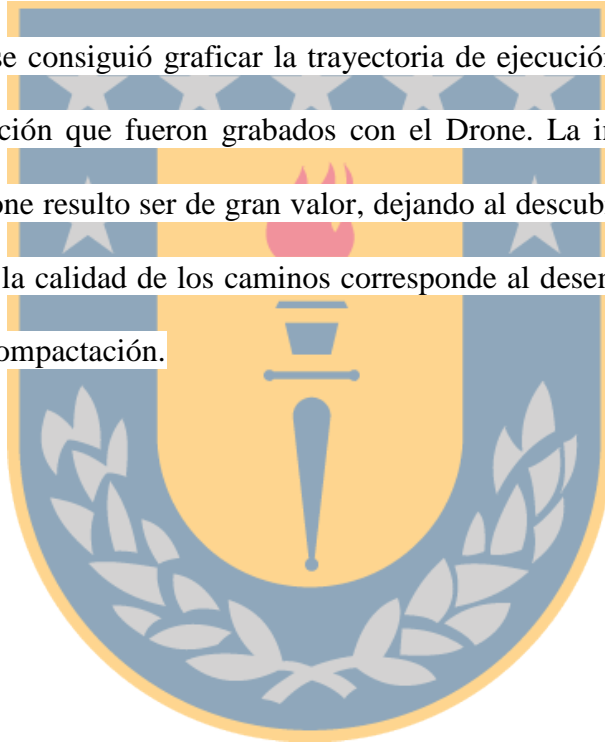
Marzo, 2019

Resumen

En Chile, el asfalto es el principal material utilizado en la pavimentación de caminos. Resulta necesario que la construcción de estos caminos se realice con rigurosos procedimientos de construcción. No obstante, las distintas etapas del proceso constructivo, entre ellas la pavimentación del camino, se ven influenciadas por diversos factores. De los cuales no todos son controlados a tiempo, lo que provoca que el producto finalmente entregado no tenga las características ideales para los cuales, los materiales de construcción fueron inicialmente fabricados. Esto implica el uso de herramientas y metodologías que permitan monitorear la etapa de pavimentación durante el proceso constructivo de una obra con el fin de detectar las acciones o factores que influyen en el desarrollo constructivo de los caminos de asfalto.

El uso de drones para este tipo de actividades de la ingeniería civil, aparece en respuesta a la necesidad de monitorear y capturar imágenes que permita visualizar el avance de las etapas de construcción y detectar las oportunidades que proporcionen mejoras durante el proceso de pavimentación. En los últimos años, la utilización de drones para la obtención de imágenes para su aplicación en el ámbito civil, ha experimentado un crecimiento notable. Si bien esta tecnología genera gran interés por las ventajas que presenta, el aprovechamiento de sus productos presenta dificultades, debido a que resulta necesario obtener más información a partir de las capturas visuales proporcionadas por los drones.

Este proyecto de título tiene como objetivo evaluar el uso de drones durante el proceso constructivo de pavimentación asfáltica del camino. Capturando imágenes y videos sobre la obra durante la colocación de la mezcla de asfalto y la maquinaria de compactación (rodillo neumático y rodillo vibratorio con tambor de acero) presente en la obra. Dichas imágenes serán procesadas digitalmente con técnicas conocidas como clasificación supervisada y binarización de imágenes digitales. Estos algoritmos permiten realizar interpretaciones visuales sobre las imágenes, como por ejemplo, estimar la macro textura de la superficie asfáltica y detectar visualmente los avances de la compactación del pavimento. Además se consiguió graficar la trayectoria de ejecución y operación de los rodillos de compactación que fueron grabados con el Drone. La información obtenida gracias al uso del Drone resulto ser de gran valor, dejando al descubierto que el principal factor que influye en la calidad de los caminos corresponde al desempeño y operaciones de la maquinaria de compactación.





Agradecimientos

Este proyecto de título realizado en la Universidad de Concepción, Campus Los Ángeles es un trabajo en el cual, directa o indirectamente participaron distintas personas opinando, corrigiendo, dando ánimo y acompañando en los altos y bajos. Este trabajo me ha permitido aprovechar la competencia y experiencia de muchas personas que deseo agradecer en este apartado.

En primer lugar, a mi Profesor guía de proyecto de título, Dr. Guido Staub. Mi más amplio agradecimiento por haberme confiado este trabajo y extenderme la invitación a trabajar con el este proyecto. Por su fundamental dirección y apoyo para abordar este proyecto de título y llegar a la conclusión del mismo. Cuya experiencia y educación han sido fuente de motivación e interés durante estos años de formación como Ingeniero Geomático.

Al Profesor Ing. José Cornejo, un especial agradecimiento por su buena disposición y apacible entrega en el desempeño su labor en el departamento. Por su rol principal y fundamental ayuda, dejando su Drone al servicio de este proyecto para la captura de las imágenes necesarias para dar inicio a este proyecto. Colaborando con una amabilidad indiscutible.

Mis agradecimientos a la colaboración del equipo que estuvo involucrado en las campañas de terreno donde se efectuaron las capturas de las fotografías aéreas.

Índice de Contenidos

Resumen.....	ii
Agradecimientos	v
Lista de Figuras.....	viii
1. Introducción	1
1.1. Objetivos	3
1.1.1. Objetivo General.....	3
1.1.2. Objetivos Especificos.....	3
2. Marco Teórico.....	4
2.1. Mezcla asfáltica.....	4
2.2. Pavimento asfáltico	4
2.3. Planificación y Control de Obra Mediante el Uso de Drones	10
2.4. Drones y sus Características.....	12
2.5. Procesamiento Digital de Imágenes	19
2.5.1. Clasificación Supervisada de Imágenes Digitales	19
2.5.2. Binarización de Imágenes Digitales.....	21
3. Desarrollo del proyecto.....	23
3.1. Estimación de la Macro Textura del Pavimento Durante la Compactación	25
3.1.1. Descripción del Procesamiento de Imágenes.....	25
3.2. Análisis del Proceso de Compactación con Imágenes Binarias.....	26
3.2.1. Descripción del Proceso de Binarización	27
3.3. Grafica de Trayectoria de Maquinaria Durante la Pavimentación.....	28
3.3.1. Proceso de Grafica de Trayectoria.....	28
4. Resultados	30
4.1. Fotografías sobre el pavimento asfaltico.....	30
4.1.1. Estimación de la Macro Textura del Pavimento Asfáltico	30
4.1.2. Huella de Compactación del Rodillo Vibratorio y Rodillo Neumático Sobre el Pavimento Asfaltico	31
4.2. Grafica de Trayectoria de Maquinaria de Compactación.....	35
4.3. Analisis de Resultados	37

5. Conclusiones y Recomendaciones	39
6. Referencias.....	42
7. Anexos	44
7.1. Link Videos Capturados.....	44
7.2. Funciones Desarrolladas en MatLab	44



Lista de Figuras

Ilustración 1: Capas del Pavimento Asfáltico.....	5
Ilustración 2: Pavimentadora o Finisher colocando la capa asfáltica sobre la base.....	6
Ilustración 3: Rodillo Tambor, Realizando Pasadas Sobre Pavimento.....	8
Ilustración 4: Tipos de multirrotores según el número de rotores y de su disposición.....	14
Ilustración 5: Drone Multirrotor Quadcoptero.....	15
Ilustración 6 Sensor Montado en Drone Phantom 3 Pro.....	17
Ilustración 7: Descomposición una Imagen en cada una de sus Bandas	18
Ilustración 8: Imagen Original y su Respectiva Imagen Binaria	22
Ilustración 9: Imagen Aérea de Obra de Pavimentación en Quiriquina ¡Error! Marcador no definido.	
Ilustración 10: Dron Phantom 3 Pro Utilizado en Obra de Pavimentación	23
Ilustración 11. Pavimentadora, Rodillo Vibratorio y Rodillo Neumático presentes en obra de pavimentación	24
Ilustración 12. Plancha Magenta.....	24
Ilustración 13. Determinación de Datos de Entrenamiento	25
Ilustración 14. Resumen de Pasos para obtener una Imagen Clasificada	26
Ilustración 15. Resumen de Pasos para Generar Imagen Binaria de Pavimento Asfáltico	27
Ilustración 16. Resumen de Pasos para Generar Grafica de Trayectoria de Maquinaria ..	29
Ilustración 17. Clasificación Supervisada de fotografías aéreas sobre obra de pavimentación.....	30

Ilustración 18. Compactación Dispareja del Rodillo Vibratorio Sobre el Pavimento Asfáltico, Video DJI_0620.MOV	31
Ilustración 19. Compactación Dispareja del Rodillo Neumático Sobre el Pavimento Asfáltico, Video DJI_0620.MOV	32
Ilustración 20. Comparación Entre La Compactación del Rodillo Vibratorio y el Rodillo Neumático	33
Ilustración 21. Compactación Desigual del Rodillo Vibratorio Sobre el Pavimento Asfáltico, Video DJI_0625.MOV	34
Ilustración 22. Grafica de Trayectorias, Maquina Pavimentadora, Rodillo Neumático, Rodillo Vibratorio, Video DJI_0620.MOV	35
Ilustración 23. Trayectoria de compactación, rodillo neumático	36

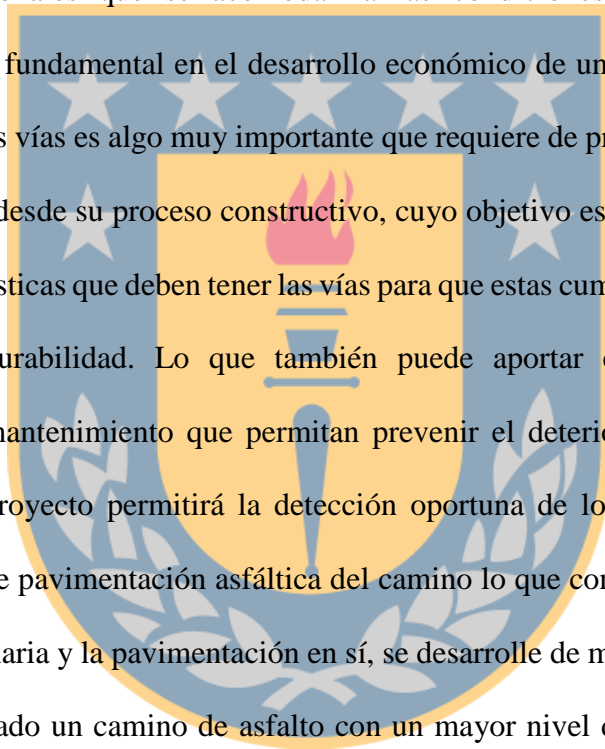




1. Introducción

En la pavimentación de caminos de asfalto, se involucran diversos factores durante el proceso, de los cuales no se tiene un monitoreo que permita advertir y conocer como cada uno de esos factores está influyendo en el producto final, por ejemplo, la ejecución y operación de la maquinaria (rodillos de compactación), la cual debería ser monitoreada con suma rigurosidad, debido a la gran importancia de la compactación del asfalto en el proceso constructivo para obtener un pavimento de calidad. Si bien en el Manual de Carreteras Vol. 5 se establece el modo en que estas máquinas de compactación deben operar, no se ha trabajado de manera tal que se permita controlar y monitorear que el proceso de compactación se ejecute realmente como lo norma el manual de carreteras. Poder controlar y monitorear el factor de compactación es fundamental para conseguir los requerimientos del proyecto y lo establecido por las normas constructivas, además, la carencia de un monitoreo que proporcione información que pueda ser utilizada en la puesta o colocación del asfalto en la obra, deja incertidumbres relacionadas con la eficiencia tras la logística empleada en la pavimentación. En consecuencia, el asfalto puesto en la obra no siempre consigue estar dentro de las normas constructivas debido a estas variables aleatorias presentes en cada obra de pavimentación. En cuanto a la macro textura, existen técnicas y ensayos que nos permiten estimar estas propiedades del asfalto en los caminos, pero, estas técnicas se hacen después que el tránsito se ha abierto al público general (dentro de los 6 meses posteriores). Entonces, resulta difícil poder estimar la macro textura y determinar si la superficie cuenta con una textura homogénea, uniforme y que no se presentan segregaciones o nidos. Esto, debido a que el asfalto está fresco y no se pueden realizar pruebas que permitan realizar observaciones de datos de macro textura durante la etapa de

construcción del pavimento. Por esto, es necesario que la observación sea de manera indirecta ya que durante el proceso constructivo del camino no debería haber ningún tipo de manipulación mientras pasa el tiempo de secado de la mezcla. Considerando estas variables que están presentes en la etapa de construcción de carreteras de asfalto, se produce un cierto grado de imprecisión e incertidumbre debido a la falta de un proceso de control que permita integrar toda esta información y brinde oportunidades de mejora al proceso de pavimentación que hasta el momento se sigue haciendo de manera artesanal con métodos tradicionales que se acomodan a las condiciones de cada obra. La comunicación vial es fundamental en el desarrollo económico de un país, por lo tanto el estado y calidad de las vías es algo muy importante que requiere de procesos que permitan evaluar y analizarlas desde su proceso constructivo, cuyo objetivo es verificar y certificar las normas y características que deben tener las vías para que estas cumplan con los tiempos de proyección de durabilidad. Lo que también puede aportar en el desarrollo de programaciones de mantenimiento que permitan prevenir el deterioro de las obras. La realización de este proyecto permitirá la detección oportuna de los factores que están presentes en la fase de pavimentación asfáltica del camino lo que contribuirá a que el uso de materiales, maquinaria y la pavimentación en sí, se desarrolle de manera óptima, lo que nos dará como resultado un camino de asfalto con un mayor nivel de construcción. Los principales beneficiados serán las empresas constructoras ya que verán sus inversiones de costo por el asfalto más aseguradas y los usuarios que usarán estos caminos también tendrán un mayor grado de comodidad y seguridad sobre un camino construido de manera eficiente.



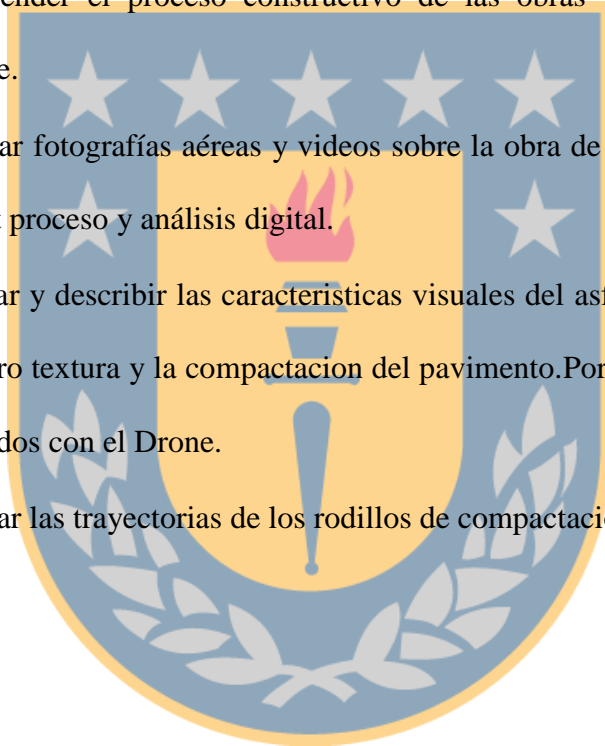
1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Evaluar el uso de un Drone para el monitoreo del rodillo vibratorio con tambor de acero y rodillo con rueda neumática durante la Compactación en el proceso de pavimentación de un camino.

1.1.2. Objetivos Especificos

- Comprender el proceso constructivo de las obras viales de asfalto en caliente.
- Capturar fotografías aéreas y videos sobre la obra de pavimentación, para su post proceso y análisis digital.
- Detectar y describir las características visuales del asfalto relacionada con la macro textura y la compactacion del pavimento. Por medio de los videos generados con el Drone.
- Analizar las trayectorias de los rodillos de compactación durante la obra,



2. Marco Teórico

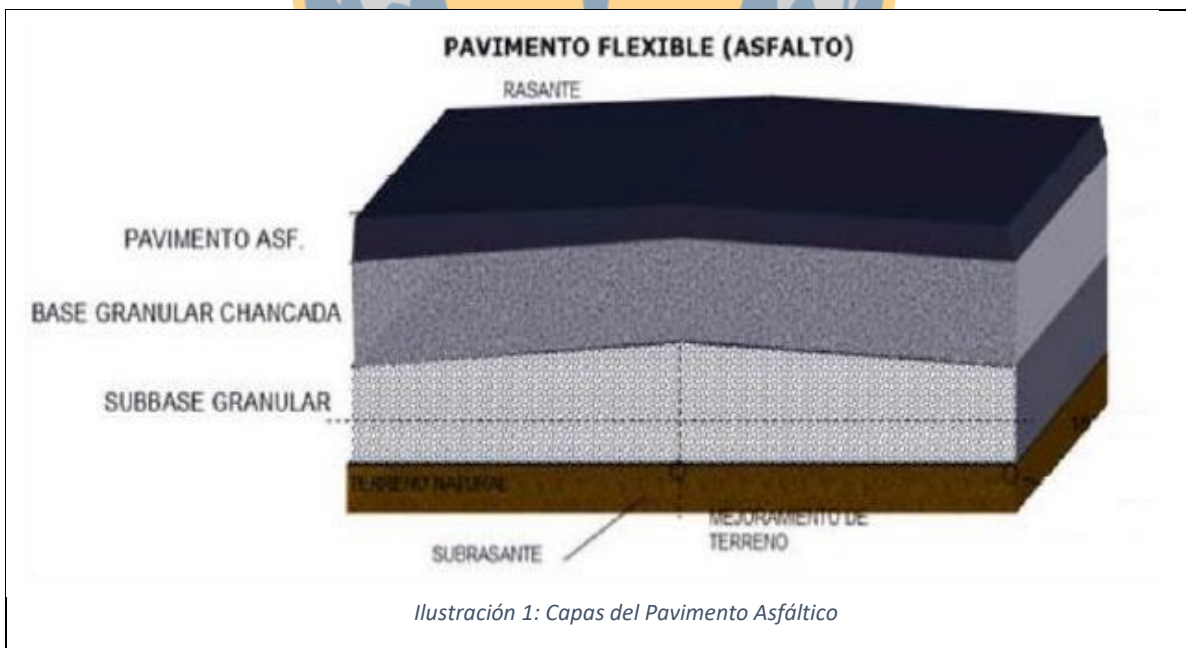
2.1. Mezcla asfáltica

La mezcla asfáltica en caliente debe pasar por un proceso el cual comienza en la planta de pavimento asfáltico. Donde el material pétreo de diámetro menor a una pulgada se calienta a temperaturas entre 160°C y 170°C. Luego de este proceso de calentamiento y secado, es vaciado en tolvas donde se mezcla con el cemento asfáltico el cual deberá estar a una temperatura entre 130°C y 150° C. Si estos materiales exceden las temperaturas máximas indicadas es probable que se pierdan ciertas propiedades de la mezcla asfáltica. Este proceso de alear los materiales se hace hasta que se logra un estado homogéneo de la mezcla, el cual luego se vaciará en los vehículos para su transporte a una temperatura entre 120°C y 130°C. De preferencia la mezcla se cubre con una lona para evitar que esta se enfríe durante el transporte a la zona de pavimentación.

2.2. Pavimento asfáltico

El pavimento asfáltico corresponde al tipo de pavimento flexible cuya estructura está conformada por varias capas conocidas como sub-rasante, sub-base, base y la carpeta de rodadura o carpeta asfáltica (ver ilustración 1). Cada una de estas capas cumple una función determinada, las cuales en conjunto dan origen al pavimento asfáltico cuyo objetivo es resistir y distribuir de manera eficiente las cargas producidas por el tránsito vehicular. El pavimento flexible deberá estar constituido de tal manera que las cargas producidas por el tránsito no provoquen deformaciones de ningún tipo en su estructura constructiva, para lo cual el espesor que el pavimento tenga juega un papel importante.

El pavimento debe ser lo suficientemente impermeable para no permitir la infiltración de agua, lo que afecta directamente la capacidad de soporte del suelo, para esto es muy importante que el pavimento sea capaz de drenar adecuadamente el agua. La acción destructora de los vehículos deberá ser resistida por el pavimento. Esta resistencia se refiere al desgaste y desprendimiento de las partículas que se produce con el paso de los vehículos. También, el pavimento deberá resistir a los factores atmosféricos que provocan la meteorización y alteración de los materiales que componen el pavimento lo que afecta en la vida útil del pavimento. Debe poseer una superficie de rodadura adecuada que permita fluidez y comodidad para los vehículos que transitan sobre ella, proporcionando un aspecto agradable, seguro y confortable para que el desplazamiento de los vehículos sea el más óptimo, es decir, esta superficie deberá ser lisa, pero también tiene que tener un aspecto antideslizante en el caso de estar húmeda. La principal característica de este tipo de pavimento es que al ser flexible se podrá adaptar a ciertas fallas de la base o sub-base. Esto es muy importante en caso de presentarse un asentamiento en alguna de sus capas.



Fuente: Dirección de Obras Viales

En cuanto a la construcción de cada una de las capas que conforman la estructura básica de los caminos de asfalto en caliente, las cuales pasan por procesos en donde se verifica la calidad del material empleado y la calidad de cada capa construida. Las capas son montadas de manera tal que el material pétreo y asfáltico quede distribuido de manera homogénea y totalmente nivelado por toda la superficie. Cada una de las capas deberá mantener ciertos índices de humectación. Estos índices de humectación son requerimientos técnicos de construcción para realizar la compactación de las capas. La capa de pavimento asfáltico es puesta luego de que la capa base fuese regada con una emulsión asfáltica, la cual facilitara la adherencia de la capa asfáltica sobre la capa base.



Ilustración 2: Pavimentadora o Finisher colocando la capa asfáltica sobre la base

La mezcla asfáltica deberá llegar al lugar de la construcción a una temperatura entre 115°C y 125°C. Esta mezcla será vaciada en una pavimentadora asfáltica que formará una capa con la mezcla asfáltica. Cuando el asfalto es puesto sobre la base, tiene una temperatura entre 110°C y 120°C, donde se aplica una serie de compactaciones con máquinas equipadas con rodillos vibratorios lisos metálicos y otros con rodillos neumáticos. Estos rodillos se moverán de forma paralela al eje del camino comenzando desde la orilla hacia el centro de la vía y en el caso de las curvas desde el lado interior al exterior. La primera compactación que se genera por sobre la superficie asfáltica la hace la pavimentadora asfáltica, consiguiendo una densidad de un 80%.

Un factor decisivo para garantizar el buen rendimiento del camino de pavimento asfáltico, es la densidad final del pavimento después de la compactación. Hughes citado en (Li et al, 1996) define compactación como “el proceso de reducción del contenido de vacíos de aire del pavimento de asfalto entre las partículas sólidas, implica el empaquetado y la orientación de las partículas sólidas en una disposición de empaquetado más densa y efectiva”. El objetivo fundamental de compactar una capa de pavimento de asfalto es lograr un contenido óptimo de vacíos de aire en la mezcla, proporcionar una superficie de conducción suave, y aumentar la capacidad de carga del material de construcción.

Los contratistas encargados de la obra y la construcción del pavimento en carretera deben alcanzar un porcentaje de vacíos o densidad final que estará dada por especificaciones y requerimientos previamente estipulados. Para lograr esta densidad final requerida, la capa de asfalto debe compactarse de manera uniforme por medio de un número específico de pasadas del rodillo compactador. Un alto nivel de compactación dará como resultado un apilamiento estable de partículas, un alto número de puntos de contacto

entre las partículas y un bajo contenido de vacíos en la mezcla. Sin embargo, esto se debe hacer con precaución, ya que fuera del laboratorio, alcanzar el nivel de compactación requerido es una tarea bastante compleja. Una baja compactación dejará demasiados vacíos, se verá su estabilidad reducida como también la resistencia del pavimento. En caso contrario, una sobre compactación crea el riesgo de enrojecimiento y la mezcla se vuelve inestable debido a los efectos de expansión térmica de los diferentes componentes de la mezcla, Huerne (2004).



Ilustración 3: Rodillo Tambor, Realizando Pasadas Sobre Pavimento

Al observar una sección transversal de una carretera de pavimento asfáltico, la densidad de esta en el centro de la carretera resultara más alta que las densidades de los bordes Krishnamurthy et al. (1998). Este efecto de la densidad no homogénea se debe a las acciones y los trazados que eligen los operadores de las máquinas compactadoras, ya que los operadores tienden a hacer más superposiciones en el centro de la carretera, esta superposición deliberada, puede causar una compactación excesiva e insuficiente en varias áreas del pavimento, por lo tanto, provocan una compactación no uniforme. En general, las

uniones y los bordes son las áreas del pavimento que reciben menos compactación que el resto de la sección transversal.

El número de pasadas no es el único factor que se debe considerar en la compactación, existen otros factores tales como temperatura de trabajo, propiedades del material, temperatura exterior, espesor de capa, graduación de agregado y el diseño de la mezcla. La compactación también se ve afectada por otras variables como el equipo de construcción, la velocidad del rodillo compactador, la frecuencia del compactador, la amplitud, la carga del rodillo, según Conklin y Weil (1999), la presencia de estas variables genera un problema, donde los operadores de los rodillos compactadores tienen que diseñar estrategias operativas para compactar el asfalto a la densidad requerida. Deben tomar decisiones operativas sobre el tiempo, la velocidad, la trayectoria y si debe aplicar vibración, también deben construir mapas mentales de cada sitio, las circunstancias, la secuencia de compactación, el progreso realizado y estar al tanto de las operaciones de sus colegas. La dificultad de realizar esta difícil y compleja tarea de compactación en condiciones de sitio que cambian con frecuencia. Bouvet et al (2001) advierte que los errores de compactación inducen defectos frecuentes en la estructura final del pavimento. Estos errores se deben a la capacidad humana restringida y la racionalidad limitada. La complejidad de las tareas de los operadores de los rodillos compactadores afecta negativamente la calidad, la productividad y el costo del proyecto. En consecuencia, el conocimiento del proceso explícito puede proporcionar apoyo y un entendimiento más profundo del proceso que se está siguiendo. Donde mejorar el control sobre los procesos de compactación es un paso esencial para mejorar la calidad del pavimento.

En cuanto a la macro textura del pavimento, no deberá presentar segregaciones de material (nidos), fisuras, grietas, ahuellamientos, deformaciones, exudaciones ni otros defectos (Manual de Carreteras, Volumen 5). Deberá presentar una textura homogénea y será medida dentro de un plazo de 4 meses después de dado el tránsito, mediante un perfilómetro laser

2.3. Planificación y Control de Obra Mediante el Uso de Drones

La planificación y el control son herramientas imprescindibles para la consecución exitosa de los proyectos y la ejecución de obras civiles. El sector de la construcción ha tenido la necesidad de afrontar un aumento de la competencia, un mayor nivel de exigencia y la disminución de los recursos financieros. En donde es imprescindible afrontar con seriedad la gestión y dirección de las obras, con el objetivo de no perder el control de los tiempos, los costes y los plazos. Las deficiencias en la planificación y control desembocan en incumplimientos de plazos, sobrecostes y merma de calidad (Peñafiel 2017). Para realizar el seguimiento, son necesarias tecnologías que periódicamente estén capturando la realidad del proyecto. De acuerdo a Charles Zwebner, Gerente General y Presidente de VolAero, los drones permiten a las empresas de Construcción, y otras compañías, capturar imágenes de una forma más conveniente versus la utilizada con tecnología previamente disponible. De acuerdo a Jeff Fidelin, Piloto Principal y Especialista en fotografía de VolAero "Los drones proporcionan una mayor facilidad de acceso, un menor riesgo y una velocidad superior a tecnologías más antiguas, tales como los helicópteros o aeronaves pilotadas".

Zwebner declara que "Nosotros usamos drones y cámaras para algunos diagramas de flujo de la pre-construcción utilizados por empresas proyectistas o de arquitectura."

"Esto puede ser tan simple como tomar imágenes y fotos de altitudes y ángulos específicos, para crear representaciones". Además, opina que: "Al integrar la información recopilada por los drones, nuestros clientes pueden observar los modelos durante la construcción, para ver cómo calza el modelo con la información entregada por el Drone, contrastando el diseño con lo efectivamente construido".

La compañía declara que: "La vigilancia realizada por los drones, te puede mostrar si efectivamente los empleados están usando los mejores métodos de trabajo, independiente de si un prevencionista o un inspector está presente". "Puedes corregir estos comportamientos inmediatamente y los trabajadores estarán más capacitados para realizar las mejores metodologías de trabajo al saber que están siendo supervisados". Durante el proceso de ejecución de obras ocurren tres principales fases; estado inicial, periodo de ejecución y fin de obra. Durante el desarrollo de todas estas fases se requerirá poder hacer mediciones que permitan evaluar los estados de dichas fases, diseñar soluciones, certificar procesos de ejecución y estados finales, conjugar componente geométrica y temporal es fundamental para un eficiente análisis. (Campo, 2015).

En el documento "Drones y sus aplicaciones a la Ingeniería Civil", capítulo 11 Aplicaciones en el Control de Obras y Evaluación de Impactos. Campo dice que "en el caso de una construcción, dirección de obra y constructora, se requerirá de una medición inicial para el diseño de proyecto y estudio de impacto medioambiental, seguimiento visual para controlar los procesos internos y etapas durante la construcción, mediciones parciales utilizadas para certificar la obra en sus distintas etapas del proceso y una medición final de cierre de la obra".

Si bien el uso de Drones va en aumento en el área civil, todavía no han sido empleados para el monitoreo del proceso constructivo de pavimentación de obras viales.

2.4. Drones y sus Características

El termino UAV (Unmanned Aerial Vehicle) hace referencia a que el vehículo aéreo no está tripulado, mientras que el termino RPA se refiere a que este vehículo aéreo puede ser piloteado remotamente, ambos términos pueden ser utilizados para señalar un Drone, actualmente se utiliza el termino UAS, puesto a que este refleja que además del vehículo aéreo, existe también un segmento de control en tierra.

En Chile, la DGAC mediante la norma técnica DAN-151 que entro en vigencia el 10 de abril de 2015, regula el uso de drones para aplicaciones civiles. Esta normativa excluye los drones de uso recreativo (por ejemplo Drone Phantom, Mavic) y es provisoria hasta que la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) elabore una normativa permanente.

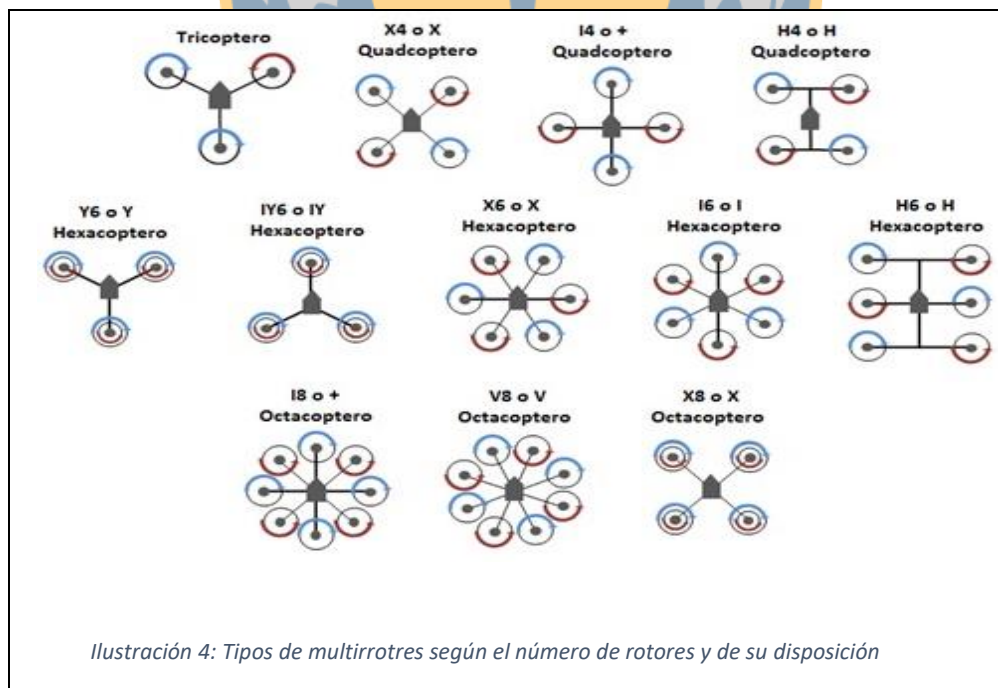
La DAN-151 contiene una breve alusión referida a la privacidad y datos personales, la cual es la siguiente: Regla 151.103 letras g), número 3: “Un piloto a distancia durante la operación de un RPA (Drone) no podrá violar los derechos de otras personas en su privacidad y su intimidad”. En términos generales la norma DAN-151 fija lo siguiente:

- Para operar un Drone, se exige ser mayor de edad
- Toda persona que desee operar un Drone, deberá obtener previamente una autorización de la DGAC
- Las aeronaves deben estar registradas

- La obligación de emitir una declaración jurada, la que deberá indicar que el piloto ha recibido la debida instrucción (sobre conocimiento de pilotaje)
- El piloto debe contar con credenciales de la DGAC
- Realizar declaración de responsabilidad solidaria en caso de accidente
- Los aparatos deben pesar menos de 6 kilogramos y tener paracaídas
- Deben realizarse solicitudes previas al vuelo
- No podrán utilizarse los drones de noche, ni en eventos masivos. Se requiere para ello una autorización especial.
- No se podrá volar a menos de 2 km de un aeropuerto o aeródromo, instalaciones de la FACH (Fuerza Aérea de Chile), áreas de incendio y otras áreas prohibidas establecidas por la normativa
- Los Drones podrán operarse a un máximo de 500 metros del operador, y a una altura máxima de 130 metros
- La aeronave debe ser solo de operación manual y permitir mantener contacto visual directo
- Un operador no puede operar más de una aeronave en forma simultánea
- El tiempo total de vuelo en una operación de un Drone podrá exceder el 80% de la total autonomía establecida por el fabricante, no pudiendo durar el vuelo más de 60 minutos. El traspaso del mando y control del Drone a otro operador no podrá efectuarse con la aeronave en vuelo

Los distintos tipos de vehículos aéreos no tripulados, cada uno con distinto grado de autonomía y variadas plataformas arquitectónicas de diseño como los de ala fija y los multi-rotores, ofrecen un amplio rango de prestaciones. Los drones de tipo multirrotor, se caracterizan por poseer tres o más rotores, y se clasifican dentro de los drones de ala rotatoria. Los rotores son los que generan la fuerza necesaria para mantener el vuelo y son puestos alternadamente con sentidos de rotación contrarios, lo que permite la fácil maniobrabilidad. Este tipo de drones se han hecho muy populares en el uso civil debido a su gran versatilidad. No requieren de infraestructuras externas para poder despegar y aterrizar de forma vertical. Son capaces de volar a baja altura, en lugares cerrados y abiertos, realizando vuelos estacionarios o maniobras de precisión. No obstante, requieren un gran consumo de energía para poder tener todos sus rotores girando, lo que limita su autonomía de vuelo a áreas relativamente pequeñas.

Dentro de las categorías de drones, el multirrotor es el más utilizado debido a que ofrece un mejor equilibrio de sus características técnicas.



Los drones son herramientas muy versátiles que pueden ser capaces de realizar diversas tareas con tan solo modificar ciertos equipamientos incorporados en ellos. Demuestran ciertas ventajas frente a las aeronaves tripuladas tales como: disminución de costos relacionados al precio de los drones y los costos asociados a su operación (combustible, mantenimiento, personal, etc.); reducción del impacto ambiental de la operación de las aeronaves no tripuladas, las cuales, las emanaciones de gases son menores y la contaminación acústica es menor; mayor flexibilidad de despliegue, donde los drones presentan una amplia ventaja, puesto que no necesitan de infraestructuras específicas como los aeródromos para el despegue y aterrizaje; ampliación del campo de aplicación de las aeronaves, la versatilidad que poseen los drones en cuanto a su uso y aplicaciones han dado lugar a la ejecución de disciplinas que hasta ahora no se habían resuelto por medio de las aeronaves convencionales, como por ejemplo, la inspección de estructuras (Plan Estratégico para el desarrollo del sector civil de los drones en España, 2018).



Fuente: www.dji.com

Las modernas aeronaves no tripuladas cuentan con nuevas actualizaciones y mecanismos de seguridad de vuelo, los controladores de vuelo automatizados permiten que la aeronave tenga un regreso seguro al punto de origen. Utilizan modos de vuelo basados en el posicionamiento GPS, y en ocasiones utilizan el posicionamiento visual y sensores barométricos para la altura de vuelo relativa.

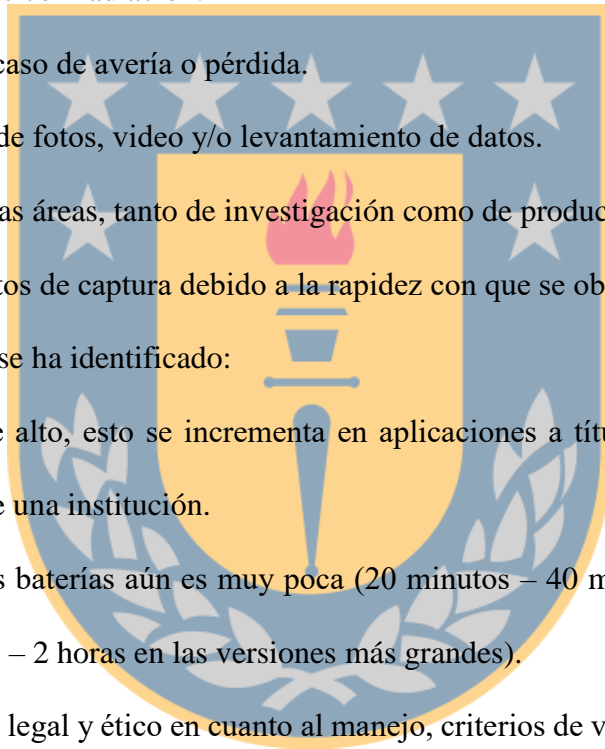
Existen diversas ventajas al utilizar este tipo de tecnología, entre ellas se menciona:

- Sustitución del ser humano en la ejecución de labores peligrosas, por ejemplo, sobrevuelo y exploración de zonas con radiación.

- Fácil reposición en caso de avería o pérdida.
- Rapidez en la toma de fotos, video y/o levantamiento de datos.
- Aplicación en muchas áreas, tanto de investigación como de producción.
- Disminución de costos de captura debido a la rapidez con que se obtienen los datos.

Entre las desventajas se ha identificado:

- Costo relativamente alto, esto se incrementa en aplicaciones a título personal o sin el respaldo financiero de una institución.
- La autonomía de las baterías aún es muy poca (20 minutos – 40 minutos en los drones pequeños, 40 minutos – 2 horas en las versiones más grandes).
- Vacíos en el aspecto legal y ético en cuanto al manejo, criterios de vuelo como velocidad y altura así como en la privacidad de datos y sanciones por el mal uso de la tecnología.
- Son vulnerables a fenómenos atmosféricos.
- Posibilidad de generar accidentes, sobre todo cuando sobrevuelan lugares poblados o cerca de infraestructura tal como puentes, carreteras, edificios altos, aeropuertos, grandes concentraciones de personas como conciertos o eventos públicos.



El sensor es el componente más importante del Drone, puesto que es el encargado de capturar todo el cumulo de datos requeridos, los sensores fotográficos detectan la radiación electromagnética en sus diferentes longitud de onda o frecuencia; De la cual solo una sección de este rango electromagnético es visible a nuestros ojos (aproximadamente de 350nm a 720nm). Los sensores pueden captar lo que el ojo humano no es capaz de ver, mostrándolo para ser analizado e interpretado.

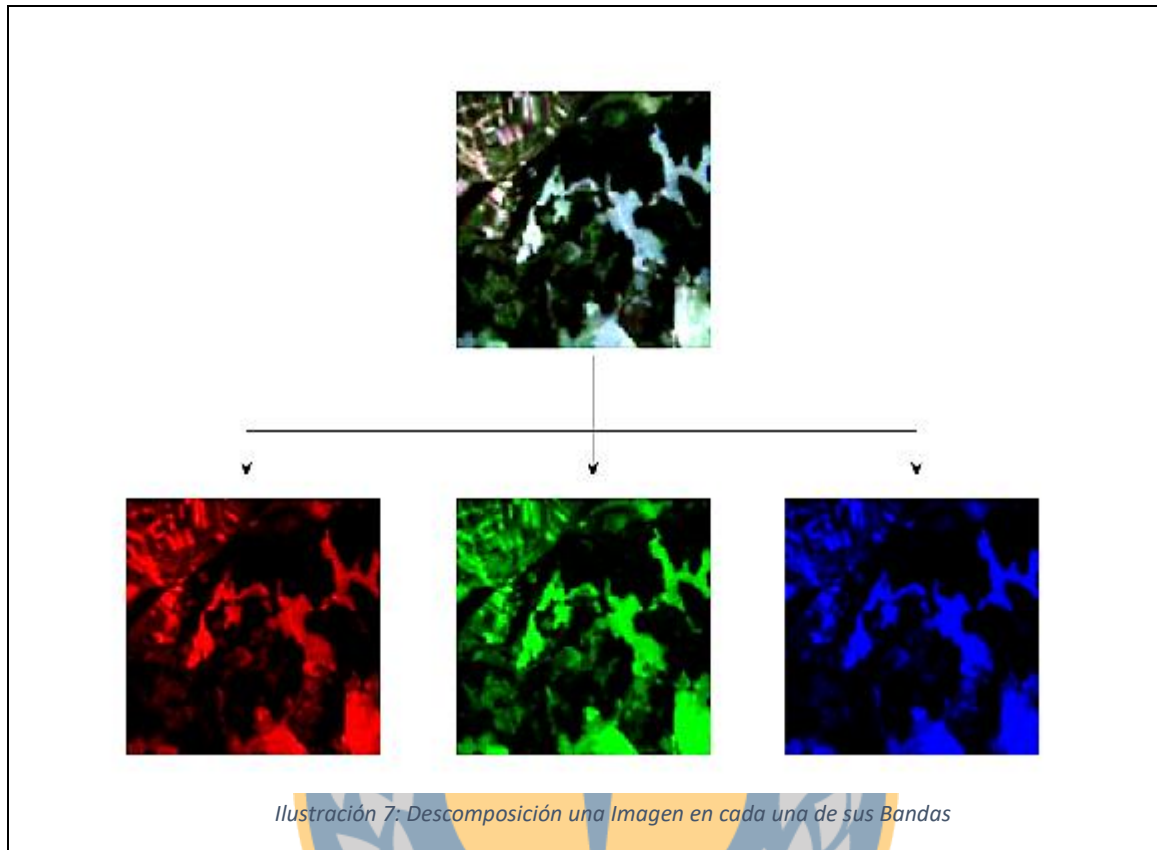


Ilustración 6 Sensor Montado en Drone Phantom 3 Pro

Fuente: www.dji.com

Dentro del espectro electromagnético se alberga el rango de luz visible. Los sensores de luz visible son capaces de detectar las bandas roja, verde y azul (RGB en inglés) de la luz visible que se combinan para generar todos los colores que hoy vemos y conocemos. La captura de imágenes con este tipo de sensores, permiten dividir los canales

proporcionados y trabajar con cada canal de forma individual, donde es posible asignar un conjunto de técnicas para mejorar la calidad y la obtención de información o características de la imagen.



Los Drones y sus propias características han permitido entregar soluciones al control de la obra, recogiendo datos que de no ser mediante esta nueva tecnología, se recurría al uso de aeronaves convencionales en donde la disponibilidad de los datos era selectiva, puesto que las infraestructuras y sus elevados costos no permitían a los interesados tomar todos los datos necesarios. Por otro lado, el uso de drones permite obtener datos cuya precisión estará condicionada a partir de la conjugación entre sensores y altura de vuelo. Se podrán realizar vuelos repetitivos gracias a que los costos no se elevaran demasiado, permitiendo tener una colección de datos de toda la obra en series

temporales. La toma de imágenes genera datos continuos y cuya calidad es homogénea, es decir, no son datos discretos o interpolados. El seguimiento visual de una obra permitirá a los interesados tener una visión global de la obra para poder llevar un control y monitoreo más completo del avance de la obra.

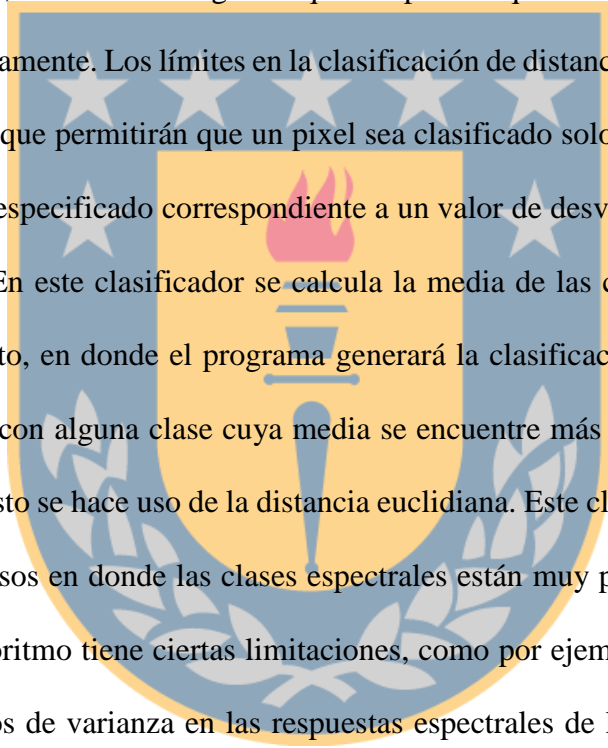
Los drones muestran aptitudes suficientes para poder realizar un eficiente desempeño en la tarea de captura de imágenes de una obra. Sin embargo, es necesario obtener información a partir de estas imágenes que resulte de utilidad para el control de las actividades de construcción y detección de oportunidades de mejora en el proceso constructivo.

2.5. Procesamiento Digital de Imágenes

2.5.1. Clasificación Supervisada de Imágenes Digitales

Dentro de los procesos que se pueden emplear para la obtención de información a partir de imágenes digitales, tenemos las técnicas de clasificación supervisada. Cuyo requisito principal es que el analista tenga suficientes píxeles conocidos para cada clase de interés con el propósito de desarrollar firmas representativas para esas clases. Estos píxeles son comúnmente conocidos como datos de entrenamiento, y un conjunto de estos datos de entrenamientos se conocen como áreas de interés. La detección de los píxeles de entrenamiento es el paso principal dentro de la clasificación supervisada, esto implica que, se requerirá de visitas a terreno para poder tener un conocimiento completo de las clases y objetos que están presentes en la imagen. Las firmas generadas a partir de los datos de entrenamiento varían según el tipo de clasificador utilizado en el proceso, en el caso de la clasificación de paralelepípedo, las firmas de clase serán los límites superior e inferior de brillo en cada banda espectral. En el caso de la clasificación de distancias mínimas, las

firmas serán los vectores medios de los datos de entrenamiento para cada clase y para la clasificación de probabilidad máxima, los vectores medios de la clase y las matrices de covarianza constituyen las firmas. Es sumamente necesario identificar los datos de entrenamiento para todas las clases de interés y preferiblemente para todas las clases que estén presentes dentro del área de la imagen a procesar. En el caso en que el conjunto de datos de entrenamiento no es totalmente representativa, será necesario utilizar alguna forma de umbral o limite si la clasificación es de distancia mínima o es la clasificación de máxima verosimilitud, con esto se asegurará que los pixeles que están mal caracterizados no se etiqueten erróneamente. Los límites en la clasificación de distancia mínima se pueden imponer de tal forma que permitirán que un pixel sea clasificado solo si está dentro de un número previamente especificado correspondiente a un valor de desviación estándar de la media más cercana. En este clasificador se calcula la media de las clases a partir de los datos de entrenamiento, en donde el programa generará la clasificación ubicando a cada pixel no identificado con alguna clase cuya media se encuentre más cercana con el valor de dicho pixel, para esto se hace uso de la distancia euclidiana. Este clasificador no es muy apropiado para los casos en donde las clases espectrales están muy próximas entre sí. Es por esto que este algoritmo tiene ciertas limitaciones, como por ejemplo la insensibilidad a los diferentes grados de varianza en las respuestas espectrales de las diferentes clases. Para el caso del clasificador de máxima verosimilitud, se aplica un límite mediante el uso de umbrales en las funciones discriminantes. De esta forma al tener una clasificación tan limitada, los pixeles de la imagen que no estén bien representados en los datos de entrenamiento no se clasificarán. Este algoritmo es de tipo paramétrico en donde se considera una distribución estadística para las clases, utilizando un modelo probabilístico



de distribución gaussiana para formular las reglas de clasificación. Este modelo utiliza la media y la matriz de covarianza de los datos de las áreas de entrenamiento. En el caso de utilizar la clasificación por paralelepípedos, este clasificador actúa determinando un sub espacio en forma de paralelepípedo para cada clase existente, también se introduce en el algoritmo un valor de varianza de las clases. Donde cada límite de los paralelepípedos estará definido por los valores máximo y mínimo de cada área de entrenamiento, el valor del pixel de clase desconocida pasara a formar parte del paralelepípedo si este cae dentro del área del paralelepípedo de cada clase. Este algoritmo es poco preciso debido a las cualidades propias del clasificador, puesto que se pueden solapar los paralelepípedos provocando una fuente de error al momento de clasificar el pixel, o incluso puede ocurrir que el pixel quede fuera de algún paralelepípedo y este no sea clasificado. Existen algunos programas o software especializados en este tipo de procesos de imágenes digitales. Los cuales harán esta tarea de clasificación supervisada de imágenes mucho más fácil, en donde el software permite al usuario detectar los datos de entrenamiento, definir las áreas de interés e ingresar los parámetros necesarios según el tipo de clasificador que se esté utilizando.

2.5.2. Binarización de Imágenes Digitales

Dentro de las otras posibilidades que hoy se disponen para la obtención de información mediante el proceso de imágenes digitales, contamos también con la binarización de imágenes. Donde las imágenes son tratadas como matrices a través del uso de herramientas de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación específico. MatLab es un software de estas características cuyo lenguaje de programación propio (lenguaje M) permite desarrollar el proceso de

imágenes digitales mediante el desarrollo de algoritmos y operaciones matriciales en donde estarán involucradas las imágenes digitales. La binarización de una imagen digital en MatLab consiste en la creación de una imagen representada por una matriz. Donde a cada celda de la matriz, se le asigna un pixel de esta nueva imagen. Los valores de estos pixeles serán cero o uno, es decir, está compuesta por pixeles cuyo único color será negro o blanco. La manera en que se asignan los valores a estos pixeles es mediante la determinación de umbrales. Para el caso de una imagen de 3 bandas RGB, se crean umbrales para cada uno de las bandas. Entonces, si el pixel de la imagen original está dentro de los umbrales determinadas para cada banda, será asignado con el color blanco en la nueva imagen binaria.



Ilustración 8: Imagen Original y su Respectiva Imagen Binaria

Bajo este contexto teórico, es posible hacer uso de un Drone multirrotor para la captura de imágenes y videos de una obra en etapa de pavimentación de un camino de asfalto. Sera posible procesar estas imágenes para obtener información que permita realizar una interpretación visual sobre las características del pavimento asfáltico compactado mediante la clasificación supervisada mientras que la binarización será útil para detectar la huella formada por la maquinaria de compactación y generar graficas de trayectoria de estos rodillos de compactación.

3. Desarrollo del proyecto

Las operaciones de terreno se realizaron en un tramo de camino en construcción en la localidad de Quiriquina, situado en la comuna de San Ignacio, Provincia Ñuble.

Para la captura de las imágenes en terreno se utilizaron drones comerciales por su facilidad de transporte, poco peso y bajo costo operacional. Fue preciso contar con un set de baterías de repuesto para el dron, ya que, por el bajo rendimiento de estas, que duraban alrededor de 15 minutos, era necesario cambiar las baterías cuando estas se agotaban.



Ilustración 9: Dron Phantom 3 Pro Utilizado en Obra de Pavimentación

Una vez ubicados en el terreno de construcción, con el dron listo para realizar la toma de fotografías y videos, se esperó a que comenzaran las operaciones de colocación del asfalto a lo largo del camino. La cámara que llevaba el dron realizó capturas a las máquinas compactadora y pavimentadora, con el propósito de monitorear las trayectorias durante la operación de compactación por sobre el pavimento asfáltico.



Ilustración 10. Pavimentadora, Rodillo Vibratorio y Rodillo Neumático presentes en obra de pavimentación

Durante la grabación de los videos se trató de capturar una serie completa de compactación de ambos rodillos. La altura de vuelo del dron durante la captura de los videos varió entre 150 y 200 metros. Para la captura de fotografías, la altura de vuelo del dron fue de 6 metros aproximadamente. Se decidió colocar sobre la maquinaria presente en la obra de construcción, unas planchas de color magenta que sirvieran como identificador para graficar las trayectorias de los rodillos.



Ilustración 11. Plancha Magenta

3.1. Estimación de la Macro Textura del Pavimento Durante la Compactación

La estimación de macro textura se hace en base a las fotografías tomadas con el dron a seis metros de altura para tener una buena resolución espacial. Las cuales, mediante el uso de un software, por ejemplo, el programa ENVI el cual proporciona los algoritmos necesarios para realizar una clasificación supervisada de estas imágenes. La clasificación supervisada se utiliza para obtener imágenes clasificadas que muestran la macro textura del pavimento asfáltico cuando el asfalto es puesto sobre el camino y la variación de la macro textura durante el proceso de compactación.

3.1.1. Descripción del Procesamiento de Imágenes

El Proceso consiste en cargar las imágenes al programa ENVI y seleccionar las bandas que se utilizaron para la etapa de creación de los datos de entrenamiento en las áreas de interés, en donde se determinan los pixeles correspondientes a la clase de asfalto sombreado, con el propósito de interpretar de manera visual las características del pavimento asfaltico mediante la diferenciación de los pixeles con más sombra entre los elementos pétreos expuestos en la superficie del pavimento.

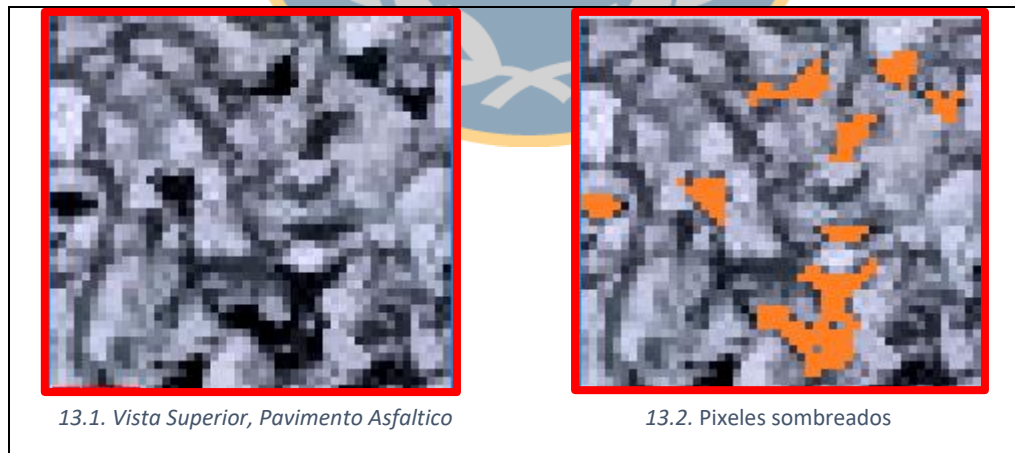


Ilustración 12. Determinación de Datos de Entrenamiento

Como resultado del proceso de clasificación supervisada, se obtiene una imagen digital clasificada, lo cual, a partir del análisis de los píxeles sombreados y su distribución de estos en la imagen sobre la superficie del camino se logra estimar la macro textura y el nivel de compactación del pavimento asfáltico.

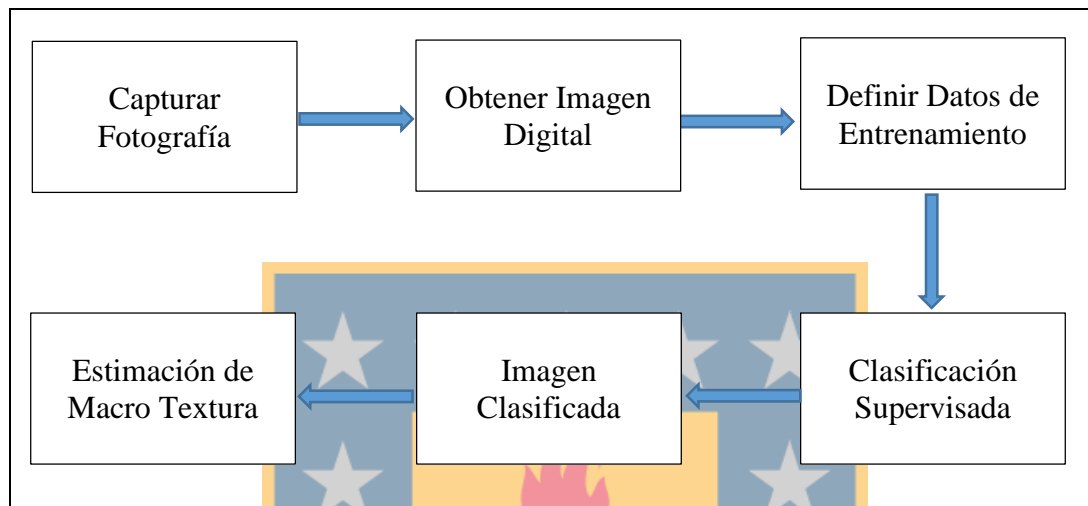


Ilustración 13. Resumen de Pasos para obtener una Imagen Clasificada

3.2. Análisis del Proceso de Compactación con Imágenes Binarias

Este proceso se genera con las imágenes obtenidas de los videos capturados, dichas imágenes se procesan por medio del uso de software de desarrollo de entornos, como por ejemplo, MatLab el cual de acuerdo al uso de algoritmos, herramientas y comandos que proporciona el software, se logra obtener una nueva imagen binaria en blanco y negro basada en la imagen original, en donde los píxeles de color blanco representan una clase específica (pavimento asfáltico), mientras que los píxeles negros forman otra clase la cual se forma con el resto de los píxeles de la imagen que no correspondan al pavimento asfáltico. Con la imagen binaria se ve a simple vista la huella de compactación de la

maquinaria sobre el pavimento asfáltico, la cual permite estudiar las falencias en la lógica usada durante las maniobras de compactación por parte de los operarios de los rodillos

3.2.1. Descripción del Proceso de Binarización

El primer paso del proceso en MatLab, fue cargar un video y obtener cuadros o imágenes cada un segundo. De estas imágenes se obtienen las imágenes binarias creadas a partir de los siguientes umbrales (tabla 1)

Bandas/Rango	Mayor	Menor
R	90	115
G	90	130
B	100	150

Tabla 1. Umbrales de binarización de imagen, Pavimento Asfáltico

Estos umbrales generan imágenes binarias cuyos pixeles blancos corresponden solo al pavimento asfáltico y los pixeles negros al resto de los pixeles que no son del pavimento.

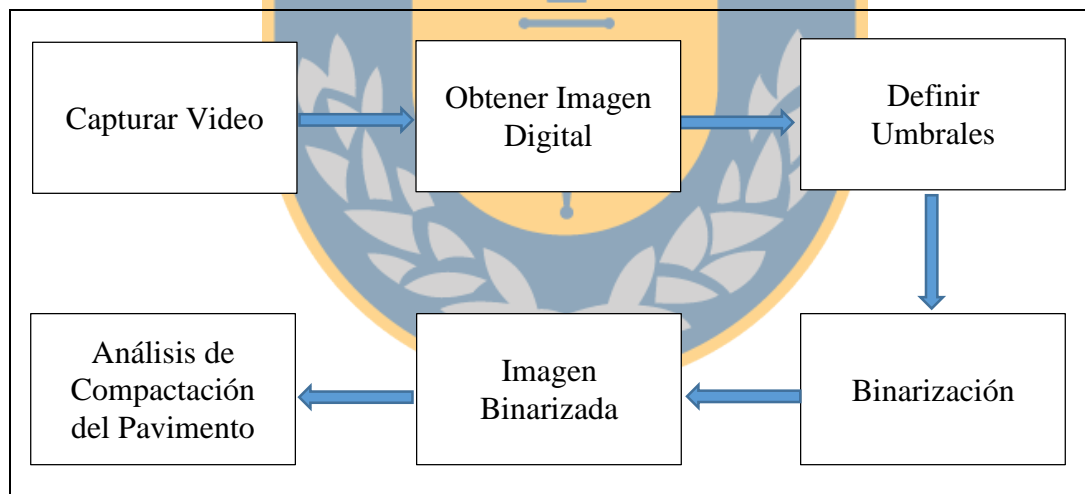


Ilustración 14. Resumen de Pasos para Generar Imagen Binaria de Pavimento Asfáltico

3.3. Grafica de Trayectoria de Maquinaria Durante la Pavimentación

La gráfica de trayectorias se realiza en base a los videos capturados y permite mostrar el avance de la pavimentadora, rodillo vibratorio y rodillo neumático sobre el pavimento asfáltico para estudiar las maniobras realizadas por los operadores de maquinaria durante el proceso de pavimentación.

3.3.1. Proceso de Grafica de Trayectoria

Sobre las imágenes obtenidas en MatLab a partir de los videos capturados, se generan imágenes binarias para detectar las planchas de color magenta (imagen 3) puestas sobre las tres máquinas presentes durante la pavimentación (pavimentadora, rodillo vibratorio y rodillo neumático), estas imágenes binarias se gestaron utilizando los umbrales descritos en la tabla 2

Bandas/Rango	Mayor	Menor
R	238	257
G	203	222
B	178	197

Tabla 2. Intervalos Utilizados en el proceso de Binarización

Cada imagen extraída del video se testea dentro de estos umbrales durante el proceso de binarización, lo que entrega imágenes binarias de estas planchas rectangulares que representan a la maquinaria. De estos rectángulos blancos, percibimos su ubicación dentro de cada imagen, lo que finalmente terminamos mostrando en una gráfica de trayectoria.

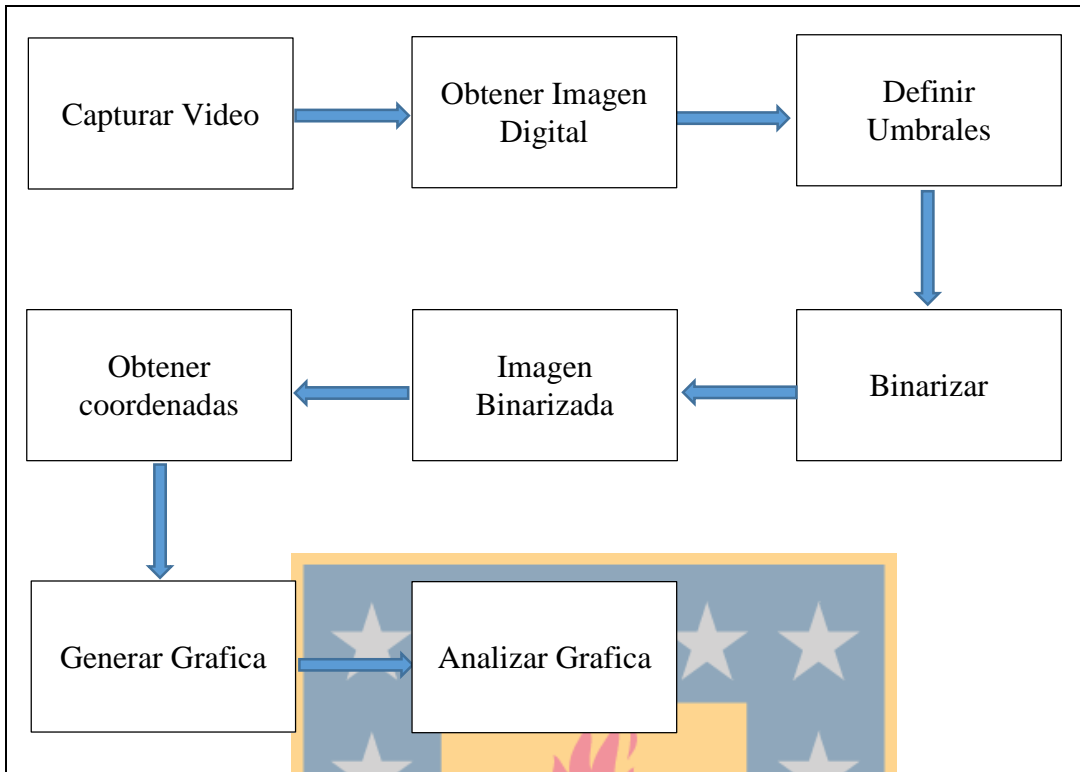


Ilustración 15. Resumen de Pasos para Generar Grafica de Trayectoria de Maquinaria



4. Resultados

4.1. Fotografías sobre el pavimento asfáltico

Del conjunto de fotografías tomadas con el dron, se obtuvieron imágenes RGB en donde cada color aparece en sus componentes espectrales primarios (rojo, verde, azul), los cuales hacen que los pixeles que conforman las imágenes sean diferenciados y puedan ser tratados mediante procesos digitales para hacer estudios relacionados con la compactación del pavimento asfáltico.

4.1.1. Estimación de la Macro Textura del Pavimento Asfáltico

Se obtuvieron tres imágenes clasificadas sobre la misma sección de camino pavimentado durante diferentes etapas de la compactación, a una altura aproximada de 6 metros sobre el pavimento. En las imágenes se puede ver que la cantidad de pixeles rojos (la sombra que se ve entre la gravilla del pavimento) disminuye cuando aumenta el número de pasadas del rodillo de compactación con tambor vibratorio. La macro textura antes y durante la compactación es homogénea en toda la sección del pavimento, mientras que la imagen obtenida después de la compactación muestra una macro textura menor en el centro del pavimento y mayor en los bordes.

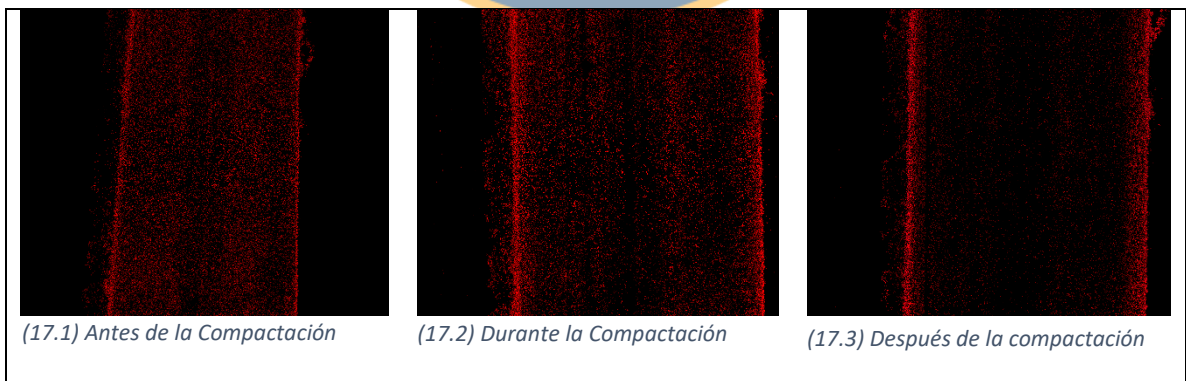


Ilustración 16. Clasificación Supervisada de fotografías aéreas sobre obra de pavimentación

4.1.2. Huella de Compactación del Rodillo Vibratorio y Rodillo Neumático Sobre el Pavimento Asfáltico

Con los videos capturados desde el dron a una altura aproximada de 150 m, se obtuvieron imágenes binarias que permitieron destacar la información visual relativa al uso de los rodillos de compactación y como estos influyeron en la pavimentación del camino.

La siguiente imagen (ver ilustración 18.1), extraída del video “DJI_0620.MOV” (ver anexo) que muestra la huella que ha dejado el compactador vibratorio, cuya trayectoria no fue uniforme. En el acercamiento (ilustración 18.2), se muestra el pavimento asfáltico luego de la serie de compactaciones del rodillo vibratorio, dejando en evidencia una mala práctica y un procedimiento de compactación mejorable, ya que la compactación debe ser pareja y regular en toda la superficie. En la imagen binaria (ver ilustración 18.3) se observa una diferencia de tres metros aproximados entre la serie de pasadas del rodillo vibratorio.



Ilustración 17. Compactación Dispareja del Rodillo Vibratorio Sobre el Pavimento Asfáltico, Video DJI_0620.MOV

En la imagen (ilustración 19.1) del video “DJI_0620.MOV”, capturada cuando el rodillo neumático realizó tres pasadas de compactación. Se observa una huella de compactación del rodillo neumático que ha quedado en el pavimento asfáltico (ilustración 19.2). La imagen binaria (ilustración 19.3) muestra que la compactadora de rodillo neumático hizo pasadas poco uniformes que no alcanzan la misma extensión a lo largo del pavimento (ilustración 19.4).

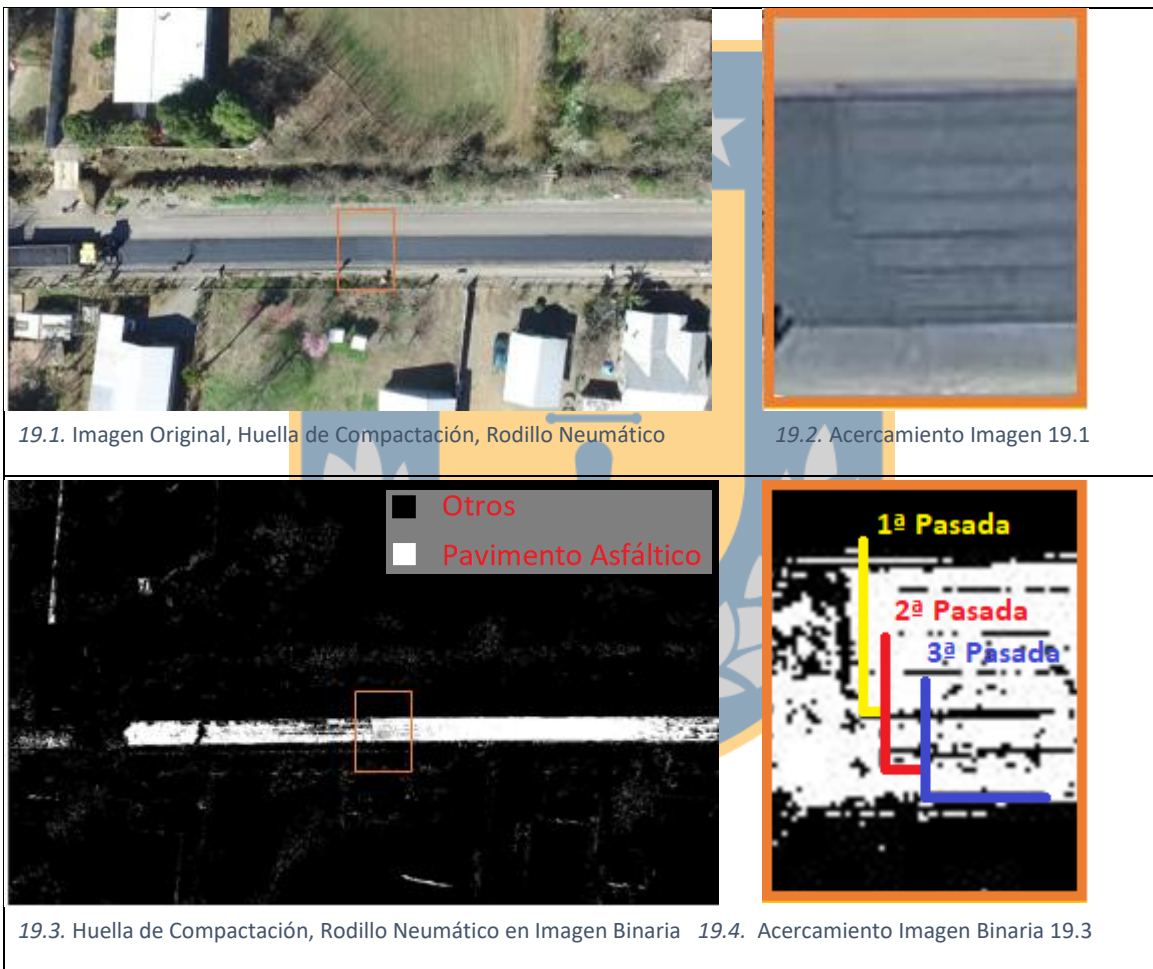


Ilustración 18. Compactación Dispareja del Rodillo Neumático Sobre el Pavimento Asfáltico, Video DJI_0620.MOV

Las ilustraciones 18.2 y 18.2 del video “DJI_0620.MOV”, muestran la misma sección de pavimento, pero en distintas épocas. La ilustración 18.2 se capturó cuando el rodillo vibratorio terminó su serie de compactaciones, mientras que la ilustración 18.2 se obtuvo después de tres pasadas de compactación del rodillo neumático. Al comparar las imágenes binarias, se puede observar que hay una sección del pavimento dentro del rectángulo rojo (ver ilustración 18.4) que no fue compactada con el rodillo vibratorio y si fue compactado por el rodillo neumático (ver ilustración 19.4), lo cual, en estricto rigor no debiese ocurrir.

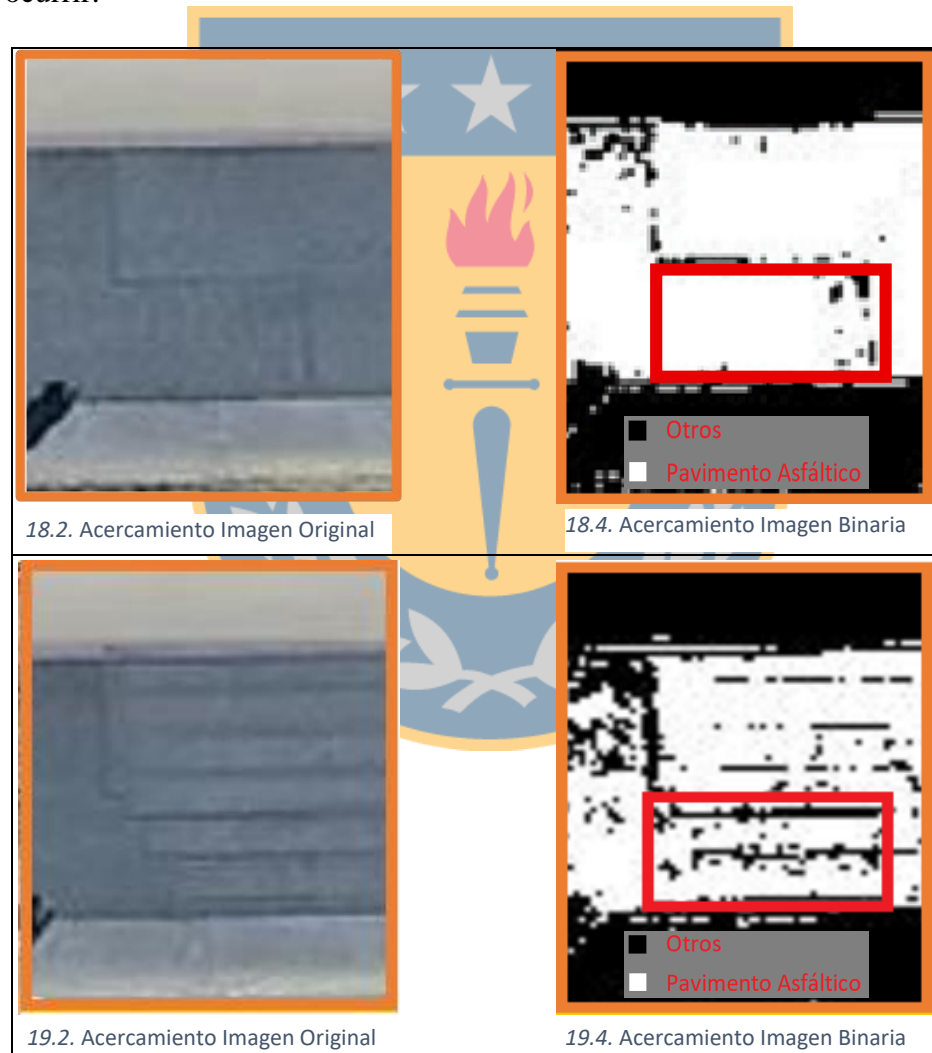


Ilustración 19. Comparación Entre La Compactación del Rodillo Vibratorio y el Rodillo Neumático

En la Ilustración 21.1 se observa el estado de compactación poco uniforme hecho con el rodillo vibratorio después de tres pasadas, mientras que la Ilustración 21.4 muestra la huella de compactación del pavimento después de la cuarta pasada de compactación. Esto indica que el camino no está recibiendo una compactación uniforme en esa sección del camino (Ilustración 21.5).

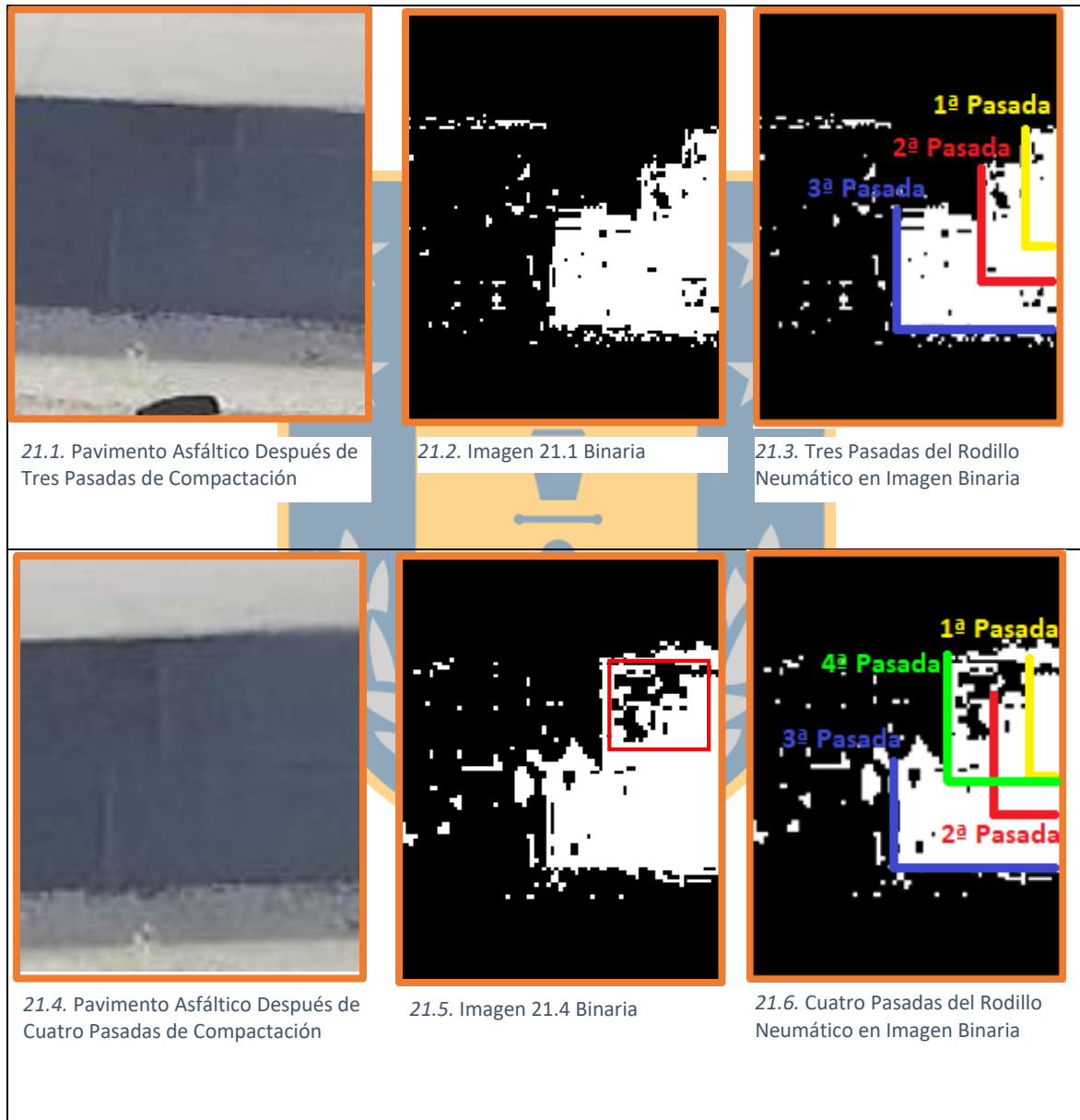


Ilustración 20. Compactación Desigual del Rodillo Vibratorio Sobre el Pavimento Asfáltico, Video DJI_0625.MOV

4.2. Grafica de Trayectoria de Maquinaria de Compactación

La grafica del video “DJI_0620.MOV”, muestra la trayectoria de la máquina pavimentadora, el rodillo neumático y el rodillo vibratorio durante el proceso de pavimentación. A pesar de que, no fue posible tener una grabación estable debido a la gran altura a la que estaba el dron y a los fuertes vientos que se generaron en el sector durante la grabación, se logró graficar los cuatro minutos al inicio del video y mostrar el movimiento de la maquinaria presente en la imagen (Ilustración 22).

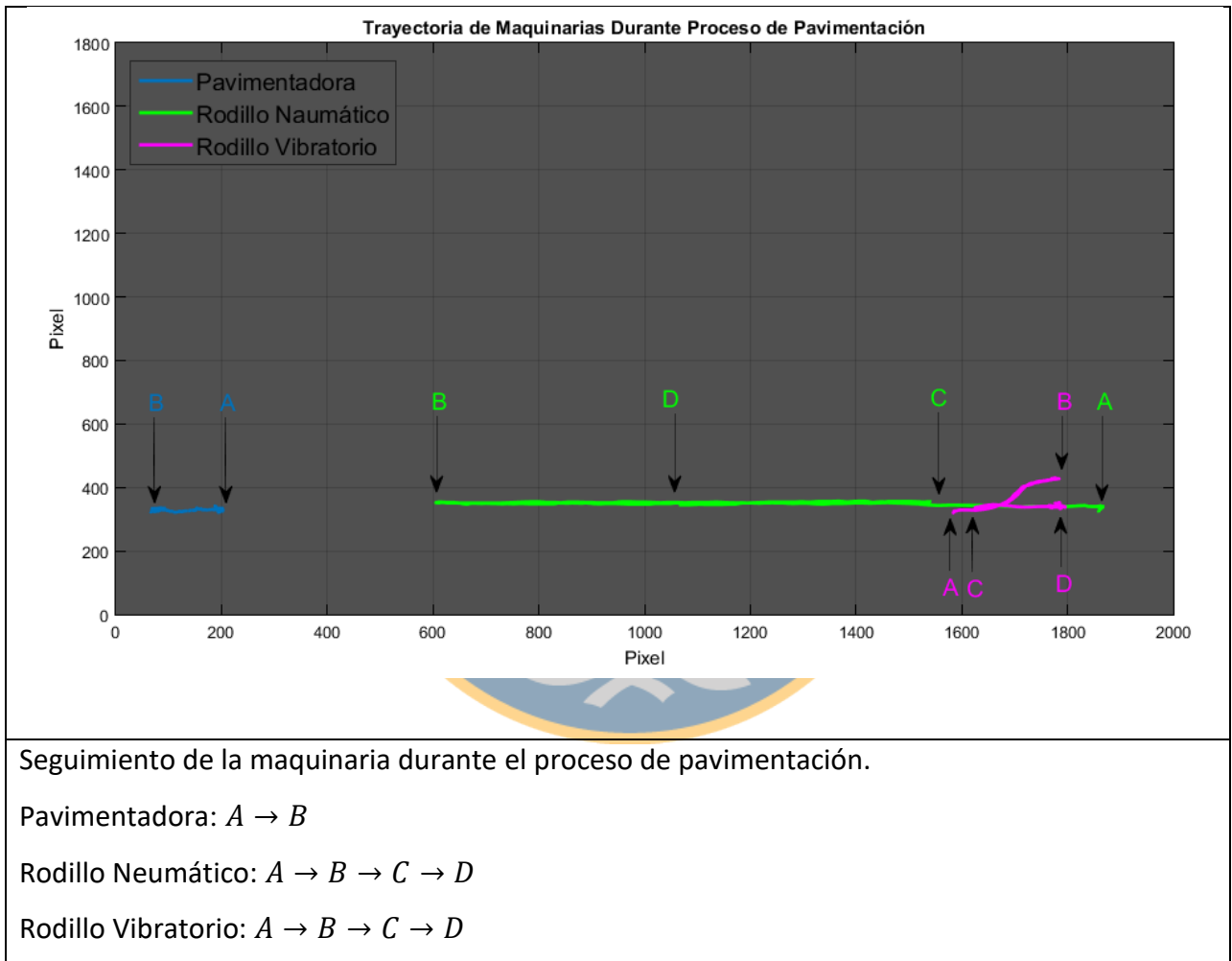


Ilustración 21. Grafica de Trayectorias, Maquina Pavimentadora, Rodillo Neumático, Rodillo Vibratorio, Video DJI_0620.MOV.

La Grafica generada con el video DJI_0010.MOV describe la trayectoria del rodillo neumático mientras pasa sobre el pavimento asfáltico. Si bien se logró graficar el video completo (9 minutos aproximadamente), no se logra captar la trayectoria completa del rodillo neumático debido a que este sale del cuadro del video en seis ocasiones, estos saltos en la trayectoria se pueden ver a la izquierda del grafico (Ilustración 23.1), los saltos de trayectoria estan marcados con segmentos rojos en el acercamiento a la grafica (Ilustración 23.2). El rodillo hace ocho pasadas sobre el pavimento asfáltico.

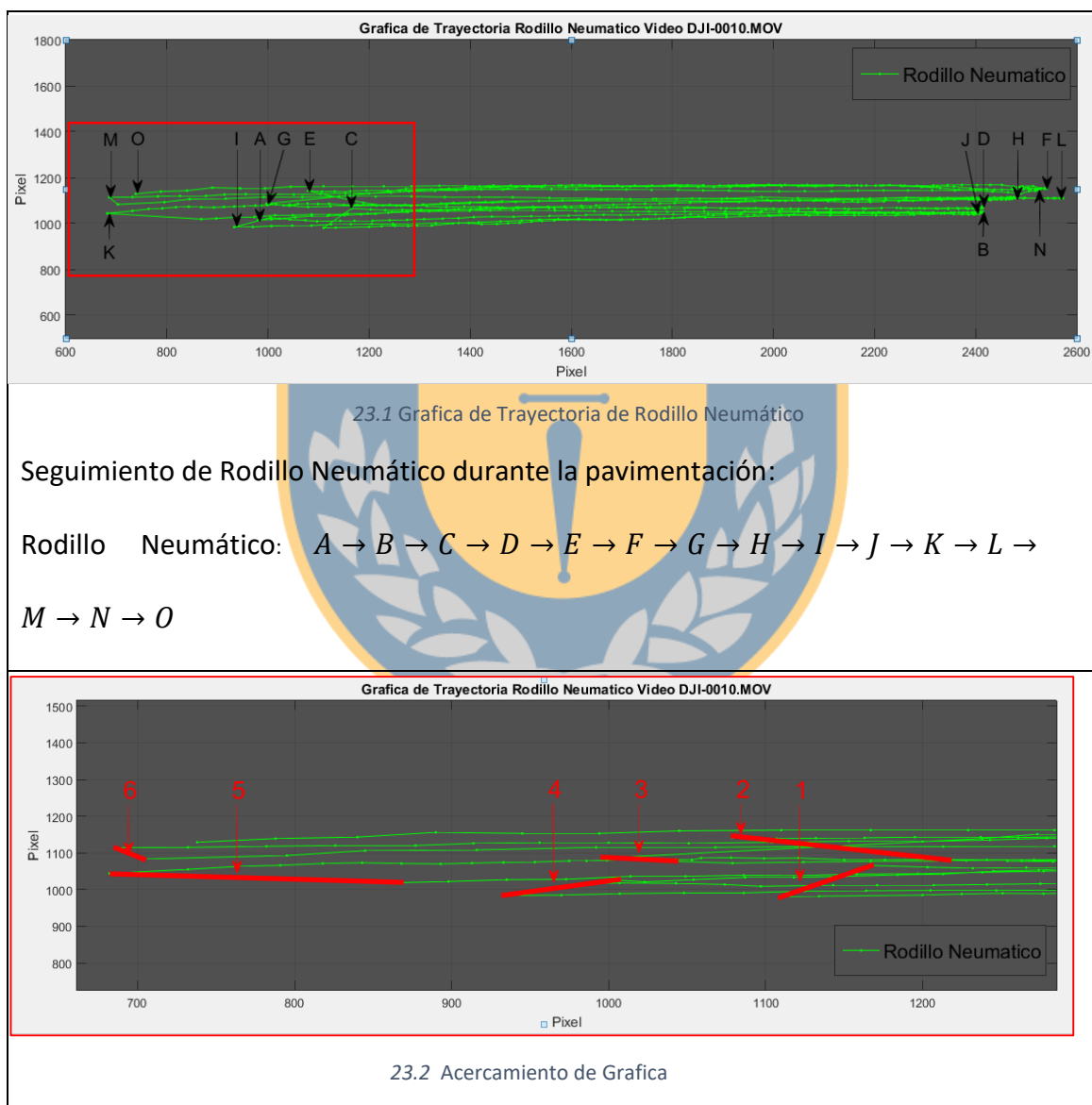


Ilustración 22. Trayectoria de compactación, rodillo neumático

4.3. Analisis de Resultados

Con las imágenes clasificadas se ha podido obtener información visual del pavimento asfáltico, como por ejemplo, la macro textura en el camino. A pesar de que esta información no tiene un alto grado de utilidad debido a que para los fines de construcción civil es necesario contar con información cuantitativa que caracterice la macro textura. Poder conseguir una estimación visual de la macro textura del camino de asfalto en el instante en que este ha sido puesto en el camino de manera remota sin entrar en contacto directo con el asfalto. Estos resultados, ofrecen una oportunidad de investigación para establecer criterios de estimación referidos al nivel de la macro textura presente en el pavimento durante el proceso de pavimentación asfáltica y como esta va sufriendo cambios a medida que pasa el rodillo vibratorio y rodillo neumático sobre el pavimento (Imagen 1), lo cual indicaría si existe alguna relación entre el número de pasadas del rodillo y la macro textura presente en la imagen.

En las imágenes binarizadas obtenidas es posible visualizar y diferenciar el asfalto compactado del no compactado y la compactación desigual que ejercen los rodillos. Sin embargo, no fue posible normalizar los intervalos para cada banda y utilizarlos para todas las imágenes de forma automatizada, debido a las variaciones de tono, color y efectos visuales generados en cada imagen. Lo cual generó una fuente de error que influyó directamente en la calidad de la imagen binaria y su grado de representatividad visual del pavimento asfáltico compactado.

Los gráficos de trayectoria generados a partir de los videos capturados desde el dron muestran resultados poco precisos debido a la baja estabilidad de vuelo del dron a gran altura y a los movimientos que comandó de manera remota el operador del dron, esta

precisión es mejor en la segunda gráfica puesto que la altura de vuelo del dron fue menor cuando estuvo grabando el video y porque el operador que controló el dron no realizó movimientos durante la captura del video. Estos gráficos esclarecen los movimientos realizados por la maquinaria durante la pavimentación y dieron cuenta de la lógica empleada por los operadores de los rodillos de compactación y pavimentadora.



5. Conclusiones y Recomendaciones

El desarrollo de este proyecto permitió la detección de oportunidades de mejora en el proceso constructivo de un camino de asfalto, en donde el uso del dron juega un papel importante en la captura de datos para el posterior proceso de estas imágenes y obtención de información útil que otorgue la rápida determinación de las características del pavimento. Esto nos ayuda a crear una idea sobre el uso del dron en el sector constructivo y su importancia para el desarrollo óptimo de caminos de asfalto.

Los registros visuales capturados con el dron, dejan en evidencia el manejo de ejecución por parte de los operadores de la maquinaria de compactación. Esta información puede ser utilizada por especialistas en el área constructiva para el diseño y desarrollo de nuevas metodologías que resuelvan el problema de las pasadas irregulares de los rodillos compactadores sobre la superficie asfáltica, para mejorar así la calidad final del camino.

Las ventajas que se presentan con el uso del dron durante el proceso constructivo de una obra vial son la posibilidad de monitorear la ejecución de la maquinaria que participa de la construcción vial y generar material visual el cual podrá ser revisado posteriormente para realizar un estudio y análisis de las etapas que puedan ser corregidos para mejorar así el proceso constructivo y la calidad de los caminos.

Por otro lado, el uso de técnicas de procesamiento digital de imágenes ha permitido estimar la macrotextura de la superficie expuesta del camino pavimentado, estas técnicas mezcladas con el uso del dron, ha permitido realizar observaciones de manera remota y tener estimaciones de macro textura en un post proceso corto que puede realizarse durante la etapa de pavimentación con el uso de software especializados en el procesamiento y análisis geoespacial, como así también software de desarrollo.

Las desventajas que se presentan con el uso de drones en el area de construcción vial son la baja autonomia de vuelo que estos vehículos poseen relacionada al rendimiento de la energía almacenada en la batería del Dron. Si bien una solución a esto es portar baterías adicionales en terreno para poder generar un ciclo de reposición de baterías, la desventaja de esto se traduce en que no se puede hacer un seguimiento prolongado de una sesión completa de compactación, recordando que cada batería tiene una duración de carga menor a 20 minutos, según la duración de carga de la batería y condiciones climatológicas. Considerando este último aspecto, el clima y las condiciones del viento juegan un papel fundamental en la factibilidad de uso del dron, ya que por la forma del dron utilizado y su peso ligero, no fue exitoso en la mayoría de los casos, la captura de un video en donde este se mantuviera estable durante el vuelo para poder obtener capturas más precisas.

Considerando todos los aspectos anteriormente mencionados, el uso de drones en el proceso de pavimentación de obras viales de pavimento asfáltico, en la actualidad es viable. Teniendo en cuenta los aspectos técnicos que hoy poseen los drones, solo hace falta que siga mejorando el desarrollo de la tecnología de estos vehículos aéreos para que nos permitan obtener observaciones más confiables en cuanto a precisión, estabilidad de vuelo, y autonomía de vuelo. Por lo cual no se descarta que en un futuro, estos vehículos y su tecnología implementada, dará muy buenos resultados y se convertirá en una eficiente herramienta para la labor constructiva, imprescindible en cada etapa de construcción.

La calidad de la información obtenida a partir de las imágenes es mejorable, requiere de una metodología de captura de las fotografías digitales y una mejora en el procesamiento relacionada con la automatización y normalización de los datos de entrada para la clasificación y una determinación generalizada para los umbrales determinados en

la binarización de imágenes. El uso de un dron con mejores características técnicas, mayor estabilidad de vuelo y mayor duración de la batería, permitirá obtener imágenes de mejor calidad, lo que resolvería el impedimento de realizar una captura en video de una serie completa de compactaciones.

Si bien el uso del dron en la etapa de colocación de la mezcla asfáltica en el camino ha mostrado buenos resultados, se recomienda utilizar metodologías de monitoreo con dron en las fases anteriores a la pavimentación.



6. Referencias

Dirección de Vialidad, Manual de Carreteras, Volumen 5, (2017), Chile.

NCAT (1991) Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction, NAPA Research and Education Foundation.

Ter Huerne, H. L. (2004) Compaction of asphalt road pavements using finite elements and critical state theory. Construction Management and Engineering. Enschede, University of Twente.

Krishnamurthy, B. K., Tserng, H.-P., Schmitt, R. L., Russell, J. S., Bahia, H. U. & Hanna, A. S. (1998) AutoPave: towards an automated paving system for asphalt pavement compaction operations. Automation in Construction.

Li, C. C., Oloufa, A. A. & Thomas, H. R. (1996) A GIS-based system for tracking pavement compaction. Automation in Construction.

Hughes, C.S., Compaction of Asphalt Pavement, Transportation Research Board, national Research Council, Washington, D.C. (1989).

Conklin E. J. and Weil W. (1999), Wicked problems: Naming the pain in organisations, <http://www.accelinnova.com/docs/wickedproblems.pdf>.

Bouvet, D., Froumentin, M. & Garcia, G. (2001) A real-time localization system for compactors. Automation in Construction.

Manual práctico de Construcción, Arq. Jaime Nisnovich, Biblioteca Práctica de la Construcción El Hornero, Buenos Aires.

Consejería de Economía y Hacienda. Los drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil.

Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. España. 2015

TELEDET, «TELEDET- Percepción Remota,» Imágenes satelitales - clasificación supervisada, 2017. [En línea]. Available: <http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/clasificacionsupervisada.htm>.

Ministerio de Fomento, Plan Estrategico para el Desarrollo del Sector Civil de los Drones en España 2018-2021, España.

RPASDRONEES, «RPASDRONEES-el portal del sector tecnico», RPAS/DRONEES – Aplicaciones- Peñafiel (2016) Seguimiento de Grandes Obras con Drones (Artículo publicado en la revista Obras Urbanas numero 60).



7. Anexos

7.1. Link Videos Capturados

DJI_0010.MOV: <https://youtu.be/h3CJcMDSs5E>

DJI_0620.MOV: <https://youtu.be/A0qlpKnL84c>

7.2. Funciones Desarrolladas en MatLab

La siguiente función crea una imagen binaria a partir de una imagen correspondiente a un cuadro de video captura con el Drone. Este código también obtiene las coordenadas de la posición de la maquinaria de compactación en la imagen (sistema de coordenadas de la imagen). Estas coordenadas son utilizadas para graficar la posición de la maquina en la imagen.

```
function[centroides]=binar(im_entrada);
%im_entrada=imread('frames1905.jpg');
figure;
imshow(im_entrada);
imR=double(im_entrada(:,:,1));
imG=double(im_entrada(:,:,2));
imB=double(im_entrada(:,:,3));
[N,M,Z]=size(im_entrada);
Y=ones(N,M);
%la primera prueba valores
Tr1=238;
Tr2=257;
Tg1=203;
Tg2=222;
Tb1=178;
Tb2=197;
for i=1:N;
    for j=1:M;
        if(imR(i,j)>Tr1 && imR(i,j)<Tr2)&&(imG(i,j)>Tg1 &&
imG(i,j)<Tg2)&&(imB(i,j)>Tb1 && imB(i,j)<Tb2);
            Y(i,j)=1;
        else
            Y(i,j)=0;
        end
    end
end
%figure;
%imshow(Y);
se=strel('square',20);
image_cerrada=imclose(Y,se);
%figure;
```

```

imshow(image_cerrada);
bw=bwareaopen(image_cerrada,400);
figure;
imshow(bw);
s=regionprops(bw,'centroid');
centroides=cat(1,s.Centroid);
end

```

En este último código se extraen los cuadros del video (una imagen cada 25 cuadros, lo que corresponde a un cuadro por segundo aproximadamente). En el código se llama la función “*binar*” para binarizar imágenes digitales (presentado en la página anterior) para detectar el objeto que representa la máquina, generando una imagen binaria y calculando la coordenadas de la maquina en cada uno de los cuadros extraídos, obtenemos como resultado final una gráfica de la trayectoria de la máquina de compactación

```

clc; clear all;
video_entrada=VideoReader
('C:\Users\Esteban\Documents\RESPALDO 1 oct-
2018\P_Titulo\DRONE ORIGINALES -
copia\videos\DJI_0011.MOV');
N=video_entrada.NumberOfFrames;
Cx=[];
Cy=[];

for i=1:25:N
    image=read(video_entrada,i);
    C=binar(image);
    if(~isempty(C))
        C=round(C);
        Cx=[Cx;C(:,1)];
        Cy=[Cy;C(:,2)];
    end

end
X=Cx;
Y=Cy;
Y=video_entrada.height-Y;
plot(X,Y,'kx','MarkerSize',20);
grid on

```