



Ministerio de Educación
Universidad Federal de Integración Latino - Americana
Instituto Latinoamericano de Tecnología, Infraestructura y
Territorio

Centro Interdisciplinar de Tecnología e Infraestructura
Ingeniería Civil de Infraestructura

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA LA EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI) EN PAVIMENTOS

CLAUDIA LARIZA GAMARRA ESCOBAR

Foz de Iguazú, PR

Agosto de 2022



Ministerio de Educación
Universidad Federal de Integración Latino-Americana
Instituto Latino – Americana de Tecnología,
Infraestructura y Territorio
Centro Interdisciplinar de Tecnología e Infraestructura
Ingeniería Civil de Infraestructura

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA LA EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI) EN PAVIMENTOS

CLAUDIA LARIZA GAMARRA ESCOBAR

Plan de Trabajo presentado a la Banca Examinadora del Curso de Ingeniería Civil de Infraestructura de la UNILA, como parte de los requisitos para obtención del Grado de Bacharel en Ingeniería Civil.

Orientador: Profº. Drº. Noé Villegas Flores

Foz de Iguazú, PR
Agosto de 2022

CLAUDIA LARIZA GAMARRA ESCOBAR

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA LA EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI) EN PAVIMENTOS

Plan de Trabajo presentado a la Banca Examinadora del Curso de Ingeniería Civil de Infraestructura de la UNILA, como parte de los requisitos para obtención del Grado de Bacharel en Ingeniería Civil.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Profº. Drº. Noé Villegas Flores
UNILA

Profº. MSc. Julio Cesar Bizarreta Ortega
UNILA

Profº. Drº. Pedro Limón Covarrubias
UdeG

Foz de Iguazú, 04 de agosto de 2022.

TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): _____

Curso: _____

Tipo de Documento	
(.....) graduação	(.....) artigo
(.....) especialização	(.....) trabalho de conclusão de curso
(.....) mestrado	(.....) monografia
(.....) doutorado	(.....) dissertação
	(.....) tese
	(.....) CD/DVD – obras audiovisuais
	(.....) _____

Título do trabalho acadêmico: _____

Nome do orientador(a): _____

Data da Defesa: ____/____/____

Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons* Licença 3.0 Unported.

Foz do Iguaçu, ____ de _____ de _____.

Assinatura do Responsável

A mis padres Rossana y Javier, a mi
hermana Gabriela, a mis hermanos Daniel
y Eduardo, a mi esposo Erid, por todo el amor
y apoyo en todas las etapas de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a Dios, por otorgarme fuerzas e inspiración en los momentos difíciles y estar a mi lado a lo largo de todo este camino.

A mis padres, Rossana y Javier, por todo el apoyo incondicional y por todo lo que siempre han hecho por mí con tanto amor.

A mi hermana Gabriela y mis hermanos Daniel y Eduardo, por aguantar todos mis estreses y por todo el apoyo incondicional.

A mi esposo Erid, por aguantar todos mis estreses, por acompañarme en esta larga caminata, por auxiliarme en la investigación, por animarme y por todo el apoyo incondicional.

A mi orientador de este trabajo de final de curso Prof^o. Dr^o. Noé Villegas Flores, por la orientación y dedicación para auxiliarme en la investigación, demostrando mucho interés y paciencia en los diversos asuntos que surgieron a lo largo del trabajo.

A toda mi familia, por todo el apoyo que me brindan siempre.

A todos mis amigos, por todo el apoyo que me brindan siempre.

A todos los que, directa o indirectamente me han ayudado en la elaboración de este trabajo.

A los participantes de la banca examinadora, por la disponibilidad e interés.

*La ciencia se compone de errores que, a su vez
son pasos hacia la verdad*
Jules Verne

RESUMEN

Es indudable que estimar el índice de regularidad internacional (IRI) es de gran importancia al momento de evaluar la calidad superficial de un pavimento, conocido este índice es posible avalar la calidad de trayecto, la seguridad, el confort del usuario y reducir los costos operativos de los vehículos. En consecuencia, en los últimos años se ha venido desarrollando distintas herramientas informáticas de bajo costo que dan apoyo en la estimación del valor del IRI, se espera que con estas nuevas tecnologías la evaluación del IRI se realice con más frecuencia a fin de que el lapso de tiempo de los mantenimientos de las vías sea más eficiente. Bajo este contexto, este trabajo de conclusión de curso ha desarrollado una herramienta informática que permite evaluar el índice de regularidad internacional en pavimentos, se ha utilizado el entorno de desarrollo LabView. Para lograr esto, se han implementado métodos de calibración y algoritmos en aras de ajustar los datos obtenidos por el acelerómetro del teléfono móvil. Se ha creado un ambiente informático que permite obtener datos para la respuesta de valores IRI en campo. De la misma forma se han empleado equipos como es el Dipstick y la aplicación ProVal para comparar los datos obtenidos con la nueva herramienta informática. Los resultados obtenidos muestran una aplicación estable y fiable con relación al equipo y aplicación empleada. Finalmente, este trabajo supone una nueva perspectiva de desarrollo informático bajo escenarios orientados a la ingeniería civil.

Palabras claves: pavimento, índice de regularidad internacional, transporte, evaluación de pavimentos.

ABSTRACT

Undoubtedly, estimating the International Roughness Index (IRI) is of great importance when evaluating the surface quality of a pavement; knowing this index, it is possible to assess the quality of the road, safety, user comfort and reduce vehicle operating costs. Consequently, in recent years, different low-cost computer tools have been developed to support the estimation of the value of the IRI. It is expected that with these new technologies, the evaluation of the IRI will be performed more frequently so that the time span of road maintenance will be more efficient. Under this context, this course conclusion work has developed a computer tool that allows to evaluate the international roughness index, the LabView development environment has been used. To achieve this, calibration methods and algorithms have been implemented in order to adjust the data obtained by the cell phone accelerometer. A computer environment has been created to obtain data for the response of IRI values in the field. In the same way, equipment such as the Dipstick and the ProVal application have been used to compare the data obtained with the new software tool. The results obtained show a stable and reliable application in relation to the equipment and application used. Finally, this work represents a new perspective of computer development under scenarios oriented to civil engineering.

Keywords: pavement, international roughness index, transport, pavement evaluation.

RESUMO

Não há dúvida que a estimativa do Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI) é de grande importância ao avaliar a qualidade superficial de um pavimento, pois é possível avaliar a qualidade do trajeto, a segurança, o conforto do usuário e reduzir os custos operacionais do veículo. Consequentemente, nos últimos anos, diferentes ferramentas de software de baixo custo foram desenvolvidas para apoiar a estimativa do valor do IRI. Espera-se que, com estas novas tecnologias, a avaliação do IRI seja realizada com mais frequência, a fim de tornar mais eficiente o período de manutenção das estradas. Neste contexto, este trabalho de conclusão de curso desenvolveu uma ferramenta informática para avaliar o índice de irregularidade longitudinal do pavimento utilizando o ambiente de desenvolvimento LabView. Para isso, métodos e algoritmos de calibração foram implementados a fim de ajustar os dados obtidos pelo acelerômetro do telefone móvel. Foi criado um ambiente informático para obter dados para a resposta dos valores do IRI no campo. Da mesma forma, equipamentos como o Dipstick e o aplicativo ProVal foram usados para comparar os dados obtidos com a nova ferramenta informática. Os resultados obtidos mostram uma aplicação estável e confiável em relação ao equipamento e aplicação utilizados. Finalmente, este trabalho representa uma nova perspectiva de desenvolvimento de computadores sob cenários orientados à engenharia civil.

Palavras chaves: pavimento, índice de irregularidade longitudinal, transporte, avaliação de pavimentos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representación de un esquema de deterioro de un pavimento a lo largo del tiempo.....	25
Figura 2. Estructura de pavimento asfáltico (corte transversal).....	27
Figura 3. Estructura de pavimento asfáltico.....	27
Figura 4. Ciclo de vida del pavimento.....	31
Figura 5. Esquema de los distintos niveles de condiciones de las irregularidades...31	
Figura 6. Valores límites del IRI para pavimentos en servicio en función de la longitud del segmento L.....	33
Figura 7. Varios rangos de variación del IRI según el caso y la situación	34
Figura 8. Clases de equipamientos	38
Figura 9. Esquema del método Nivel y Mira.....	40
Figura 10. Modelo del dispositivo <i>Dipstick</i> (izquierda) y del dispositivo <i>Walking Profiler</i> (derecha)	41
Figura 11. Esquema de funcionamiento del equipo <i>Dipstick</i>	42
Figura 12. Clasificación del teléfono móvil con relación a los otros equipos de medición de regularidad longitudinal	43
Figura 13. Proceso metodológico del SmartIRI	45
Figura 14. Ejemplo de la planilla obtenida como resultado durante una evaluación con el SmartIRI	45
Figura 15. Clasificación propuesta por la aplicación SmartIRI.....	46
Figura 16. Model del mapa generado por la aplicación SmartIRI.....	46
Figura 17. Ejemplo de mapa obtenido con Roadroid representado los resultados obtenidos.....	49
Figura 18. Pantalla de la aplicación IRI.Regularidad.Carreteras	50
Figura 19. Resultados obtenidos con IRI.Regularidad.Carreteras representados en un mapa	51
Figura 20. Sistema de coordenadas de un telefono móvil inteligente.....	52
Figura 21. Pantalla de la aplicación AndroSensor	53
Figura 22. Interfaz gráfica de ProVAL.....	56
Figura 23. Vista aérea de la Av. Las Acacias	58
Figura 24. Zona de estudio: Av. Las Acacias	58

Figura 25. Vista aérea de la Av. Juan B. Flores	59
Figura 26. Zona de estudio: Av. Juan B. Flores.....	59
Figura 27. Vista aérea de la Av. Acosta Ñu	60
Figura 28. Zona de estudio: Av. Acosta Ñu	60
Figura 29. Vista aérea de la Av. Bahamas	61
Figura 30. Zona de estudio: Av. Bahamas.....	61
Figura 31. Equipo Dipstick.....	63
Figura 32. Línea guía para medición con el dispositivo Dipstick.....	63
Figura 33. Nivelamiento del equipo Dipstick.....	64
Figura 34. Fijación del teléfono móvil al asiento trasero del vehículo	65
Figura 35. Vehículo utilizado en la toma de datos	66
Figura 36. Diagrama de flujo de la herramienta.....	72
Figura 37. Fragmento del diagrama de bloques del VI principal encargado de la extracción de datos	73
Figura 38. Diagrama de bloques del SubVI para el cálculo del sesgo.....	75
Figura 39. Diagrama de bloques del SubVI para el cálculo de la primera columna de la matriz M.....	77
Figura 40. Diagrama de bloques del SubVI para el cálculo de Pitch y Roll	78
Figura 41. Fragmento del diagrama de bloques del VI principal encargado del procesamiento de datos	79
Figura 42. Fragmento del diagrama de bloques del VI principal encargado del cálculo de desplazamiento y del índice IRI.....	80
Figura 43. Explorador del Proyecto	81
Figura 44. Pavimento de la Avenida las Acacias	83

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de la Red Vial del Paraguay	28
Tabla 2. Resumen de la Red Vial de Alto Paraná.....	29
Tabla 3. Requisitos del IRI de la normativa paraguaya.....	35
Tabla 4. Requisitos del IRI de la normativa brasilera	36
Tabla 5. Resumen de los equipamientos utilizados para medir la regularidad superficial de los pavimentos	39
Tabla 6. Resultados obtenidos utilizando el equipo <i>Dipstick</i>	82
Tabla 7. Resultados del análisis de la Av. Las Acacias	84
Tabla 8. Resultados del análisis de la Av. Juan B. Flores.....	84
Tabla 9. Resultados del análisis de la Av. Acosta Ñu	85
Tabla 10. Resultados del análisis de la Av. Bahamas	85
Tabla 11. Resultados del análisis de la Av. Las Acacias	86
Tabla 12. Resultados del análisis de la Av. Juan B. Flores.....	87
Tabla 13. Resultados del análisis de la Av. Acosta Ñu	88
Tabla 14. Resultados del análisis de la Av. Bahamas	88
Tabla 15. Comparación entre valores del IRI obtenidos por el <i>Dipstick</i> y la herramienta informática.....	89
Tabla 16. Comparación entre valores del IRI obtenidos por el <i>Dipstick</i> y el valor medio del IRI obtenido por la herramienta informática	90
Tabla 17. Comparación entre valores del IRI obtenidos por la herramienta informática y la aplicación ProVAL.....	90
Tabla 18. Comparación entre el valor medio del IRI obtenido por la herramienta informática y la aplicación ProVAL	91
Tabla 19. Comparación entre valores del IRI obtenidos por la herramienta informática y la aplicación ProVAL.....	91
Tabla 20. Comparación entre el valor medio del IRI obtenido por la herramienta informática y la aplicación ProVAL	91
Tabla 21. Comparación entre valores del IRI obtenidos por la herramienta informática y la aplicación ProVAL.....	92
Tabla 22. Comparación entre el valor medio del IRI obtenido por la herramienta informática y la aplicación ProVAL	92

Tabla 23. Comparación entre valores del IRI obtenidos por la herramienta informática y la aplicación ProVAL.....93

Tabla 24. Comparación entre el valor medio del IRI obtenido por la herramienta informática y la aplicación ProVAL93

SUMARIO

1 CAPÍTULO: INTRODUCCIÓN.....	18
1.1 Contexto del trabajo de conclusión de curso.....	18
1.2 Objetivos	21
1.2.1 Objetivo General.....	21
1.2.2 Objetivos Específicos	21
1.3 Límites de trabajo de conclusión de curso	22
1.4 Método científico y estructura de trabajo de conclusión de curso	22
2 CAPÍTULO: SÍNTESIS DE LA BIBLIOGRAFÍA FUNDAMENTAL	24
2.1 Pavimentos	24
2.1.1 Pavimento asfáltico.....	25
2.1.2 Estado de las vías en Paraguay	27
2.2 Regularidad Longitudinal.....	29
2.2.1 Término rugosidad y regularidad	29
2.2.2 Concepto	30
2.3 Índice de Regularidad Internacional (IRI)	32
2.3.1 Conceptualización del IRI	32
2.3.2 Normativa Paraguaya referente al índice IRI	34
2.3.3 Normativa Brasileira referente al índice IRI	35
2.4 Tecnologías para medir el IRI	37
2.5 Aplicativos móviles como alternativa de medición del índice de regularidad internacional.....	42
2.5.1 SmartIRI.....	43
2.5.2 Roadroid	46
2.5.3 IRI. Regularidad. Carreteras	48
2.6 Dispositivo móvil y sensores	50

2.6.1 Calibración de sensores	52
2.7 LabVIEW	53
2.7.1 Concepto	53
2.8 ProVAL	54
3 CAPÍTULO: METODOLOGÍA.....	56
3.1 Caracterización de la metodología	56
3.2 Metodología de adquisición de datos en campo.	61
3.2.1 Determinación del IRI utilizando el equipo <i>Dipstick</i>	61
3.2.2 Adquisición de los datos de aceleración	64
3.3 Metodología de tratamiento de los datos	66
3.3.1 Tratamiento de los datos de aceleración	66
3.4 Metodología para el desarrollo de la aplicación informática.	68
3.5 Resumen de la metodología	68
4 CAPÍTULO: DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA INFORMÁTICA	70
4.1 Diagrama de flujo de la herramienta creada	70
4.1.1 Leer aceleraciones	72
4.1.2 Calibración del acelerómetro	73
4.1.3 Cálculo de la matriz de rotación.....	76
4.1.4 Obtención de los valores de desplazamiento	78
4.1.5 Obtención del valor del IRI.....	79
4.2 Explorador del proyecto	79
5 CAPÍTULO: ANÁLISIS DE RESULTADOS	81
5.1 Resultados obtenidos en campo utilizando el equipo <i>Dipstick</i>	81
5.2 Resultados obtenidos con la herramienta informática para la evaluación del IRI en ingeniería civil.....	82
5.3 Resultados obtenidos con la aplicación ProVAL	85
5.4 Comparación de los datos determinados por el <i>Dipstick</i> y la herramienta informática desarrollada.....	88

5.5 Comparación de los datos determinados por la herramienta informática desarrollada y la aplicación ProVAL	89
5.6 Fuentes de posibles errores que influyen en el cálculo del IRI.....	92
6 CAPÍTULO: CONCLUSIONES	94
6.1 Conclusiones generales	94
6.2 Conclusiones específicas	94
6.3 Recomendaciones para mejorar la herramienta informática desarrollada:	95
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
APÉNDICES	100
APÉNDICE A - MANUAL DE UTILIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA.....	101
ANEXOS.....	106
ANEXO A -SISTEMA DE COORDENADAS Y RELACIÓN ENTRE ELLAS.....	107

1 CAPÍTULO: INTRODUCCIÓN

En esta sección se presenta el contexto del trabajo de conclusión de curso, los objetivos, los límites del trabajo y la estructura principal del estudio. La configuración de los temas aquí mostrados, han sido indicados para el sector de la construcción, específicamente en el área de vías terrestres.

El desarrollo de este estudio se entiende como la yuxtaposición de distintas áreas de trabajo con un fin específico. Por un lado, se ha potencializado el desarrollo de una herramienta informática (aplicación) en un dispositivo electrónico móvil adoptando conocimientos de programación, así como la aplicación de conocimientos técnicos en el área de carreteras.

El alcance y las propias limitaciones del estudio sugieren el desarrollo de nuevas iteraciones de aplicación de la herramienta creada que permita validar en su totalidad el comportamiento informático en aras de garantizar la facilidad de aplicación durante la etapa de campo.

1.1 Contexto del trabajo de conclusión de curso

La conservación y mantenimiento de las vías urbanas e interurbanas ha sido un desafío perenne en las administraciones públicas. El desarrollo económico de una región es inherente a la calidad de sus obras de infraestructura.

Según datos oficiales (actualizado al 2021) se tiene que la red viaria en Paraguay es de 78.500Km, de las cuáles 14,55% de las vías se encuentran pavimentadas (MOPC, 2021). Es de gran importancia que estas vías pavimentadas se encuentren en buen estado para no acarrear gastos innecesarios tanto para el usuario como para el estado, y garantizar la seguridad del usuario.

Almeida (2018, p.15) comenta que la información acerca del estado estructural y funcional de un pavimento resulta útil e importante para el análisis de la irregularidad de la superficie, normalmente medida por el Índice Internacional de Regularidad (IRI).

Según Bisconsini (2016, p.11) la irregularidad longitudinal del pavimento perjudica la calidad de desplazamiento, aumentando los costos operacionales de los vehículos y así se reduce la vida útil de la vía. Para Oliveira (2018, p.35) por otro lado, la irregularidad longitudinal del pavimento altera las condiciones de desplazamiento, relacionando directamente con la calidad de rodamiento y la seguridad de los usuarios

en las vías, constituyendo así el parámetro más acreditado en la definición de la calidad de la funcionalidad de una vía.

El Manual de Gerencia de Pavimentos del Departamento Nacional de Infraestructura y transportes de Brasil - DNIT (2011, p. 48) conceptualiza al IRI como el índice estático, expresado en m/km, que cuantifica los desvíos de la superficie del pavimento relacionado al proyecto. Este índice ha sido utilizado como herramienta en obras de control y aceptación de los servicios en algunos países.

Por otra parte, el Manual de Carreteras del Paraguay de la Asociación Paraguaya de Carreteras (APC) (2019a, p. 137) conceptualiza el IRI como un indicador del estado de confort de la ruta, el cuál repercute directamente en costos operacionales del vehículo y en los tiempos de viaje, su valor siempre debe mantenerse actualizado debido a que es uno de los datos más importantes para la evaluación socioeconómica en los proyectos viales.

Oliveira Filho et. al. (2019, p. 02) expresa que las nuevas tecnologías suponen la configuración de nuevas herramientas de apoyo de medición en vías, las cuales deben ser utilizadas como opción ante el uso de equipamientos más modernos comparado con aquellas indicadas por las normas.

Toribio y Lazares (2019, p. 24) comentan que los actuales métodos de inspección utilizados en la determinación de la calidad de las vías contemplan altos costos de inversión o en su mayoría son de lenta ejecución. Por ello, realizar seguimientos a las condiciones en las que se encuentran los pavimentos de manera eficiente, utilizando técnicas modernas y de bajo costo que optimice los recursos de los gobiernos municipales es una tarea muy importante.

Se han desarrollado varios instrumentos con el fin de medir la irregularidad longitudinal del pavimento, sin embargo, existen conflictos entre las diferentes clases de equipos, con respecto a la precisión, los costes y la productividad, lo que dificulta la recopilación continua de datos, importante para alimentar un Sistema de Gestión de Pavimentos (PMS) (BISCONSINI, 2016, p.11).

Miquel (2006, p. 17) argumenta que el IRI es utilizado y aceptado ampliamente en todo el mundo, tanto en investigaciones como por agencias viales de los países, debido a que este indicador actúa directamente a la percepción que tiene el usuario sobre el estado de la vía. Esto cumple con la actual perspectiva de contemplar al usuario como consumidor que necesita un servicio altamente adecuado.

Desde el punto de vista de Vargas (2009, p.30) conocer los valores de la regularidad superficial del pavimento tanto antes del inicio de su operación de servicio y luego de ello, permitirá determinar los trabajos de conservación y de rehabilitación necesarias, evitando así incrementar sus costos. Debido a esto, varios países han utilizado el Índice de Regularidad Internacional (IRI), como parámetro de análisis de evaluación de la regularidad.

Mantener las vías de circulación con la menor cantidad de irregularidades es de gran importancia, para eso se realizan mediciones con distintos equipos y aplicaciones informáticas para dispositivos móviles y tabletas, las cuáles primordialmente buscan el Índice de Regularidad Internacional (IRI).

En España, por ejemplo, el índice IRI se utiliza particularmente en el caso del estado de conservación de la infraestructura, cumpliendo el criterio de que durante el tiempo de concesión el IRI sea menor a 2m/km. en al menos un 90% de la longitud del tramo sometido a inspección. Por otro lado, para el caso de las carreteras concesionadas en Colombia el índice IRI tiene un valor de referencia de 3.5m/km esto es ,especificado por el Ministerio de Obras Públicas y Transporte. En lo que se refiere a México, cuenta con cinco índices para la evaluación de la calidad de la carretera entre ellos se encuentra el índice IRI, utilizado para conocer y determinar cuál es el estado de conservación de la carretera. El Sistema de administración de pavimentos HDM-4 es el que considera su criterio de clasificación, este considera un $IRI < 3$ bueno, entre $3 \leq IRI \leq 5$ aceptable y un $IRI > 5$ deficiente (DÍAZ, PÉREZ, ROJAS, 2011). En Brasil por su parte, también utiliza el índice IRI para evaluar la condición de la superficie del pavimento, el Departamento Nacional de Infraestructura de Transportes (DNIT) es el que considera su criterio de clasificación por medio del manual de restauración de pavimentos asfálticos de la DNIT (2006a, p.28), este considera los valores para el índice IRI, en un intervalo de $1 \leq IRI \leq 1,9$ como excelente, en un intervalo de $1,9 \leq IRI \leq 2,7$ considerado como bueno, en un intervalo de $2,7 \leq IRI \leq 3,5$ supone un estado regular y para los intervalos entre $3,5 \leq IRI \leq 4,6$ como mala y $IRI > 4,6$ pésimo.

En lo que se refiere a Paraguay, el análisis de las vías oficiales se encuentra a cargo del Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (MOPC), con ayuda de la Asociación Paraguaya de Carreteras (APC). Está última conserva el manual de carreteras del Paraguay, el cuál es utilizado como referencial de consultas y guía por excelencia y es utilizado como instrumento normativo, garantizando que los proyectos

sean ajustados a sus respectivas funciones. El manual de carreteras de la APC (2019c, p. 422) estipula que debe ser controlada la regularidad superficial del pavimento a través de la determinación del índice IRI, siguiendo el procedimiento vigente de la Dirección Nacional de Viabilidad.

Ante la necesidad de contar con herramientas fiables, precisas y de bajo costo para la medición del índice de regularidad este estudio supone el desarrollo de una herramienta informática que evalúe el índice IRI, utilizando sensores incorporados en el teléfono móvil para obtener los datos requeridos, contrastando estas mediciones con los valores del IRI obtenidas por un equipo de medición profesional y con una aplicación para el sistema operativo Windows que calcula el índice IRI.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

El objetivo de este trabajo de conclusión de curso se centra en desarrollar una herramienta informática de bajo costo que permita determinar el estado superficial de las principales vías de Hernandarias en Paraguay.

El desarrollo del estudio se entiende como la evaluación de la regularidad superficial de vías utilizando el indicador de regularidad IRI (mm/m, m/km, in/milla), para pavimentos con tipologías como asfalto, empedrado, adoquinado y tierra.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para alcanzar el objetivo principal del trabajo de conclusión de curso, se han definido los objetivos específicos para el correcto desempeño del estudio y son como sigue:

- a) Identificar las distintas tecnologías y aplicaciones informáticas para dispositivos móviles y tabletas de bajo costo, que permitan medir el índice IRI.
- b) Identificar y corregir fuentes de errores que pueda tener el sensor utilizado.
- c) Identificar los procesos necesarios para la adecuación de las medidas tomadas para su uso en el cálculo del IRI.
- d) Realizar el levantamiento de campo utilizando un equipo de precisión y el teléfono móvil.

- e) Comparar y validar los resultados obtenidos de la herramienta informática desarrollada con el dispositivo de precisión seleccionado.

1.3 Límites de trabajo de conclusión de curso

El estudio se ha centrado en desarrollar un análisis teórico experimental que permita estudiar el índice de regularidad IRI (mm/m, m/km, in/milla) de forma sistemática y tecnológica. Para ello, se han dividido las condiciones de contorno del estudio en geográficas, tecnológicas y económicas.

Respecto al entorno geográfico. La validación de la herramienta se centra en la ciudad de Hernandarias (Paraguay) considerada como entidad de residencia del estudiante.

Respecto al entorno tecnológico. El estudio toma de base la metodología IRI en aras de buscar la calibración de los distintos modelos y aplicaciones tecnológicas actualmente desarrollados por empresas privadas. El estudio compara los beneficios tecnológicos y económicos contrastados con los métodos más usados hoy en día en el sector de las vías terrestres.

Respecto a las limitaciones económicas. El desarrollo del estudio supone la necesidad de automatización de la toma de datos, así como en el cálculo del IRI en campo, el cual fija los principales requerimientos de este estudio. El uso de instrumentación de bajo costo sugiere la incorporación de nuevas alternativas tecnológicas durante el proceso de toma de decisión y aceptación de vías.

1.4 Método científico y estructura de trabajo de conclusión de curso

Los apartados anteriores, sirven de introducción y justificativa del problema que se pretende abordar en el trabajo, el cual se estructura de la siguiente manera:

En el **Capítulo 1**, se presenta la base introductoria del problema, donde se expone el contexto del trabajo de conclusión de curso, los objetivos generales y específicos, concluyendo con el método científico y estructura de trabajo de conclusión de curso.

En el **Capítulo 2**, se presenta la síntesis de la bibliografía fundamental, exponiendo los conceptos de pavimentos, regularidad longitudinal, Índice de

Regularidad Internacional (IRI), se exponen las distintas tecnologías para medir el IRI, se presenta un resumen sobre los aplicativos móviles como alternativa de medición del IRI, para finalizar se trata brevemente sobre el entorno de programación LabVIEW y la aplicación ProVAL.

En el **Capítulo 3**, se ha definido la metodología de evaluación contemplada para este trabajo de conclusión de curso, indicando las etapas y equipos empleados durante las etapas del levantamiento de información y la construcción del algoritmo informático.

En el **Capítulo 4** se presentan las características principales de la herramienta informática creada y la construcción de la interfase en el entorno de programación LabVIEW describiendo sus algoritmos y las fases de configuración del producto obtenido para la evaluación del IRI.

En el **Capítulo 5**, se presentan el análisis de los resultados finales del trabajo de conclusión de curso.

En el **Capítulo 6**, se presentan las conclusiones del trabajo de final de curso y se proponen tareas para la mejora de la herramienta informática.

En el **Capítulo 7**, se presentan las referencias bibliográficas y literatura especializada utilizadas para el desarrollo de este estudio de trabajo de conclusión de curso.

En el **Apéndice A**, se presenta el manual de utilización de la herramienta informática desarrollada, donde se detallan los pasos a seguir para la utilización de la herramienta.

En el **Anexo A**, se presentan los detalles de los sistemas de referencia utilizados en la herramienta informática desarrollada.

2 CAPÍTULO: SÍNTESES DE LA BIBLIOGRAFÍA FUNDAMENTAL

En el capítulo 1 se ha revisado el contexto del trabajo de conclusión de curso, los objetivos, los límites del trabajo y las estructuras principales de este trabajo de conclusión de curso en el área de ingeniería civil, específicamente en el área de carreteras. Si bien, se han definido las directrices principales para el desarrollo del estudio, es necesario construir el marco teórico que defina los conceptos y fundamentos teóricos del índice de regularidad superficial empleados en pavimentos.

Bajo este contexto, en esta sección son discutidos los conceptos de pavimentos, regularidad longitudinal, Índice de Regularidad Internacional (IRI), se presentan las distintas tecnologías para medir el IRI y los aplicativos móviles como alternativa de medición del IRI. Para finalizar este capítulo se trata de forma breve las principales características, potencialidades y necesidades informáticas del entorno de programación LabVIEW y por último se presenta las características y funcionalidades de la aplicación ProVAL.

2.1 Pavimentos

El pavimento de una carretera es la estructura compuesta por varias capas de espesor limitado, instaurado sobre un semi espacio el cuál es considerado como infinito, denominado de subrasante. De manera general se clasifican en flexibles, semi rígidos y rígido. (DNIT, 2006b, p.95)

Bernucci et al. (2008, p. 08) comenta que tradicionalmente los pavimentos rodoviaros son clasificados en rígidos y flexibles, pero actualmente existe la tendencia de nombrarlos pavimentos asfálticos y pavimentos de concreto de cemento Portland (o sencillamente pavimentos de concreto), respectivamente, esto para indicar la clase de revestimiento del pavimento.

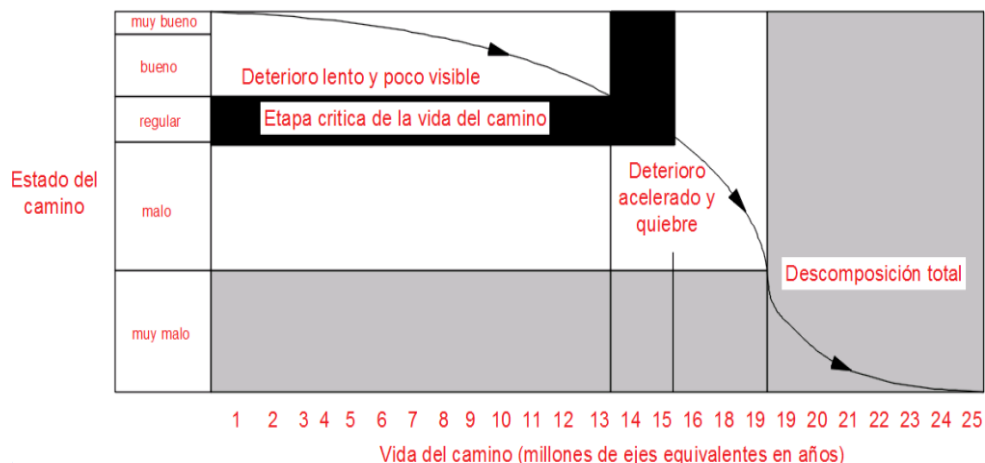
La finalidad de los pavimentos es prestar un servicio a la circulación de los vehículos de forma segura, cómoda y eficiente, por lo que es muy importante realizar una adecuada y oportuna labor de mantenimiento de estos. El concepto de mantenimiento de pavimentos significa la acción de cuidar que su servicio se prolongue por el tiempo requerido, lo que implica un esfuerzo de preocupación de los responsables y un importante desembolso de recursos por parte del organismo responsable. El término mantenimiento de los pavimentos se entiende como la acción

de procurar que su servicio se alargue el tiempo necesario, lo que conlleva un esfuerzo de preocupación por parte de los responsables y un desembolso importante de recursos por parte del organismo encargado (ALARCÓN, 2015, p.04).

Alarcón (2015, p.04-05) explica que la gestión de pavimentos son todas aquellas acciones de mantenimiento que, aplicadas a lo largo del tiempo, permiten mantener un nivel de servicio apropiado, tanto funcional como estructuralmente.

En la Figura 1 se presenta un gráfico que refleja la forma general de deterioro de los pavimentos, en el que se observa que en los primeros años el deterioro es lento; no obstante, hay un umbral en el que el deterioro se acelera, llegando rápidamente al final de la vida útil de la carretera.

Figura 1. Representación de un esquema de deterioro de un pavimento a lo largo del tiempo



Fuente: Adaptado según Alarcón, 2015, p.05.

Las causas principales del deterioro anticipado de los pavimentos según Alarcón (2015, p.05) son: Las deficiencias de diseño y en la construcción, incrementos del tráfico de vehículos que no fueron previstos, condiciones ambientales desfavorables, agotamiento del plazo de diseño.

2.1.1 Pavimento asfáltico

Bernucci et al. (2008, p. 27) comenta que el asfalto es uno de los materiales de construcción más antiguos y versátiles usados por el hombre. En la mayor parte de los casos del mundo, la pavimentación con asfalto es la forma principal de revestimiento.

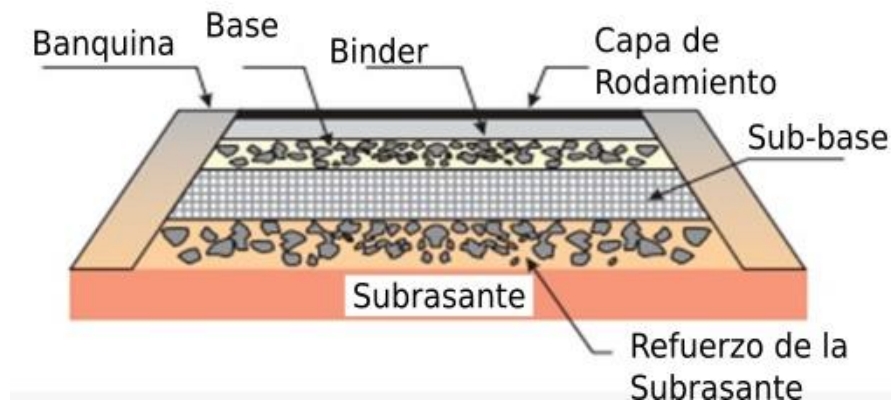
El uso intensivo del asfalto en la pavimentación se debe a varias razones, siendo las principales: ofrece una fuerte unión de los agregados, actuando como un aglutinante el cual permite flexibilidad que puede ser controlada; es impermeable, duradero y resistente a la acción de la mayoría de los ácidos, de los álcalis y sales, y se puede utilizar calentado o emulsionado, en una amplia gama de combinaciones de esqueleto mineral, con o sin aditivos (BERNUCCI et al., 2008, p. 27).

El asfalto que se utiliza en la pavimentación es un ligante bituminoso que se obtiene de la destilación del petróleo y posee la propiedad de ser un adhesivo termo visco plástico, impermeable al agua y resulta poco reactivo. Su baja capacidad de reacción química frente a muchos agentes no impide que el material pueda sufrir un proceso de envejecimiento debido a la lenta oxidación por contacto con el aire y el agua (BERNUCCI et al., 2008, p. 28).

El pavimento asfáltico (pavimento flexible) es aquel en donde los revestimientos están constituidos por una mezcla formada básicamente por áridos asfálticos y ligantes. Su estructura se presenta en cuatro capas principales: revestimiento asfáltico, base, subbase y el refuerzo de la subrasante. El revestimiento asfáltico puede estar constituida por una capa de rodamiento, en contacto directo con las ruedas de los vehículos y a través de capas intermediarias o de unión. En algunos casos es posible la ausencia de algunas capas, esto depende de los materiales disponibles y el tráfico (BERNUCCI et al., 2008, p. 11).

Se muestra en la Figura 2 el corte transversal de una estructura de pavimento asfáltico, en donde se puede apreciar sus capas. Por lo general se constituyen por una capa delgada de mezcla asfáltica, el cuál reposa sobre una capa de base y otra de sub-base que generalmente son de materiales granulares, y estas capas van sobre un suelo compactado que lleva el nombre de subrasante. Para Bernucci et al. (2008, p. 12) son de gran importancia estructural las capas en donde reposa la carpeta asfáltica.

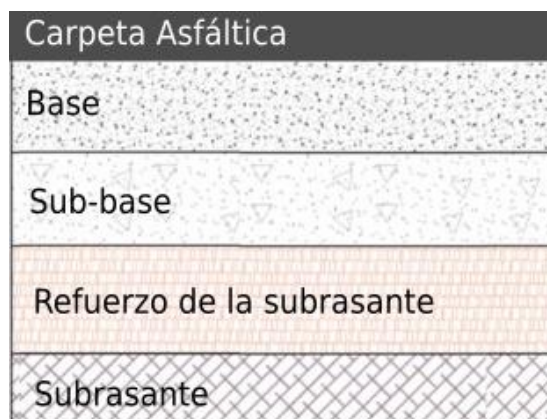
Figura 2. Estructura de pavimento asfáltico (corte transversal)



Fuente: Adaptado según Bernucci et al., 2008, p. 12

En la Figura 3 se presenta la estructura del pavimento asfáltico, se puede apreciar la composición del pavimento flexible, en donde la carpeta asfáltica reposa sobre la base, la sub-base, el refuerzo de la subrasante y la subrasante. Bernucci et al. (2008, p. 339) comenta que se pueden eliminar una o más capas dependiendo del flujo de tráfico, la capacidad portante del subsuelo, el espesor y la rigidez de las capas.

Figura 3. Estructura de pavimento asfáltico



Fuente: Adaptado según Bernucci et al., 2008, p. 339

2.1.2 Estado de las vías en Paraguay

En el manual de carreteras de Paraguay de la APC (2019b, p.567) se define el pavimento como una estructura conformada por varias capas de materiales seleccionados y algunos tratados cuando necesario, colocados sobre la subrasante. Esto tiene como objetivo proveer una superficie de rodadura segura y apropiada bajo

distintas condiciones ambientales, las cuáles deben soportar las solicitudes que el tráfico impone.

En la Tabla 1 se presenta un resumen del sistema viario de Paraguay, se puede observar que el total de red inventariada a nivel país es de 78.500 Km. En el resumen se puede apreciar que la clasificación por tipo de red es: nacional, departamental y vecinal. En la misma se observa que se dividen en dos tipos de superficie: la pavimentada y no pavimentada. Se percibe que el total de red pavimentada (PCA, Trat.Superf., H°CP, Adoquinado, Empedrado, Empedrado Enripiado) es de 14,55%.

Tabla 1. Resumen de la Red Vial del Paraguay

RESUMEN DE LA RED VIAL DEL PAIS									
	Corte: Julio 2021						Total Red Inventariada Departamental en (Km.):		78.500
TIPO DE RED	TIPO DE SUPERFICIE								TOTALES POR TIPO DE RED (km)
	PAVIMENTADA (km)						NO PAVIMENTADA (km)		
	PCA	TRAT.SUPERF	H°CP	ADOQUINADO	EMPEDRADO	EMPEDRADO ENRIPIADO	ENRIPIADO	TIERRA	
NACIONAL(km)	4841,98	261,37	0,00	34,63	51,47	70,83	0,00	3518,92	8.779
DEPARTAMENTAL	2327,95	84,90	0,00	0,00	319,43	476,53	0,00	4637,73	7.847
VECINAL(km)	1624,51	33,08			591,88	701,03		58923,71	61.874
TOTALES POR TIPO DE SUPERFICIE(km)	8.794,44	379,34	0,00	34,63	926,78	1.248,38	0,00	67.080,35	78.500
%									
PAVIMENTADA ASFALTICA(km)- OTROS	9.173,79		2.245,79				67.080,35		
%	11,69		2,86				85,45		
	14,55						85,45		
	100								

Fuente: MOPC, 2021

En el Paraguay 11,69% de las rutas cuentan con pavimento asfáltico, el cuál 6,19% corresponde al departamento de Alto Paraná (departamento donde se encuentra la ciudad de estudio Hernandarias), siendo así 622,67km de asfalto (MOPC, 2021).

En la Tabla 2 se expone el resumen en kilómetros y porcentaje de las redes viales del departamento de Alto Paraná, dividida en tipo de red y superficie. Se puede observar que 6.19% de carreteras pavimentadas se encuentran en el departamento

de Alto Paraná con respecto a un total de 10.061 Km de la red inventariada en el departamento.

Tabla 2. Resumen de la Red Vial de Alto Paraná

RESUMEN DE LA RED VIAL DE ALTO PARANA									
	Corte: Julio 2021						Total Red Inventariada Departamental en (Km.):		10.061
TIPO DE RED	TIPO DE SUPERFICIE								TOTALES POR TIPO DE RED (km)
	PAVIMENTADA (km)						NO PAVIMENTADA (km)		
	PCA	TRAT.SUPERF	HºCP	ADOQUINADO	EMPEDRADO	EMPEDRADO ENRIPIADO	ENRIPIADO	TIERRA	
NACIONAL(km)	422,51	0,00	0,00	0,00	4,65	0,00	0,00	116,57	543,73
DEPARTAMENTAL	117,25	0,00	0,00	0,00	7,89	90,67	0,00	56,11	271,92
VECINAL(km)	82,91	0,00	0,00	0,00	84,24	78,11	0,00	9000,26	9.245,53
TOTALES POR TIPO DE SUPERFICIE(km)	622,67	0,00	0,00	0,00	96,78	168,78	0,00	9.172,94	10.061,18
%									
PAVIMENTADA ASFALTICA(km)- OTROS	622,67		265,56				9172,94		
%	6,19		2,64				91,17		
	8,83						91,17		
	100								

Fuente: MOPC, 2021

2.2 Regularidad Longitudinal

2.2.1 Término rugosidad y regularidad

Miquel (2006, p. 19) explica qué existe discrepancia en la utilización del término rugosidad y regularidad, algunos utilizan el término rugosidad (Índice de rugosidad Internacional) y otra regularidad (Índice de Regularidad Internacional). Considerando que el IRI determina el efecto que causa las irregularidades del pavimento en los usuarios, se adoptará el término regularidad en vez de rugosidad.

Por otro lado, Vargas (2009, p. 31) comenta que el termino regularidad se vincula más a la definición “*Roughness*” el cuál traduciendo a lengua castellana, es el término rugosidad. Sin embargo, para referirse a las irregularidades que se presentan en la superficie del pavimento que perjudican la calidad de la rodadura, costos operacionales del vehículo y la seguridad se prefiere utilizar Regularidad. Por lo expuesto, en el presente trabajo se utilizara el término regularidad, al referirnos al índice IRI (Índice de Regularidad Internacional).

2.2.2 Concepto

“La regularidad longitudinal de un pavimento o simplemente irregularidad, se define como el conjunto de desviaciones de la superficie del pavimento con relación a un plano de referencia, cuyas desviaciones afectan la calidad al rodamiento y la acción dinámica de las cargas sobre la vía. Es la grandeza física medible, directa o indirectamente, que mejor se correlaciona con el costo operativo de los vehículos, la comodidad, la seguridad, la velocidad de la ruta y a la economía de los viajes” (DNER,1998, p. 72).

Como explica el Manual de Gerencia de Pavimentos de la DNIT (2011, p.48) la irregularidad longitudinal con relación a un plano referencial ideal del proyecto geométrico es el sumatorio de los desvíos en la superficie de un pavimento, el cuál perjudica la dinámica de los vehículos, el efecto dinámico que producen las cargas, el drenaje de la vía y la calidad de rodadura. La irregularidad se mide a lo largo de una línea imaginaria, siendo esta paralela al eje de la ruta y generalmente coincidente con las regiones de la vía de la rueda, siendo así, en algunos casos genera el interés de detallar mejor el perfil, alzando la en distintas líneas imaginarias paralelas.

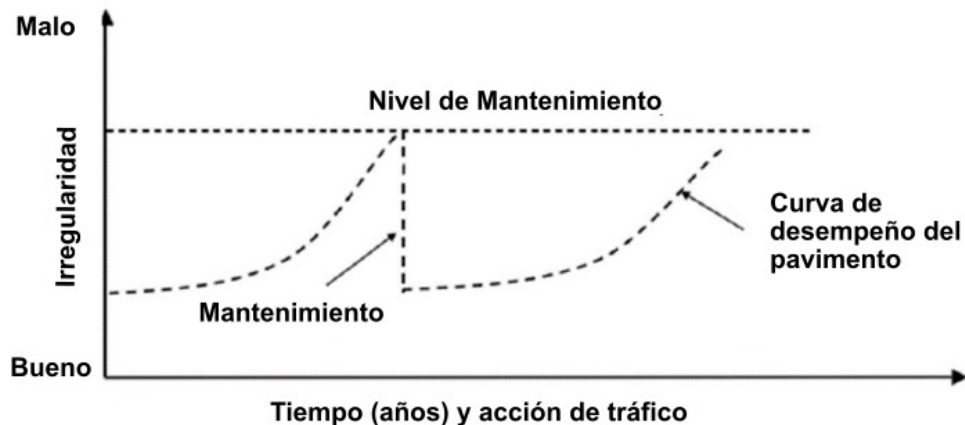
Bisconsini (2016, p. 06) expresa que estas deformaciones causan distintos inconvenientes, sobre todo una disconformidad el cuál el usuario percibe fácilmente. No es por acaso que la irregularidad longitudinal es estipulada como el principal defecto de la evaluación del pavimento, el cual se basa en el concepto de capacidad de servicio-desempeño desarrollado por Carey e Irick en 1960, producido desde los experimentos de la *AASHO Road Test*. Es legítima la percepción, cuando la irregularidad compromete el propósito para el cuál el pavimento es construido: seguridad de rodamiento, comodidad y suavidad.

La regularidad longitudinal, que se mide comúnmente por el IRI, tiene varias particularidades, entre las que podemos destacar que, a partir de un valor inicial, función del proceso constructivo, la irregularidad empieza a asumir valores crecientes, como consecuencia de la acción del tráfico, la climatología y otros factores de deterioro (ALMEIDA, 2018, p.21).

La regularidad son alteraciones que presenta el perfil longitudinal de una vía el cuál provocan vibraciones en los vehículos que circulan por ella. Este es medido con el indicador designado Índice de Regularidad Internacional (IRI), expresado en m/km (APC, 2019b, p.1049).

En la Figura 4 se presenta el ciclo de vida del pavimento, en donde se puede apreciar un gráfico de irregularidad en función de tiempo (años) y acción del tráfico. Se observa que cuando la irregularidad del pavimento llega a un cierto nivel se debe realizar el mantenimiento de la vía.

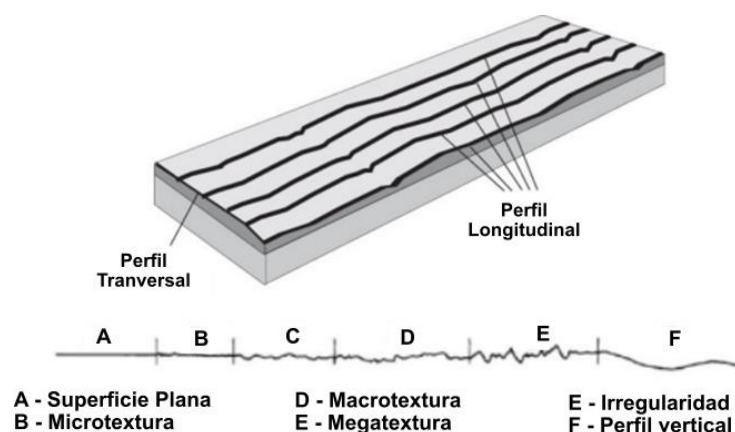
Figura 4. Ciclo de vida del pavimento



Fuente: Adaptado según Almeida, 2018 ,p.21

En la Figura 5 se presenta un esquema que representa los distintos niveles de irregularidad, en donde se presenta el intervalo de niveles de la superficie. Siendo A el rango que representa una superficie plana y F un perfil vertical.

Figura 5. Esquema de los distintos niveles de condiciones de las irregularidades



Fuente: Adaptado según Almeida, 2018 ,p.20

2.3 Índice de Regularidad Internacional (IRI)

En vista del interés de fomentar la utilización de una medida de regularidad que sea común en todos los proyectos del mundo, se seleccionó el Índice de Regularidad Internacional (IRI). Se ha denominado IRI, pues ha sido un producto del experimento Internacional de Regularidad de las Carreteras (IRRE), ejecutado por grupos de investigación de Brasil, Inglaterra, Francia, Estados Unidos y Bélgica. Este índice ha sido la escala de regularidad seleccionada para este estudio debido al cumplimiento de los siguientes criterios: estabilidad en el tiempo, es relevante, transportable, así como también es de fácil cuantificación por todos los profesionales que lo utilicen (SAYERS; GILLESPIE; PATERSON, 1986, p. 03).

2.3.1 Conceptualización del IRI

El IRI se define coloquialmente como la suma de aceleraciones verticales no deseadas que sufre el usuario de una carretera, al circular por ella, las cuales son provocadas por las desviaciones del perfil longitudinal real respecto al perfil teórico de proyecto. Según la definición del Banco Mundial (1986), el IRI se calcula como la razón del movimiento relativo acumulado por la suspensión del vehículo patrón, (que representa la cuarta parte de un vehículo de cuatro ruedas) dividido por la distancia recorrida por dicho vehículo, a una velocidad de 80 km/h.” (RUIZ Y ARCE, 2004, p. 2).

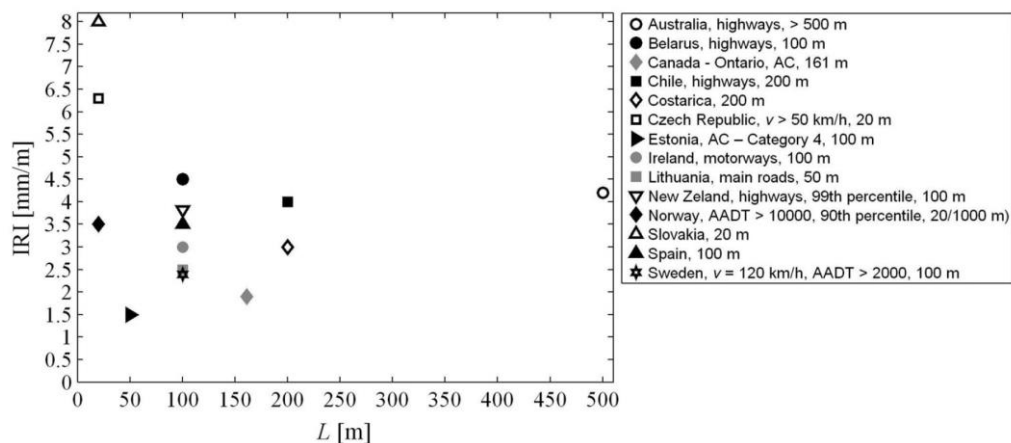
“El IRI es un indicador estadístico de la irregularidad superficial del pavimento; representa la diferencia entre el perfil longitudinal teórico (recta o parábola continua perfecta, $IRI = 0$) y el perfil longitudinal real existente en el instante de la medida” (MIQUEL, 2006, p. 19)

El Manual de Gerencia de Pavimentos de la DNIT (2011, p.48) expone que el IRI es un parámetro utilizado para medir la irregularidad, siendo un índice estático, que se expresa en m/km. Cuantifica las desviaciones que se encuentran en la superficie del pavimento relacionado al diseño y es utilizado en algunos países como herramienta de control y aceptación de obras y servicios.

Můčka (2017) comenta en su trabajo, que los valores límites del IRI son en función de los siguientes aspectos: del tipo de superficie y de la categoría funcional de la carretera, del tipo de velocidad en la carretera, del tráfico (diario, anual) y de la longitud del segmento. En la Figura 6 se puede observar los diversos valores límites

del índice IRI adoptadas en varios países del estudio realizado por Múčka (2017), se puede observar divergencias entre valores para la misma longitud del segmento, por ejemplo los límites del IRI varían entre 3.5mm/m (Noruega) a 8mm/m (Eslovaquia) para un intervalo de 20m, entre 2.5mm/m (Lituania) y 4.5mm/m (Bielorrusia) para un intervalo de 100m, entre 3mm/m (Costa Rica, 200m) y 4mm/m (Chile, 200 m) para un intervalo de 200m.

Figura 6. Valores límites del IRI para pavimentos en servicio en función de la longitud del segmento L



Fuente: Múčka, 2017, p. 948.

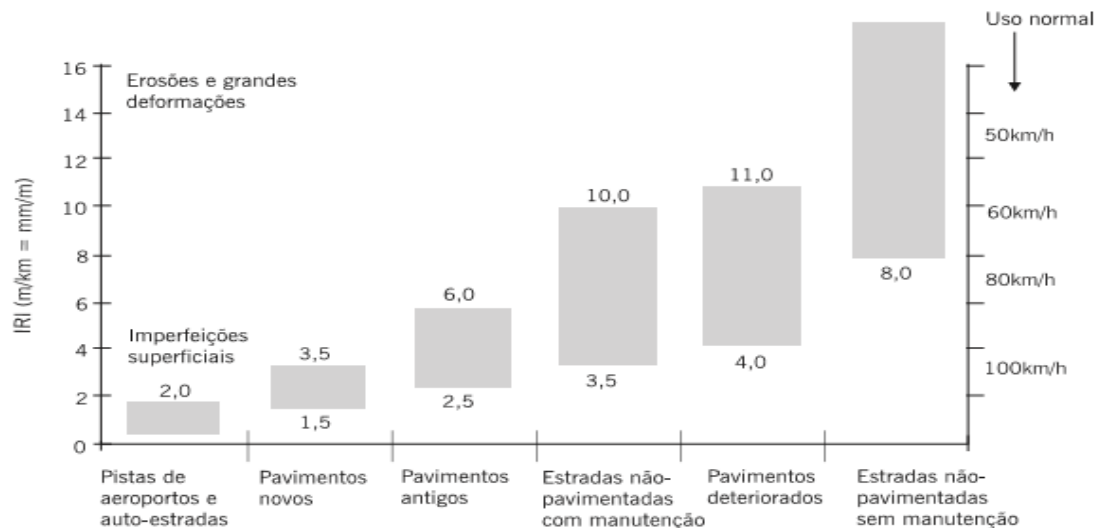
Según Karamihas y Sayers (1998, apud ALMEIDA, 2018, p.27), el IRI es un indicador del estado general del pavimento, el cual resume las características de la superficie proporcionadas por un sistema del tipo respuesta al impacto o al desplazamiento vertical. Además, es el índice más apropiado cuando se pretende relacionar el costo operativo del vehículo con la calidad de rodadura, las cargas dinámicas y el estado general de la superficie.

Para Karamihas y Sayers (1998, apud ALMEIDA, 2018, p.28) el índice IRI tiene una fuerte correlación con la mayoría de las respuestas de los vehículos, y según Almeida (2018, p.28) el índice IRI ha sido reconocido como un índice general que cuantifica la irregularidad de la superficie. Almeida (2018, p.28) también menciona que, en concreto, el IRI tiene una correlación elevada para tres clases de variables de respuesta del vehículo: la carga impuesta a los neumáticos, la medición de la respuesta del vehículo al estado del pavimento y la aceleración vertical del pasajero.

En la Figura 7 se muestra los distintos rangos del IRI en varias situaciones, se presentan varios tipos de pavimentos y la velocidad de uso normal en el intervalo

correspondiente del IRI, siendo para pistas de aeropuertos y auto-carreteras un intervalo de $0 \leq \text{IRI} \leq 2,0$ con una velocidad de uso normal arriba de los 100km/h, siendo para pavimentos nuevos un intervalo de $1,5 \leq \text{IRI} \leq 3,5$ con una velocidad de uso normal arriba de los 100km/h, así para pavimentos antiguos se presenta un intervalo de $2,5 \leq \text{IRI} \leq 6,0$ con una velocidad de uso normal entre 90 a 100km/h, ya para carreteras no pavimentadas con mantenimiento un intervalo de $3,5 \leq \text{IRI} \leq 10,0$ con una velocidad de uso normal entre 60 a 100km/h, para pavimentos deteriorados se tiene un intervalo de $4,0 \leq \text{IRI} \leq 11,0$ con una velocidad de uso normal entre 60 a 100km/h y por último para carreteras no pavimentadas y sin mantenimiento el intervalo es de $8,0 \leq \text{IRI} \leq 16,0$ con una velocidad de uso normal no superiores a 70km/h.

Figura 7. Varios rangos de variación del IRI según el caso y la situación



Fuente: Bernucci et al., 2008, p.408.

“El Índice Internacional de Rugosidad (IRI) es un indicador de rendimiento del pavimento que refleja no solo el estado del pavimento, sino también la calidad de conducción y el nivel de comodidad de los usuarios de la vía.” (ABDELAZIS et al., 2020, p.88-99).

2.3.2 Normativa Paraguaya referente al índice IRI

En el Manual de Carreteras del Paraguay de la APC, se encuentran los requisitos del proceso de control y de la unidad terminada para el pavimento asfáltico, en donde trata sobre los requisitos establecidos para el índice IRI (APC, 2019c).

Para la obtención del valor del IRI deben ser considerados tramos de 1000 metros (1 km) de longitud, siendo calculado un solo valor del IRI para cada 100 metros (hectómetro - hm) del perfil en estudio. En la Tabla 3 se pueden apreciar los requisitos que debe cumplir cada tramo de 1000 metros involucrados en la longitud de la obra.

Estos requisitos aplican para capas de rodamiento en: obras de rehabilitación en donde el espesor del asfalto es igual o superior a 10 centímetros (sin importar las distintas clases de mezcla asfáltica implicadas) y en obras nuevas.

En los casos en donde se necesite obtener el IRI para la huella izquierda y derecha de un tramo, los requisitos de la Tabla 3 deben ser verificados independientemente para cada uno de los perfiles longitudinales (APC, 2019c, p. 421 - 422).

Tabla 3. Requisitos del IRI de la normativa paraguaya

Porcentaje de hectómetros [%]	Requisitos
50	IRI < 1,5 m/km
80	IRI < 1,8 m/km
100	IRI < 2,0 m/km

Fuente: APC, 2019c, p. 422

2.3.3 Normativa Brasileira referente al índice IRI

En el manual de restauración de pavimentos asfálticos de la DNIT (2006a), se encuentra que el índice IRI es el más utilizado por la DNIT entre los varios índices existentes para la evaluación del servicio tales como: *Present Serviceability Rating* (PSI), *Valor de Serventia Atual* (VSA), *Levantamento Visual Contínuo* (LVC), *Índice de Gravidade Global Expedito* (IGGE), *Índice de Estado de Superfície* (IES), *Índice de Condição do Pavimento Flexível* (ICPF) e *International Roughness Index* (IRI).

De acuerdo con la DNIT (2006a, p.27) la regularidad puede medirse en varias escalas estándar y de acuerdo con el equipo de medición utilizado en ese momento. Los procedimientos relativos al atributo regularidad está adecuadamente normalizada por la DNIT, que en este caso contempla específicamente el parámetro QI (Cociente de Irregularidad) a través de los siguientes instrumentos: métodos de nivel y vista para la calibración de sistemas de medición de irregularidades (DNER - ES 173/86), tipo de respuesta (DNER - PRO - 164/94), calibración y control del sistema de medición

de irregularidades de la superficie del pavimento (DNER - PRO - 182/94), medición de la irregularidad de la superficie del pavimento con sistemas de medición (DNER - PRO - 229/94), mantenimiento de los sistemas de medición de la irregularidad de la superficie del pavimento - Integrador IPR/USP y Maysmeter.

La escala del "Índice de Regularidad Internacional" fue establecida por la DNIT como una escala de referencia transferible a otros sistemas de medición, con base a una investigación internacional sobre la medición de la regularidad realizada en Brasilia en 1992 (DNIT, 2006a, p.27).

En la práctica, los conceptos del cociente de regularidad (QI) y el IRI son bastante similares y es posible correlacionarlos, obteniendo así la relación $QI=13*IRI$, (DNIT, 2006a, p.28).

En la Tabla 4 se puede observar los niveles de conceptos atribuibles y relacionados con las condiciones de la superficie del pavimento según la DNIT (2006a), en donde se presentan los conceptos para cada valor de QI e IRI, teniendo el concepto un intervalo de excelente a pésimo. Para un intervalo de $13 \leq QI \leq 10,0$ y $1 \leq IRI \leq 1,9$ el pavimento se encuentra en un estado excelente, para un intervalo de $25 \leq QI \leq 35$ y $1,9 \leq IRI \leq 2,7$ el pavimento se encuentra en un estado bueno, para un intervalo de $35 \leq QI \leq 45$ y $2,7 \leq IRI \leq 3,5$ el pavimento se encuentra en un estado regular, ya para un intervalo de $45 \leq QI \leq 60$ y $3,5 \leq IRI \leq 4,7$ el pavimento se encuentra en un estado malo, y para un $QI > 60$ y un $IRI > 4,6$ el pavimento se encuentra en un estado pésimo.

Tabla 4. Requisitos del IRI de la normativa brasilera

Concepto	Regularidad	
	QI (cont./km)	IRI (m/km)
Excelente	13-25	1-1,9
Bueno	25-35	1,9 - 2,7
Regular	35-45	2,7 - 3,5
Malo	45-60	3,5 - 4,6
Pésimo	>60	>4,6

Fuente: Adaptado de la DNIT, 2006a, p.28.

Bajo este contexto, la DNIT define y estandariza los procedimientos técnicos y administrativos para recibir las obras de pavimentos nuevos y restaurados. Para ello

indica que las medidas de irregularidad longitudinal serán efectuadas con medidores del tipo respuesta que midan el QI u otro equipamiento que mida el IRI (2013, p.02).

La DNIT (2013, p. 06) por medio de la *Instrução de Serviço/DG N°13, de 04 de novembro de 2013*, define y estandariza los procedimientos técnicos y administrativos para la recepción de obras de pavimentos nuevos y restaurados, esta instrucción de servicio en su anexo A presenta los padrones de desempeño para aceptar una obra de pavimento nuevo o de restauración, siendo un elemento de referencia la pista de rodamiento y uno de los indicadores de este es el QI/IRI, los valores exigidos para aceptación son las siguientes:

Obra de restauración:

- Concreto Asfáltico: $QI \leq 35$ cont./km o $IRI \leq 2,7$ m/km;
- Tratamientos superficiales o mezclas del tipo: CPA, SMA, GAP-GRA - DED: $QI \leq 39$ cont./km o $IRI \leq 3,0$ m/km.

Pavimientos nuevos:

- Concreto Asfáltico: $QI \leq 30$ cont./km o $IRI \leq 2,3$ m/km;
- Tratamientos superficiales o mezclas del tipo: CPA, SMA, GAP-GRA - DED: $QI \leq 33$ cont./km o $IRI \leq 2,5$ m/km.

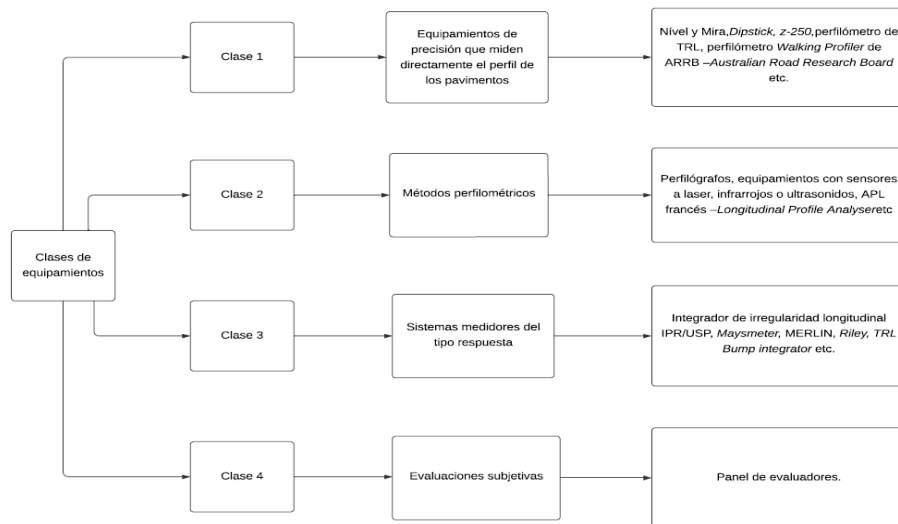
2.4 Tecnologías para medir el IRI

Los diversos planteamientos para medir la regularidad de los pavimentos que son utilizados en todo el mundo se pueden clasificar en cuatro clases genéricas basándose en cuán directamente se consigue medir el IRI, afectando a su vez, los requisitos de precisión y calibración asociada con su utilización (SAYERS; GILLESPIE; PATERSON, 1986, p. 03).

Las clases en el que un equipo puede ser catalogado para medir el IRI se puede observar en la Figura 8, en donde se presentan las 4 clases de equipos y los instrumentos que se tienen en cada clase. Almeida (2018, p. 32-33) comenta que los equipos de Clase 1 son los de mayor precisión, se basan en mediciones de perfiles topográficos de gran precisión, los equipos de Clase 2 realizan la medición del perfil sin entrar en contacto con la superficie del pavimento, teniendo menor precisión que los equipos de Clase 1, ya los equipos de Clase 3 utilizan sistemas medidores del tipo respuesta, en esta clase entran los métodos que recurren al uso de ecuaciones de correlación para la estimación del IRI y los de Clase 4 son evaluaciones subjetivas, en

algunas situaciones, los datos sobre irregularidades no requieren una gran precisión o bien no es posible obtener datos precisos, es en estos casos, que se puede recurrir a una evaluación subjetiva, que se base en la experiencia adquirida por el evaluador y en una inspección visual.

Figura 8. Clases de equipamientos



Fuente: Adaptado según Bisconsini, 2016, p. 34

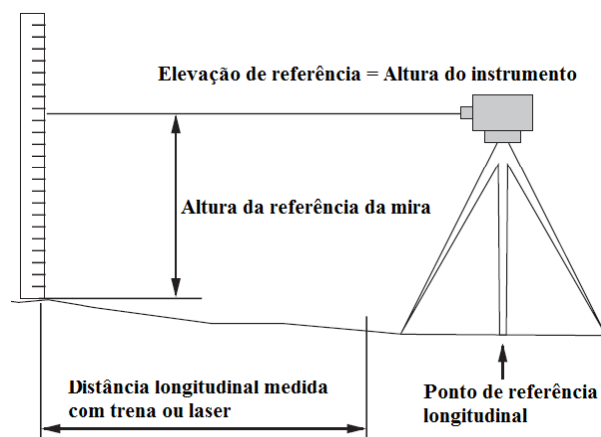
Enseguida en la Tabla 5, se presenta un breve resumen sobre las características, implementación y grado de precisión de los equipamientos utilizados para medir la regularidad superficial de los pavimentos. Exponiendo en la tabla sobre dos equipos de Clase 1 (Nivel y Mira, *Dipstick*), según Almeida (2018, p. 32) los equipos de esta clase otorgan medidas de tan alta calidad que el valor del IRI no puede ser mejorado; en la tabla también se expone un resumen sobre un equipo de Clase 2 (Perfilógrafos), según Hirpahuanca (2016, apud ALMEIDA, 2018, p.32) tanto los equipos de Clase 1 como los de Clase 2 establecen la regularidad en términos de IRI empleando programas informáticos que se basan en algoritmos matemáticos; por último se expone en la tabla sobre un equipo de Clase 3 (RTRRMS), Almeida (2017, p.32) comenta que estos métodos o también llamadas de tipo respuesta, determinan la regularidad mediante la determinación del movimiento relativo a la que es sometido el sistema de suspensión del vehículo al circular por el pavimento.

Tabla 5. Resumen de los equipamientos utilizados para medir la regularidad superficial de los pavimentos

Dispositivo	Características	Implementación	Grado de precisión	Fuente
Nivel y Mira	-Mayor disponibilidad en el mercado; -Método demorado y trabajoso; -Consiste en una mira de precisión y un nivel topográfico, utilizado para obtener el dato de la línea horizontal.	-Generalmente se utiliza para calibrar otros equipamientos, principalmente los de tipo respuesta; -El levantamiento topográfico debe realizarse en las vías de la rueda externa e interna cada 0.5m.	Muy alto	Bisconsini (2016, p.46); Oliveira (2018, p.60); Vargas (2019, p.33).
Dipstick	-Consiste en un inclinómetro que se sostiene entre dos apoyos, los cuáles se encuentran separados por 300mm o por 250mm dependiendo del análisis, estos registran la elevación de un apoyo concerniente a la elevación del otro; -Equipo básico para el desarrollo del índice IRI; -Todos los datos obtenidos con este dispositivo se correlacionan entre sí, teniendo un coeficiente prácticamente igual a la unidad.	-Utilizado para medir el perfil de las carreteras	Muy alto	Ruiz, Arce (2004, p.29); Vargas (2019, p.33).
Perfilógrafos	-Cuentan con una rueda sensible, el cual está montada al centro del marco, esto hace que se mantenga el movimiento vertical libre; -Se establece por el marco del perfilógrafo la desviación de un plano de referencia, registrando el movimiento de la rueda sensible, ya sea en papel y algunos casos automáticamente.	-Control de calidad y recepción de obras.	Medio	Vargas (2019, p.33-35)
RTRMS (equipos tipo respuesta)	-Operan a velocidad padrón de la carretera; -Obtienen los datos de los movimientos verticales del eje trasero de un automóvil, o el eje del remolque con respecto al marco del vehículo, así el equipo mide el rebote (la respuesta) del vehículo a la regularidad que presenta la vía, por tanto, podemos decir que no es realmente una verdadera medida de la lisura de la superficie.	-Control de carreteras a tipo de nivel de red.	Medio	Vargas (2019, p.33-35)

En la Figura 9 se presenta un diseño esquemático del método nivel y mira. Este método consiste en emplear una mira de precisión y un nivel topográfico, utilizado para obtener el dato de la línea horizontal. Bisconsini (2016, p. 46) comenta que este método es el que se encuentra con mayor facilidad de forma internacional, siendo el más conocido, se considera un método largo y laborioso, generalmente utilizado para calibrar otros equipos de mayor productividad, especialmente los medidores del tipo respuesta, que dependen de una escala de referencia de irregularidad, como regula la norma DNER-ES 173/86, en este caso, el estudio longitudinal se realiza en las vías de las ruedas externas e internas, cada 0.5m.

Figura 9. Esquema del método Nivel y Mira



Fuente: Adaptado de Bisconsini, 2016, p. 46

Por otro lado, se presentan en la Figura 10 los modelos de perfilómetros portátiles, los cuáles son equipamientos de precisión que miden directamente el perfil de los pavimentos, del lado izquierdo de la figura se puede observar el equipo *Dipstick* (precursor para el desarrollo de otros dispositivos similares) y del lado derecho de la figura se presenta el equipo *Walking Profiler* (dispositivo familiar al *Dipstick*).

Figura 10. Modelo del dispositivo *Dipstick* (izquierda) y del dispositivo *Walking Profiler* (derecha)



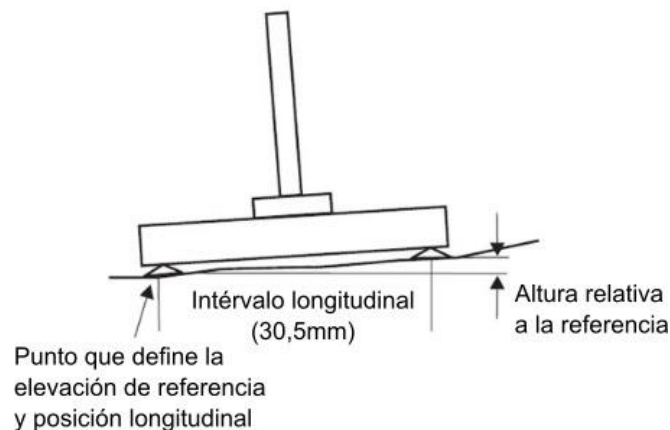
Fuente: Adaptado de Bisconsini, 2016, p. 47.

Vargas (2009, p. 33) expone que el *Dipstick* se compone de un inclinómetro sujetado entre dos soportes separados por 300 mm o 250 mm (según las unidades de análisis, los soportes pueden estar separados por 12 pulgadas), con lo que se registra la elevación de un apoyo en relación con la elevación del otro. Bernucci et al. (2008, p. 411) comenta que un operario recorre el aparato (*Dipstick*) a lo largo de las vías de las ruedas; el aparato gira 180° alrededor del segundo punto de apoyo, de modo que los dos puntos de apoyo se encuentren siempre en una línea imaginaria en paralelo longitudinal al eje. El aparato tiene instalado un inclinómetro que da lecturas del orden de una milésima de pulgada.

El equipo *Walking Profiler* es un dispositivo de accionamiento manual utilizado para medir el perfil longitudinal de una superficie de la carretera con el método perfilométrico hasta 5 km/h. Este dispositivo incluye sensores de alta resolución y sensores de posición (Múčka, 2017, p. 932). Este equipo fue uno de los instrumentos semejantes fabricados a partir del equipo *Dipstick*, el *Walking Profiler* es de una empresa australiana (*ARRB Group Ltd* (2005)) (Bisconsini, 2016, p. 46).

En la Figura 11 se puede apreciar un esquema de funcionamiento del equipo *Dipstick*, observando el lado izquierdo se tiene el punto que define la elevación de referencia y la posición longitudinal en relación con el lado derecho del equipo, también se puede observar el intervalo longitudinal del equipo, en este caso es de 30.5mm, ya el equipo utilizado para este trabajo de final de curso tiene un intervalo longitudinal de 25mm.

Figura 11. Esquema de funcionamiento del equipo *Dipstick*



Fuente: Adaptado de Bernucci et al., 2008, p. 411.

2.5 Aplicativos móviles como alternativa de medición del índice de regularidad internacional

Para la medición del IRI son utilizados equipamientos de alto costo como lo es el rugosímetro (RIII), la viga TRRL y el perfilómetro láser, entre otros equipos. De forma general, las evaluaciones del IRI son realizadas por el gobierno de manera escasa por el alto costo que representa, por ello, se busca una alternativa más accesible y confiable, es aquí donde entran las nuevas tecnologías como lo son los aplicativos para teléfonos móviles, estas modernas tecnologías se van perfeccionando, permitiendo la obtención de datos confiables desde el teléfono móvil.

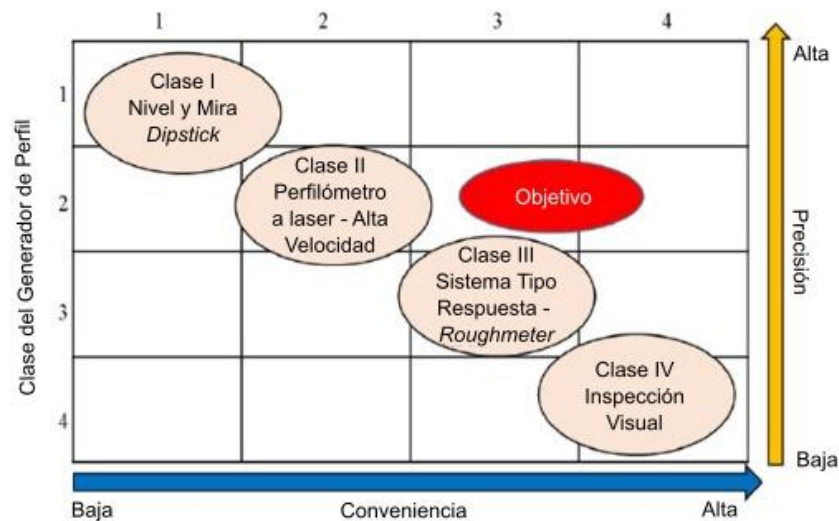
Según Bisconsini (2016, p. 49-50) la evaluación de la regularidad utilizando teléfonos móviles puede ser considerado como un sistema de medición del tipo respuesta (Clase 3). Dicho método se basa en la utilización del sensor de movimiento, también conocido como acelerómetro, y de un GPS, ambos ya presentes en los teléfonos móviles. De esta forma, es posible recoger las señales de aceleración vertical derivadas de las irregularidades del pavimento, junto con los datos recogidos de velocidad y posición, respectivamente. La evaluación de la irregularidad mediante los teléfonos inteligentes puede trabajarse con dos enfoques distintos: 1) uso de los datos brutos (aceleraciones) y 2) transformación en desplazamientos tras el procesamiento de la señal. Este último caso, los desplazamientos se utilizan para calcular el índice de regularidad internacional (IRI).

Almeida (2018, p.39) comenta que el sistema con *smartphones* puede clasificarse como perteneciente a la Clase III, ya que requiere un proceso de

calibración por correlación. Tomiyama et al. (2012, apud ALMEIDA, 2018 p.39) por otro lado, clasifica el uso de este dispositivo según la clase del generador de perfiles y su conveniencia de acuerdo con la Figura 12.

En la Figura 12 se presenta un gráfico en donde se clasifica la utilización del teléfono móvil con relación a los otros equipos de medición del IRI según la clase del generador del perfil, la precisión y la conveniencia. La utilización del teléfono móvil es clasificada como Clase 3 – Sistema Tipo Respuesta. El objetivo de utilizar esta nueva tecnología en la medición del IRI es tener un sistema con una buena relación entre costo y precisión.

Figura 12. Clasificación del teléfono móvil con relación a los otros equipos de medición de regularidad longitudinal



Fuente: Almeida, 2018, p. 39.

Para Oliveira Filho et. al. (2019, p. 2) el uso de *smartphones* es una opción interesante y posible para la medición de la irregularidad superficial y el confort de rodadura, pudiendo realizar levantamientos más rápidas, productivos y con mayor desempeño, facilitando el uso al usuario aparte de tener menores interferencias.

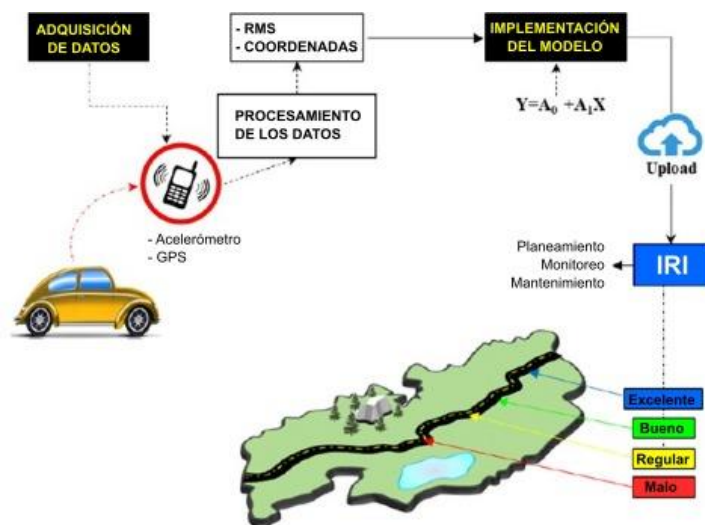
2.5.1 SmartIRI

El desarrollo de la aplicación SmartIRI fue realizado por Almeida (2018), para la obtención del título *Mestre em Engenharia de Transportes*, su trabajo se titula: *Aplicativo Para Smartphone Destinado Á Medição Da Irregularidade Longitudinal Em Rodovias*. Almeida (2018, p.50) expone que la aplicación SmartIRI tiene como idea

central en su desarrollo: que sea de fácil uso, eficiente en término de recursos, y que tenga un buen rendimiento. Sobre la precisión de los resultados, en la evaluación realizada por el autor los datos demostraron ser consistentes con los métodos o clases de equipos en la mayoría de las pruebas realizadas.

En la Figura 13 podemos observar de manera simplificada el proceso metodológico que cumple el SmartIRI. Primeramente se debe fijar el teléfono móvil al parabrisas del vehículo que será utilizado para la medición, a seguir se procede a realizar la recolección de los datos utilizando la aplicación previamente instalada en el teléfono móvil a una velocidad superior a 40 km/h, enseguida SmartIRI procesa los datos por medio de valores RMS y coordenadas del GPS a cada 100 metros recorridos, enseguida la aplicación da como resultado el valor del IRI, este puede ser analizado en el propio teléfono móvil o descargado para un análisis más detallado.

Figura 13. Proceso metodológico del SmartIRI



Fuente: Almeida, 2018, p. 43.

En la Figura 14 se presenta un modelo de la planilla obtenida como resultado durante una evaluación con el SmartIRI. Los datos que presenta la planilla son: la hora de evaluación, condición funcional de acuerdo con la escala adoptada, velocidad media, distancia recorrida, RMS, las coordenadas geográficas, el resultado del valor del IRI.

Figura 14. Ejemplo de la planilla obtenida como resultado durante una evaluación con el SmartIRI

HORA	VEL. MEDIA	CLASSIFICACAO	LAT_INICIO	LNG_INICIO	LAT_FINAL	LNG_FINAL	DISTANCIA	RMS	IRI
8:51:22	54.66	BOM	-3.784120301	-38.5189661	-3.783941584	-38.51991746	107	0.868	3.529
8:51:30	55.05	BOM	-3.78391547	-38.52005433	-3.783760301	-38.52086638	107	0.771	3.177
8:51:37	52.53	BOM	-3.783735194	-38.52099528	-3.783588915	-38.5217687	102	0.703	3.013
8:51:44	53.65	BOM	-3.783564153	-38.52189937	-3.783411209	-38.52269403	104	0.721	3.046
8:51:51	56.55	BOM	-3.783385094	-38.52283191	-3.783219094	-38.5236689	110	0.631	2.649
8:51:58	57.38	BOM	-3.783191182	-38.52381193	-3.783033829	-38.52465547	111	0.722	2.939
8:52:05	57.02	BOM	-3.783009438	-38.52479309	-3.782968223	-38.52564886	110	0.567	2.419
8:52:12	58.59	BOM	-3.78298496	-38.52579458	-3.78323192	-38.52663582	113	0.717	2.887
8:52:19	55.94	BOM	-3.783292751	-38.52676449	-3.783669331	-38.52750534	108	0.805	3.266
8:52:26	55.25	REGULAR	-3.783728719	-38.5276296	-3.783983211	-38.52841731	107	1.028	4.068

Fuente: Almeida, 2018, p.48.

El SmartIRI también otorga como resultado un archivo en formato .kml, en donde se puede visualizar el tramo por medio de mapas, los cuales son segmentados a cada 100m, representados por colores que obedecen a los parámetros que se presentan en la Figura 15, en esta figura se puede observar la clasificación propuesta por la aplicación SmartIRI, esta aplicación tiene como referencia intervalos de IRI de $0 < \text{IRI (m/km)} < 6$ y valores de IRI $\text{IRI (m/km)} \geq 6$, cada clasificación es representado por un color, siendo la clasificación excelente ($0 < \text{IRI (m/km)} < 2$) de color verde oscuro, para el intervalo $2 < \text{IRI (m/km)} < 4$ la clasificación del pavimento es buena y es representada por el color verde claro, la clasificación regular ($4 < \text{IRI (m/km)} < 6$) es representado por el color naranja, los valores de IRI mayores o iguales a 6 (m/km) la clasificación del pavimento es mala y es representado por el color rojo.

Figura 15. Clasificación propuesta por la aplicación SmartIRI

Intervalos de IRI	Classificação	Cores
$0 < \text{IRI (m/km)} < 2$	Excelente	verde escuro
$2 \leq \text{IRI (m/km)} < 4$	Bom	verde claro
$4 \leq \text{IRI (m/km)} < 6$	Regular	laranja
$6 \leq \text{IRI (m/km)}$	Ruim	vermelho

Fuente: Almeida, 2018, p.48.

En la Figura 16 se puede observar el modelo del mapa generado por esta aplicación, donde se observa cada tramo analizado representado por los colores

correspondientes al resultado del IRI obtenido, obedeciendo a los parámetros propuestos por el SmartIRI (Figura 15). Analizando el mapa se concluye que la vía corresponde a un pavimento bueno en gran parte de los tramos, algunos de los tramos con pavimentos regulares y una parte pequeña de la vía se clasifica como mala.

Figura 16. Model del mapa generado por la aplicación SmartIRI



Fuente: Almeida, 2018, p.84.

2.5.2 Roadroid

El desarrollo de la aplicación Roadroid fue realizado por Forslof e Jones (2015). Desde los años noventa el equipo de *Roadroid* ha venido trabajando particularmente en lo que respecta a recopilación de datos móviles, base de datos de carreteras e información meteorológica de las carreteras. Al inicio de la década de los 2000 se ha desarrollado un proyecto canadiense con el objetivo de controlar la velocidad de los camiones de carga de madera (FORSLOF; JONES ,2015, p.486).

En conjunto con el Real Instituto de Tecnología (ITS), entre los años 2002 a 2003, se construyó el primer plan piloto para el desarrollo de la aplicación Roadroid. Para las pruebas se utilizó un acelerómetro de alta resolución ubicado en el eje trasero de un automóvil con tracción delantera, el acelerómetro iba conectado a una *notebook* a través de cable por medio de un acondicionador de señal. Dos estudiantes de maestría fueron los primeros en construir un prototipo, emplearon un sistema de *software* industrial para analizar las señales. Con los resultados iniciales (prometedores), la Administración Nacional de Carreteras de Suecia (SNRA) financió

un proyecto de investigación y desarrollo (I&D) para desarrollar y validar el prototipo, con especial atención a las carreteras de grava (también denominados caminos de tierra). El sistema se ha desarrollado para una *notebook* de coche integrado bajo el ambiente “*Windows*” con capacidades externas de un sistema de posicionamiento global (GPS) y un sistema global de comunicaciones móviles (GSM). Además de una tarjeta especial analógica/digital (A/D) conectada al acelerómetro. También se implementó una herramienta de sistema de información geográfica (GIS) con base en el cliente y en la web para observar la calidad de la carretera en distintos colores (FORSLOF; JONES ,2015, p.487-488).

La aparición de teléfonos inteligentes fue un avance técnico muy importante, todos los periféricos pasaron a estar integrados en un teléfono inteligente y algunas limitaciones se eliminaron gracias a estos avances. (FORSLOF; JONES ,2015, p.488).

Forslof y Jones (2015, p.489) desarrollaron la aplicación para el sistema operativo *Android* y algunos algoritmos de prueba utilizando la señal del acelerómetro incorporado. La elección del sistema operativo *Android* en lugar del sistema operativo del *iPhone* se hizo teniendo en cuenta la arquitectura abierta y la relación precio/rendimiento del *hardware*.

Roadroid en sus referencias de proyectos Roadroid (2014, p.01) comenta que la aplicación Roadroid es un sistema que permite monitorear la condición de las vías a través de un teléfono inteligente. Lo cual se consigue a través de: 1) una aplicación que recoge las vibraciones y la posición utilizando el acelerómetro y el GPS del teléfono móvil respectivamente, 2) servicio de internet para monitorear y transferir los datos del estado de la vía, esto se utiliza para el sistema de gestión de la conservación de las vías.

Sobre la aplicación, esta analiza las vibraciones de la vía 100 veces por segundo, a una velocidad de 90km/h enviando una señal a cada 25cm. Es calculado y almacenado un valor de la condición de la vía sobre los 100 datos con las coordenadas obtenidas del GPS. Los resultados se expresan en el parámetro global IRI. Estos datos son guardados en el teléfono inteligente para luego ser trasladados por 3G o WIFI a un servidor que se encuentra en la nube (ROADROID, 2014, p.01).

Sobre la interfaz de servicio, una vez que los datos obtenidos son transmitidos, pueden ser monitoreados en un mapa para facilitar su interpretación, en donde los tramos analizados son representados con colores dependiendo de la condición en la

que se encuentra la vía, para la condición “bien” es asignado verde, para la condición “satisfactorio” es asignado amarillo, para la condición “insatisfactorio” es asignado rojo y para la condición “malos” es asignado negro (ver Figura 17) (ROADROID, 2014, p.01).

En la Figura 17 se puede observar la representación del mapa que da como resultado la aplicación Roadroid. En ella, se puede apreciar el trayecto en donde se ha realizado la medición de datos y los resultados obtenidos representados en los distintos colores dependiendo de la condición de la carretera.

Figura 17. Ejemplo de mapa obtenido con Roadroid representado los resultados obtenidos



Fuente: Roadroid, 2014,p.01.

Los datos obtenidos pueden ser descargados para los análisis necesarios y gráficos en Excel, estos datos son agregados en secciones de 100m (ROADROID, 2014, p.01).

2.5.3 IRI. Regularidad. Carreteras

La empresa ABAKAL, Ingenieros Consultores S.L. es el encargado del desarrollo de la aplicación “IRI.Regularidad.Carreteras” (IRI-Calc-Free). La aplicación está disponible para su descarga tanto en la página web de la empresa, como en Google Play de forma gratuita.

Este programa calcula el IRI utilizando los sensores de vibración y el GPS de Android. Como resultado otorga gráficas e informes y a su vez permite la calibración de la aplicación. Esto se debe a que el cálculo que realiza es aproximado y al utilizarlo,

el coeficiente de ajuste debe ser adoptado realizando la comparación con ensayos realizados con equipos de mayor precisión (IRI. REGULARIDAD. CARRETERAS, 2019)

Una vez instalada la aplicación en el teléfono móvil, se procede a iniciar las mediciones. Primero se fija el teléfono móvil al vehículo (podemos ubicarlo bien apoyado sobre el salpicadero o colgando por el parabrisas), abrir la aplicación, se otorgan los permisos necesarios y enseguida se realiza el posicionamiento relativo a los datos del GPS. Se inicia el programa informático (aplicación), presionando el botón de conteo el cual, toma los datos de vibración y muestra en la gráfica logarítmica en la parte inferior del programa en ensayo específico.

Una vez finalizado el ensayo se presiona el comando “parar” y luego al comando detener. En la aplicación existen otros 3 comandos, en uno de ellos podemos variar el coeficiente de ajuste (este coeficiente depende del teléfono móvil que utilicemos y donde lo ubicamos y del amortiguador del vehículo), presionando sobre el botón “guardar”, los datos serán guardados en el celular en el directorio: /storage/emulated/0/Abakal/IRI/.

Los resultados se presentan en formato denominados como .csv, .kml y .csv. El archivo .kml se puede observar en la aplicación *Google Earth*. (IRI.REGULARIDAD.CARRETERAS,2019).

En la Figura 18 se puede apreciar una captura de pantalla de la interfaz gráfica de la aplicación “IRI.Regularidad.Carreteras”, en donde del lado derecho se tienen los comandos de control (detener, guardar) y configuración (coef. Ajuste y tipo de cálculo), en la parte inferior se crea un gráfico logarítmico y en la parte superior se puede apreciar las vibraciones al realizar el levantamiento de los datos en el vehículo.

Figura 18. Pantalla de la aplicación IRI.Regularidad.Carreteras



Fuente: IRI.REGULARIDAD.CARRETERAS,2019

En la Figura 19 se puede observar la representación del mapa que da como resultado la aplicación IRI.Regularidad.Carreteras, en ella se puede apreciar el trayecto en donde se ha realizado la medición de datos y los resultados obtenidos representados en los distintos colores dependiendo de la condición de la carretera.

Figura 19. Resultados obtenidos con IRI.Regularidad.Carreteras representados en un mapa



Fuente: IRI.REGULARIDAD.CARRETERAS,2019

2.6 Dispositivo móvil y sensores

La regularidad longitudinal de los pavimentos provoca aceleraciones verticales de los vehículos en movimiento. La magnitud de la aceleración depende de la

gravedad, la extensión, la frecuencia de aparición y el tipo de los defectos del pavimento, la existencia de otras irregularidades en la superficie, las características de la suspensión del vehículo y su velocidad. Con un sensor de movimiento preinstalado (acelerómetro), se puede fijar un *smartphone* de alguna manera a la carrocería del vehículo y así medir estas vibraciones (BISCONSINI, 2016, p.56).

En el caso de los acelerómetros incorporados a los teléfonos inteligentes, las aceleraciones se miden mediante un sistema de coordenadas definido en relación con la pantalla del dispositivo. Los ejes no se invierten cuando cambia la orientación de la pantalla del dispositivo. El eje X se encuentra en posición horizontal y apunta a la derecha, el eje Y se encuentra en posición vertical y apunta hacia arriba y el eje Z se dirige hacia afuera de la cara frontal de la pantalla. Dentro de este sistema, las coordenadas detrás de la pantalla tendrán valores negativos en el eje Z, como se presenta en la Figura 20 (BISCONSINI, 2016, p.57-58).

Figura 20. Sistema de coordenadas de un teléfono móvil inteligente



Fuente: Bisconsini, 2016, p.58.

El acelerómetro puede controlar la variación de la aceleración de un dispositivo a lo largo de tres ejes. Este sensor puede utilizarse como medida inercial de velocidad y posición, inclinación u orientación teniendo como referencia la aceleración de la gravedad y la vibración (ALMEIDA; 2018, p.38).

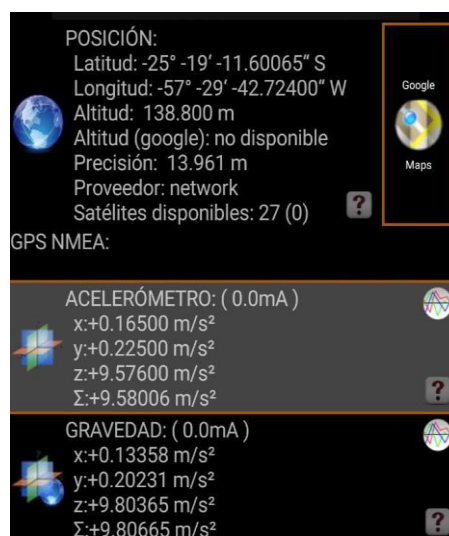
Ramos (2017, apud ALMEIDA, 2018 p.38) menciona que la obtención de datos de aceleración de la gravedad es vulnerable al posicionamiento del sensor al realizar las mediciones. La unidad de medida se proporciona habitualmente en m/s^2 . El

receptor GPS facilitará los datos de latitud y longitud ligados a los valores de aceleración vertical.

Existen varias aplicaciones para obtener los datos de los sensores del teléfono móvil en la tienda de aplicaciones del sistema operativo Android como: Accelerometer Meter, Accelerometer, Prueba de sensores, AndroSensor, entre otros. Para este trabajo de final de curso se optó por la aplicación AndroSensor por ser una aplicación muy utilizada (más de un millón de instalaciones), de descarga y utilización gratuita y además, mencionada en las referencias leídas como Bisconsini (2016) y Almeida (2018).

En la Figura 21, se presenta una captura de pantalla de la aplicación AndroSensor, donde se observan los datos que la aplicación obtenidos desde el teléfono móvil como los datos del acelerómetro, gravedad, giroscopio y GPS.

Figura 21. Pantalla de la aplicación AndroSensor



Fuente: Propia.

2.6.1 Calibración de sensores

Según Mohinder y Angus (2008, apud VIANA, 2019, p.24), “la calibración de sensores es el proceso de estimar la relación entre las entradas y las salidas de los sensores. Tiene como propósito convertir las salidas del sensor a entradas equivalentes, de modo que un valor de salida (ya sea analógico o digital) se pueda volver a convertir en unidades de aceleración de entrada (por ejemplo, metros por segundo al cuadrado)”.

Mohinder y Angus (2008, apud VIANA, 2019, p.24) comentan que entre los errores más comunes que necesitan calibración y compensación se encuentran en: sesgo del sensor, lo que equivale a la salida del sensor cuando no se tiene entrada, factor de escala del sensor, que es la relación entre la variación de salida y la variación de entrada y los errores de desalineación del eje de entrada del sensor.

2.6.1.1 Calibración del acelerómetro

Mohinder y Angus (2015, apud VIANA, 2019, p.25) proponen realizar la calibración del acelerómetro con el modelo de compensación resultante, el cual tiene la forma:

$$Z_{output} = M * Z_{input} + b \quad (1)$$

donde

Z_{output} : datos de aceleración extraídos del acelerómetro;

M : es una matriz de 3×3 , que representa el error debido a los factores de escala y desalineamiento de los ejes (matriz escala desalineamiento);

Z_{input} : valor real de la aceleración;

b : es un vector columna de dimensión 3×1 , que representa el sesgo del sensor.

Los valores correspondientes a M y b pueden ser determinados por un ajuste de mínimos cuadrados o filtro de Kalman de los pares de entrada-salida, sometiendo al acelerómetro a valores conocidos de aceleración para cada eje (aprovechando la estabilidad del valor de la gravedad)

2.7 LabVIEW

2.7.1 Concepto

LabVIEW es un entorno de programación gráfico que se puede emplear en la creación de aplicaciones rápida y eficientemente utilizando interfaces de usuario profesionales. Millones de científicos e ingenieros utilizan LabVIEW para desarrollar complejas aplicaciones de control y pruebas utilizando iconos y cables intuitivos. De la misma forma, la plataforma LabVIEW es escalable a través de distintos objetivos y OSs (*Operating Systems*). Este programa entrega integración con miles de

dispositivos y también facilita cientos de librerías integradas para realizar análisis avanzados, así como la visualización de datos en aras de crear instrumentos virtuales que se puedan personalizar de acuerdo con las necesidades (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012, p.02).

Como LabView imita la operación de instrumentos físicos y la apariencia, como osciloscopios y multímetros, los programas en LabView son llamados instrumentos virtuales o VIs. Cada instrumento virtual consta de panel frontal y diagrama de bloques. El panel frontal es la interfaz de usuario y el diagrama de bloques es el programa detrás de la interfaz de usuario. El código de LabVIEW en el diagrama de bloques es un código gráfico, más conocido como código G o también como código de diagrama de bloques (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012, p.02).

Otros lenguajes de programación utilizan líneas de texto LabVIEW utiliza iconos para crear las aplicaciones. LabVIEW utiliza flujo de datos gráfico, mediante esto los datos fluyen mediante nodos en el diagrama de bloques y esto determina el orden de ejecución. De propósito general la programación gráfica y la ejecución mediante flujo de datos son las principales formas en el que el entorno de programación de LabVIEW es distinto a otros lenguajes de programación (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012, p.02).

National Instruments (2012, p.02) comenta sobre algunas características que los programas de LabVIEW poseen: “naturaleza gráfica y compilada, flujo de datos y/o programación basada en eventos, capacidades multiobjetivo y plataforma, flexibilidad orientada a objetos y posibilidades de *multithreading*”.

Por todo lo expuesto anteriormente se ha optado por utilizar este entorno de programación para el desarrollo de la herramienta informática de este trabajo de final de curso.

2.8 ProVAL

ProVAL es un *software* del área de ingeniería el cual permite analizar y visualizar perfiles de pavimentos de distintas maneras. Es fácil su empleo y a la vez muy potente para analizar múltiples perfiles. Con esta herramienta se optimizan sus operaciones de fresado (*diamond grinding*) para cumplir el IRI especificado. ProVAL es un programa patrocinado por el Departamento de Transporte de los Estados

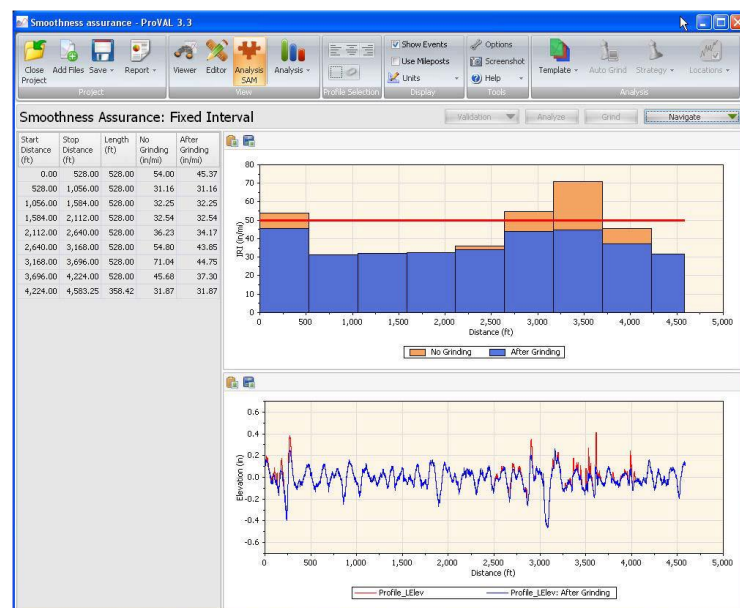
Unidos, el programa de desempeño de pavimentos a largo plazo (LTPP) y la Administración Federal de Carreteras (FHWA) (PROVAL, 2016?, p.01).

La guía del usuario ProVAL3 (2022?, p. 06) expone que la aplicación permite importar perfiles desde diferentes formatos permitiendo su observación en la ventana de visualización (*Viewer Window*), la información de los perfiles puede ser editado utilizando el editor de perfiles (*Profile Editor*).

Esta aplicación utiliza el formato PPF (*Pavement Profile Standard File*) el cual emplea un formato binario creado por la propia empresa ProVAL (PROVAL, 2016?, p.01).

En la Figura 22 se presenta la interfaz gráfica de ProVAL, se pueda observar la barra de comandos que está compuesta por: *Project, View, Profile Selection, Display, Tods, Analysis*.

Figura 22. Interfaz gráfica de ProVAL



Fuente: ProVAL, 2016?, p.02.

3 CAPÍTULO: METODOLOGÍA

En el capítulo 2 se ha revisado la síntesis de la bibliografía fundamental utilizada para el desarrollo de este trabajo de final de curso. Si bien, se han definido las bibliografías fundamentales para el desarrollo del estudio, es necesario construir una descripción detallada de la metodología que permite crear las directrices principales de este trabajo.

Con ello, en esta sección se han descrito la metodología aplicada orientada a cumplir el objetivo principal del estudio. De esta forma, se han representado las distintas etapas tanto para la construcción del algoritmo informático, como para el levantamiento de la información y el procesamiento de los datos.

3.1 Caracterización de la metodología

Se ha desarrollado una herramienta informática para el cálculo del IRI a partir del uso de acelerómetro integrado en el teléfono móvil, se ha utilizado el equipo de clase 1 Dipstick y la herramienta informática ProVAL para la obtención del valor del IRI.

Fueron seleccionados para el análisis de este estudio tramos de vías con 250 metros de largo, que no presentan curvas ni lomadas, con el fin de reducir la influencia de esas variables en los resultados finales de la investigación. Fue seleccionado la extensión de 250 metros para permitir la adquisición de un número considerable de datos. Se optó por seleccionar cuatro avenidas que presentasen los requisitos mencionados en la ciudad de Hernandarias del departamento de Alto Paraná, Paraguay.

El primer tramo seleccionado fue la Av. Las Acacias ($25^{\circ}23'10.70''S$, $54^{\circ}38'37.33''O$). En la Figura 23 se presenta la vista aérea de este tramo, en la misma se puede observar que se ha resaltado con una línea roja la vía recorrida. En la Figura 24 se muestra la zona de estudio correspondiente a este tramo, se puede observar que el pavimento se encuentra sin muchas irregularidades superficiales.

Figura 23. Vista aérea de la Av. Las Acacias



Fuente: Google Earth Pro (2022).

Figura 24. Zona de estudio: Av. Las Acacias



Fuente: Propia.

El segundo tramo seleccionado es la Av. Juan B. Flores ($25^{\circ}24'19.87''S$, $54^{\circ}38'27.92''O$). En la Figura 25 se presenta la vista aérea de este tramo, en la misma se puede observar que se ha resaltado con una línea lila la vía recorrida. En la Figura

26 se muestra la zona de estudio correspondiente a este tramo, se puede observar que el pavimento se encuentra sin muchas irregularidades superficiales.

Figura 25. Vista aérea de la Av. Juan B. Flores



Fuente: Google Earth Pro (2022).

Figura 26. Zona de estudio: Av. Juan B. Flores



Fuente: Propia.

El tercer tramo seleccionado es la Av. Acosta Ñu ($25^{\circ}23'59.17''S$, $54^{\circ}38'30.45''O$). En la Figura 27 se presenta la vista aérea de este tramo, en la misma se puede observar que se ha resaltado con una línea amarilla la vía recorrida. En la Figura 28 se muestra la zona de estudio correspondiente a este tramo, se puede observar que el pavimento se encuentra sin muchas irregularidades superficiales.

Figura 27. Vista aérea de la Av. Acosta Ñu



Fuente: Google Earth Pro (2022).

Figura 28. Zona de estudio: Av. Acosta Ñu



Fuente: Propia.

El cuarto tramo seleccionado es la Av. Bahamas ($25^{\circ}24'35.71''S$, $54^{\circ}37'22.80''O$). En la Figura 29 se presenta la vista aérea de este tramo, en la misma se puede observar que se ha resaltado con una línea naranja la vía recorrida. En la

Figura 30 se muestra la zona de estudio correspondiente a este tramo, se puede observar que el pavimento se encuentra con algunas irregularidades superficiales.

Figura 29. Vista aérea de la Av. Bahamas



Fuente: Google Earth Pro (2022).

Figura 30. Zona de estudio: Av. Bahamas



Fuente: Propia.

Se realizó la recolección de los datos de aceleración con la aplicación *AndroSensor* en los cuatro tramos presentados arriba, estos datos fueron utilizados para la obtención del valor del IRI a través de la herramienta informática desarrollada y la aplicación ProVAL, sin embargo la recolección de datos con el equipo *Dipstick* solo fue posible realizarlo en el primer tramo (Av. Las Acacias).

3.2 Metodología de adquisición de datos en campo.

En esta sección se presenta la metodología para la determinación del IRI utilizando el equipo de clase 1 *Dipstick*, y la adquisición de los datos de aceleración utilizando la aplicación *AndroSensor*.

Primeramente se describe los pasos iniciales para el levantamiento y las configuraciones realizadas al equipo *Dipstick* para posteriormente iniciar la adquisición de los datos, una vez terminado el levantamiento el equipo presenta en su pantalla el valor del IRI obtenido, el resultado es utilizado para verificar la fiabilidad de la herramienta informática desarrollada para este trabajo de final de curso.

Luego, se describe los pasos realizados para la obtención de los datos de aceleración utilizando la aplicación *AndroSensor*, estos datos serán utilizados para la obtención del IRI con la herramienta informática desarrollada para este trabajo de final de curso.

3.2.1 Determinación del IRI utilizando el equipo *Dipstick*

Para iniciar los levantamientos de datos utilizando el equipo *Dipstick* se trazó una línea recta (en nuestro caso de 250m) utilizando un hilo y cinta de papel para fijarlo por el pavimento del primer tramo Av. Las Acacias. Esta línea fue fijada a 0,90 metros desde el borde de la vía, puesto que el ancho del carril de circulación es de 3,50m. Los pasos indicados previamente se siguieron según lo indicado en el manual del *Departamento Nacional de Estradas de Rodagem* DNER-ES 178/86.

En la Figura 31 se muestra el equipo *Dipstick*, este está compuesto por un teléfono móvil, una barra y el equipo. El teléfono contiene el *software* Ciber PP, el cual se encarga de realizar el cálculo con los datos adquiridos por equipo.

Figura 31. Equipo Dipstick



Fuente: Propia.

Se presenta en la Figura 32 la línea recta que fue fijada sobre el pavimento, el cuál sirvió de guía para el operador del dispositivo *Dipstick*, esta línea sirve para que los dos puntos de apoyo del equipo se encuentren siempre sobre una misma línea recta.

Figura 32. Línea guía para medición con el dispositivo Dipstick



Fuente: Propia.

Una vez fijada la línea se procedió a montar el equipo de acuerdo con lo indicado en su manual de operación, seguidamente se enciende el equipo y se espera dos minutos para que esté listo para su uso, a continuación se procede a nivelar y

calibrar el equipo como se indica en su manual de operación, una vez realizado todos estos pasos el equipo se encuentra listo para su uso, finalmente se procede a realizar el levantamiento de los datos, una vez finalizada la toma de datos el dispositivo mostrara el valor del IRI; este dato puede ser anotado o posteriormente se descarga el archivo generado en .xls.

Considerando que el manual de operación del equipo solicita que la nivelación y la verificación de calibración sea realizada sobre una superficie homogénea, lisa y plana, este procedimiento fue realizado sobre la parte plana del maletín de transporte del equipo (el manual de operación sugiere la utilización del maletín). En la Figura 33 se puede apreciar el equipamiento *Dipstick* posicionado sobre el maletín, en donde el maletín fue posicionado y con un nivel se atendió que no estuviera inclinada en exceso para ningún lado.

Figura 33. Nivelamiento del equipo Dipstick



Fuente: Propia.

Cabe mencionar que el equipo *Dipstick* pertenece al laboratorio de pavimentos de la UNILA, y fue cedido al autor para su uso en este trabajo de final de curso.

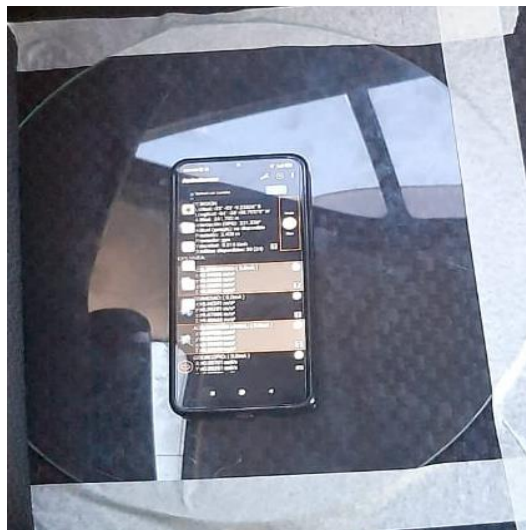
3.2.2 Adquisición de los datos de aceleración

Para la adquisición de los datos, fue utilizado un teléfono móvil Xiaomi Redmi Note 11 Pro. El teléfono móvil posee un acelerómetro de tres ejes (x, y, z), el cuál es el responsable por la medición de los datos de aceleración.

La adquisición de los datos de las aceleraciones fue realizada utilizando la aplicación *AndroSensor*, a una frecuencia de adquisición de 10Hz (cada 0.1segundos), el teléfono móvil fue fijado en el asiento trasero, sobre una placa de vidrio lisa e homogénea (Figura 34).

La adquisición de los datos se realizó con el vehículo en movimiento a una velocidad constante de 60km/h, esta velocidad también es adoptada en estudios analizados como Bisconsini (2016) y Almeida (2018). Un punto para destacar es que se partió de un punto conocido antes del inicio del tramo de estudio, para que así sea alcanzada la velocidad de 60km/h. La adquisición de los datos se realizó en más de un recorrido (5 viajes), contribuyendo de esta manera en la eliminación de los errores generados en la maniobra del conductor, variaciones de la respuesta del vehículo y otros factores que se genera en los medidores del tipo respuesta.

Figura 34. Fijación del telefono movil al asiento trasero del vehiculo



Fuente: Propia.

El vehículo utilizado para la recolección de los datos fue un SANGYONG, modelo REXTON, año 2003 (Figura 35). Las ruedas fueron calibradas en 32psi. En lo que respecta al volumen del depósito de combustible, no fue posible sostener una

tasa de capacidad volumétrica constante. No fue analizada la influencia de contar con dos o tres pasajeros en el auto en los resultados obtenidos.

Figura 35. Vehículo utilizado en la toma de datos



Fuente: Propia.

Se estableció una metodología de adquisición de datos de acuerdo con las necesidades que presentaba el algoritmo de la herramienta desarrollada, esta se presenta a seguir:

1. Colocación del teléfono móvil sobre una mesa lisa y homogénea, eje x en vertical, midiendo el valor de la gravedad positiva, toma de datos por un minuto;
2. Colocación del teléfono móvil sobre una mesa lisa y homogénea, eje y en vertical, midiendo el valor de la gravedad positiva, toma de datos por un minuto;
3. Colocación del teléfono móvil sobre una mesa lisa y homogénea, eje z en vertical, midiendo el valor de la gravedad positiva, toma de datos por un minuto;
4. Teléfono móvil fijado en placa de vidrio colocado sobre el pavimento bajo el vehículo utilizado para el levantamiento de los datos, toma de datos por un minuto;
5. Teléfono móvil fijado en placa de vidrio, placa de vidrio fijada en asiento trasero (atrás del asiento del conductor), motor del vehículo apagado, toma de datos por un minuto;

6. Teléfono móvil fijado en placa de vidrio, placa de vidrio fijada en asiento trasero (atrás del asiento del conductor), motor del vehículo en punto muerto, toma de datos por un minuto;
7. Teléfono móvil fijado en placa de vidrio, placa de vidrio fijada en asiento trasero (atrás del asiento del conductor), motor del vehículo en marcha, pero vehículo sin movimiento, toma de datos por un minuto;
8. Teléfono móvil fijado en placa de vidrio, placa de vidrio fijada en asiento trasero (atrás del asiento del conductor), vehículo en movimiento a una velocidad constante de 60km/h, toma de datos por una distancia aproximada de 250 metros, este último paso se repite cuatro veces para atenuar errores humanos en la adquisición de datos y además se repite en todos los tramos en estudio.

Una vez adquirido todos los datos, estos fueron descargados en la *notebook* para su posterior análisis en la herramienta desarrollada para este trabajo de final de curso.

3.3 Metodología de tratamiento de los datos

Una vez adquirido todos los datos a través de la metodología presentada en la sección anterior, se procede al tratamiento de los datos, para ello se sigue los pasos de la siguiente subsección.

3.3.1 Tratamiento de los datos de aceleración

Una vez realizado todo el levantamiento se procede al procesamiento de los datos. Para ello se descarga del teléfono móvil a la *notebook* la planilla en formato .csv generada por la aplicación. Esta planilla se guarda en formato .xlsx para poder organizar los datos que se encuentran guardados en una sola fila y columna separados por coma, una vez guardado el archivo en formato .xlsx se procede a ordenar los datos separando cada dato en filas y columnas respectivamente con el asistente para convertir texto en columnas de *Excel*. Enseguida, se guardan los valores de las aceleraciones (a_x , a_y , a_z) por separado en el formato .txt, una vez organizado los datos se procede a utilizarlos en la herramienta desarrollada para este trabajo de final de curso. En el capítulo 0 se explica paso a paso en que parte de la

herramienta informática desarrollada se utilizan los datos obtenidos con la aplicación *AndroSensor*.

Los datos que fueron adquiridos con la aplicación *AndroSensor* se procesan de la siguiente manera:

1. Los datos de la aceleración obtenidos cuándo el eje z está en vertical, son guardados en el formato .txt (ax.txt, ay.txt) en archivos separados, estos datos serán utilizados para el cálculo de la matriz b;
2. Los datos de la aceleración obtenidos cuándo el eje x está en vertical, son guardados en el formato .txt (az.txt) , estos datos serán utilizados para el cálculo de la matriz b;
3. Los datos de la aceleración obtenidos cuándo el eje x está en vertical, son guardados en el formato .txt (ax.txt, ay.txt, az.txt) en archivos separados, estos datos serán utilizados para el cálculo de la primera columna de la matriz M;
4. Los datos de la aceleración obtenidos cuándo el eje y está en vertical, son guardados en el formato .txt (ax.txt, ay.txt, az.txt) en archivos separados, estos datos serán utilizados para el cálculo de la segunda columna de la matriz M;
5. Los datos de la aceleración obtenidos cuándo el eje z está en vertical, son guardados en el formato .txt (ax.txt, ay.txt, az.txt) en archivos separados, estos datos serán utilizados para el cálculo de la tercera columna de la matriz M;
6. Los datos de la aceleración obtenidos cuando el teléfono móvil está sobre el pavimento y sobre el asiento del vehículo con el motor apagado, son guardados en el formato .txt (ax.txt, ay.txt, az.txt) en archivos separados respectivamente, estos datos serán utilizados para el cálculo del ángulo de inclinación del asiento con respecto al pavimento;
7. Los datos de la aceleración obtenidos cuando el teléfono móvil está sobre el asiento con el motor en punto muerto y en marcha sin moverse, son guardados en el formato .txt (ax.txt, ay.txt, az.txt) en archivos separados respectivamente, estos datos serán utilizados para el cálculo del ruido del motor en ambas condiciones;

8. Los datos de aceleración obtenidos cuando el teléfono móvil está fijado a la placa de vidrio y esta placa están fijados en el asiento trasero del vehículo en movimiento, son guardados en el formato .txt (ax.txt, ay.txt, az.txt) en archivos separados, estos datos serán utilizados para calcular el desplazamiento y posterior cálculo del índice IRI con la herramienta informática desarrollada para este trabajo de final de curso, este proceso se repite para todos los datos obtenidos.

3.4 Metodología para el desarrollo de la aplicación informática.

Para el desarrollo de la herramienta informática se ha realizado un estudio bibliográfico acerca del procedimiento de procesamiento de señales en un acelerómetro, se ha estudiado las fuentes de errores y de cómo eliminar estas para reducir la influencia de los errores sobre el resultado. Se han utilizado como fuentes: libros, trabajos de fin de grado, tesis de maestría, páginas web, manuales y revistas científicas.

Una vez identificado las fuentes de error se ha estudiado los procesos necesarios para utilizar las aceleraciones en el cálculo del IRI.

Para el desarrollo de la herramienta informática se utilizó el entorno de programación LabView. El algoritmo desarrollado requiere de entrada los datos de aceleración tratados a través de la metodología descrita en la sección 3.3.1. Inicialmente al algoritmo extrae los datos en bruto de los archivos de texto, estos son calibrados mediante ecuaciones de calibración detallados en el capítulo 4, posteriormente el algoritmo realiza un cambio de ejes coordenados para extraer el valor de la gravedad y vuelve a realizar un cambio de ejes para obtener las aceleraciones verticales al pavimento, este dato se integra dos veces para obtener el desplazamiento vertical, seguidamente se realiza la sumatoria de los módulos de los desplazamientos obtenidos en metros y se divide con la distancia en km para finalmente obtener el valor del IRI.

3.5 Resumen de la metodología

A continuación se describen brevemente las etapas realizadas a lo largo de esta investigación:

- a) Revisión bibliográfica de los conceptos de pavimentos, regularidad longitudinal, IRI, distintas tecnologías y aplicativos móviles para la medición del IRI, y las principales características del entorno de programación LabVIEW y la aplicación ProVAL;
- b) Adquisición del valor del IRI utilizando el dispositivo *Dipstick*, para un tramo de 250 metros, siendo el tramo de estudio la Av. Las Acacias, con la finalidad de comparar los valores obtenidos del IRI con la herramienta desarrollada y la aplicación ProVAL;
- c) Adquisición de los datos de aceleración utilizando un teléfono móvil, por la aplicación *AndroSensor*, el cuál es fijado en el vehículo en el asiento trasero, a una velocidad constante de 60km/h, siendo los tramos en evaluación: Av. Las Acacias, Av. Juan B. Flores, Av. Acosta Ñu y Av. Bahamas;
- d) Tratamiento de los datos obtenidos con la aplicación *AndroSensor*, en bloc de notas (.txt), para posterior cálculo del IRI con la herramienta informática desarrollada para este trabajo final de curso;
- e) Desarrollo de una herramienta informática para la evaluación del IRI en ingeniería civil, utilizando el entorno de programación LabView.;
- f) Determinación del valor del IRI con la herramienta informática desarrollada;
- g) Cálculo del IRI utilizando la aplicación ProVAL, a partir de los datos de desplazamiento vertical obtenidos por la herramienta informática desarrollada para este trabajo de final de curso;
- h) Comparación de los resultados obtenidos con el dispositivo *Dipstick*, con la aplicación ProVAL y con la herramienta informática desarrollada exclusivamente para este trabajo de final de curso.

4 CAPÍTULO: DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA INFORMÁTICA

En el capítulo 3 se ha descrito la metodología aplicada en este trabajo de conclusión de curso, los pasos y equipos utilizados para la obtención de los datos. Si bien, se ha descrito la metodología de trabajo, es necesario construir una descripción detallada del desarrollo de la herramienta informática para la evaluación del IRI en ingeniería civil.

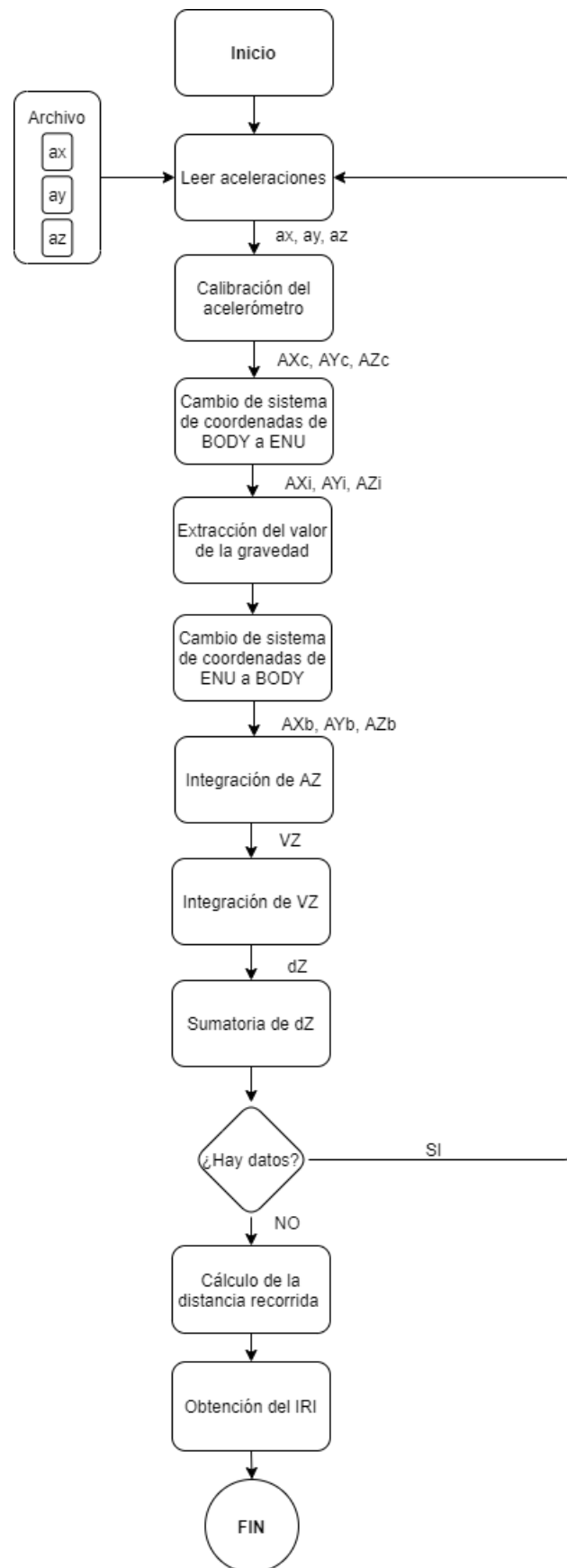
Con ello, en esta sección se describe las características principales de la herramienta informática creada y la construcción de la interfase en el entorno de programación LabVIEW describiendo sus algoritmos y las fases de configuración del producto obtenido para la evaluación del IRI.

4.1 Diagrama de flujo de la herramienta creada

Una vez obtenidos los datos de aceleración del celular a través de la aplicación *AndroSensor*, estos datos son guardados por la aplicación en un archivo .csv, luego se procede a extraer los datos de aceleración de cada eje y son guardados en archivos separados en formato .txt para su posterior procesamiento en la herramienta desarrollada en el entorno de programación LabView en su versión Suite de LabVIEW para estudiantes.

En la Figura 36 se presenta el diagrama de flujo, en esta se puede observar la representación gráfica del algoritmo, que consiste en un bucle que se repite continuamente procesando cada dato del archivo, los bloques del diagrama de flujo se describen en las siguientes subsecciones (4.1.1 al 4.1.5.).

Figura 36. Diagrama de flujo de la herramienta



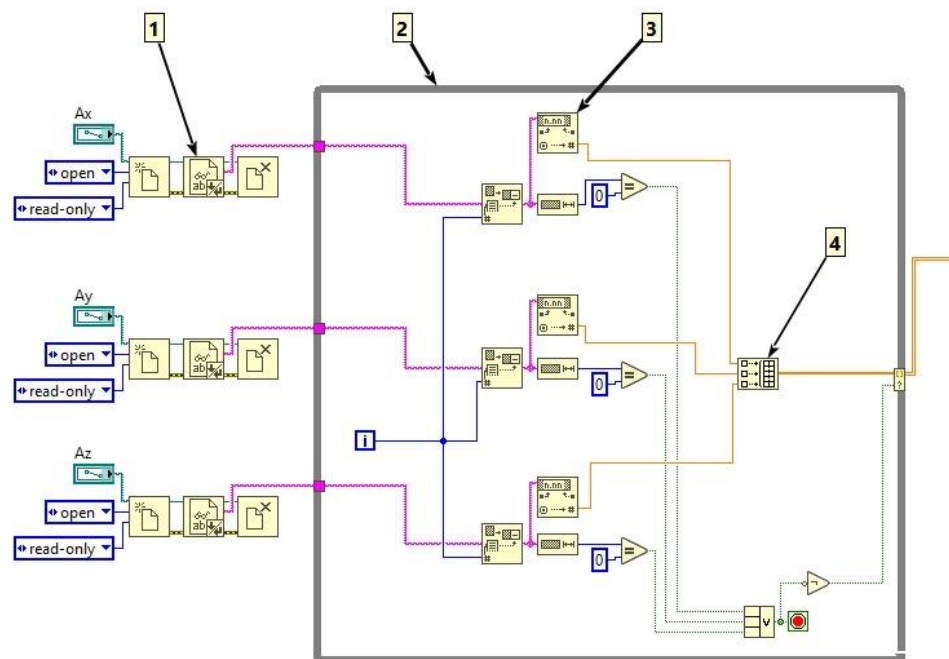
Fuente: Propia.

4.1.1 Leer aceleraciones

La irregularidad de los pavimentos repercute en aceleraciones verticales en los vehículos en movimiento, es por eso la importancia de medir esta variable.

Los datos extraídos del apartado 8 de la sección 3.3.1 del capítulo 3 son insertados y el programa se encarga de la extracción de los datos del archivo de texto y los convierte a formato numérico para su procesamiento. En la Figura 37 se presenta el fragmento del programa principal encargado de este proceso, el algoritmo opera de la siguiente manera: primeramente se lee el archivo en el cual están guardadas las aceleraciones (1), seguidamente se introducen los datos a un bucle (2) que lee cada dato guardado y los convierte a formato numérico (3), finalmente las aceleraciones de cada eje en formato numérico son guardadas en una matriz de 3x1 (4) para su posterior procesamiento en otro bucle.

Figura 37. Fragmento del diagrama de bloques del VI principal encargado de la extracción de datos



Fuente: Propia.

4.1.2 Calibración del acelerómetro

Inicialmente se separan los valores de la aceleración (a_x , a_y , a_z) obtenidos en el levantamiento con la aplicación *AndroSensor* para luego guardarlo en un archivo .txt. Estos datos son calibrados utilizando dos matrices para corregir los errores mencionados en la sección 2.6.1, del capítulo 2. El método propuesto consiste en excitar la entrada del sensor con los datos conocidos (aceleración) para encontrar los parámetros de calibración, para el acelerómetro esto es conveniente por la estabilidad que presenta el valor de la gravedad.

Para efectos prácticos se ha optado por realizar una pequeña modificación algebraica a la ecuación (1), de manera a poder hallar la matriz b y M , las modificaciones realizadas son las siguientes:

$$z_{output} - b = M * z_{input} \quad (2)$$

$$z_{input} = M^{-1} * (z_{output} - b) \quad (3)$$

Esta modificación es conveniente para encontrar la matriz b que representa el sesgo del sensor cuando el acelerómetro no está sometido a ninguna aceleración utilizando el método de mínimos cuadrados, para luego hallar la matriz M , también por el método de mínimos cuadrados. Una vez encontrado los valores de M se debe calcular su inversa, que representa la matriz de corrección de los factores de escala y desalineamiento de los ejes.

4.1.2.1 Cálculo de la matriz b

Con los datos extraídos del apartado 1 y 2 de la sección 3.3.1 del capítulo 3, se calcula la matriz b , por el método de mínimos cuadrados. El entorno de programación LabView brinda un instrumento virtual que facilita el cálculo de los mínimos cuadrados.

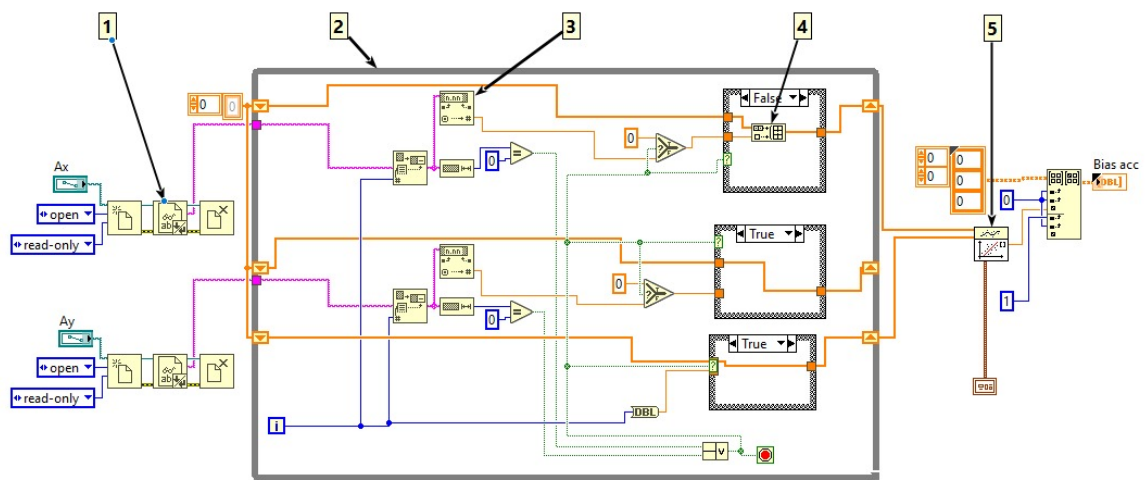
Los resultados obtenidos se guardan en la matriz:

$$b = \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

En la Figura 38 se presenta el diagrama de bloques desarrollado para el cálculo de la matriz b , siendo este el utilizado para encontrar el sesgo de los ejes x e y , el

algoritmo opera de la siguiente manera: primeramente se lee el archivo en el cual están guardadas las aceleraciones (1), seguidamente se introducen los datos a un bucle (2) que lee cada dato guardado y los convierte a formato numérico (3), posteriormente las aceleraciones de cada eje en formato numérico son guardadas en una matriz de 3x1 (4) y finalmente se encuentra la media aritmética (5), obteniendo así el sesgo de cada eje del acelerómetro.

Figura 38. Diagrama de bloques del SubVI para el cálculo del sesgo



Fuente: Propia.

4.1.2.2 Cálculo de la matriz M

Para el cálculo de la matriz M, sometemos a cada eje a un valor conocido de aceleración, en este caso se aprovecha la estabilidad del valor de la gravedad para utilizarla.

De la ecuación (1) y sometiendo al eje x al valor de la gravedad se tiene:

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

Luego desarrollando la multiplicación se tiene:

$$\begin{aligned} a_x &= m_{11} * g + b_x \rightarrow m_{11} = \frac{a_x - b_x}{g} \\ a_y &= m_{21} * g + b_y \rightarrow m_{21} = \frac{a_y - b_y}{g} \\ a_z &= m_{31} * g + b_z \rightarrow m_{31} = \frac{a_z - b_z}{g} \end{aligned} \quad (6)$$

Estas ecuaciones se utilizan para obtener los valores de m_{11} , m_{21} y m_{31} utilizando el método de mínimos cuadrados.

De la ecuación (1) y sometiendo al eje y al valor de la gravedad se tiene:

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ g \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

Luego desarrollando la multiplicación se tiene:

$$\begin{aligned} a_x &= m_{12} * g + b_x \rightarrow m_{12} = \frac{a_x - b_x}{g} \\ a_y &= m_{22} * g + b_y \rightarrow m_{22} = \frac{a_y - b_y}{g} \\ a_z &= m_{32} * g + b_z \rightarrow m_{32} = \frac{a_z - b_z}{g} \end{aligned} \quad (8)$$

Estas ecuaciones se utilizan para obtener los valores de m_{12} , m_{22} y m_{32} utilizando el método de mínimos cuadrados

De la ecuación (1) y sometiendo al eje z al valor de la gravedad se tiene:

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

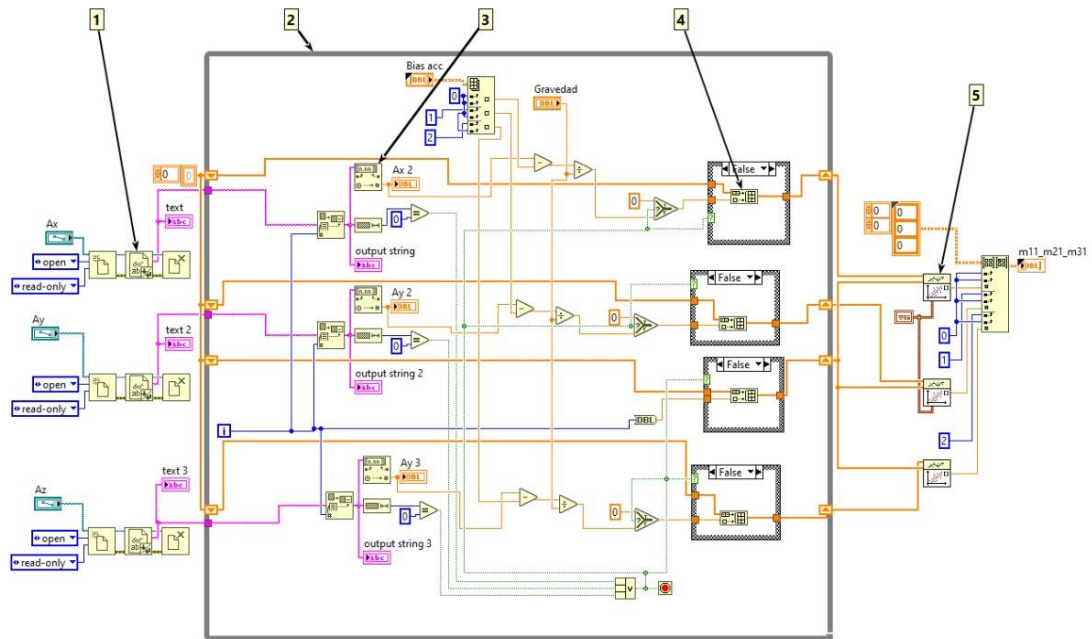
Luego desarrollando la multiplicación se tiene:

$$\begin{aligned} a_x &= m_{13} * g + b_x \rightarrow m_{13} = \frac{a_x - b_x}{g} \\ a_y &= m_{23} * g + b_y \rightarrow m_{23} = \frac{a_y - b_y}{g} \\ a_z &= m_{33} * g + b_z \rightarrow m_{33} = \frac{a_z - b_z}{g} \end{aligned} \quad (10)$$

Estas ecuaciones se utilizan para obtener los valores de m_{13} , m_{23} y m_{33} utilizando el método de mínimos cuadrados.

Se presenta en la Figura 39 el diagrama de bloques utilizado para el cálculo de la primera columna de la matriz M (el diagrama de bloques es similar para el cálculo de las otras dos columnas de la matriz M), el algoritmo opera de la siguiente manera: primeramente se lee el archivo en el cual están guardadas las aceleraciones (1), seguidamente se introducen los datos a un bucle (2) que lee cada dato guardado y los convierte a formato numérico (3), posteriormente las aceleraciones de cada eje en formato numérico son guardadas en una matriz de 3x1 (4) y finalmente se encuentra la media aritmética (5), obteniendo así el valor de la primera columna de la matriz M.

Figura 39. Diagrama de bloques del SubVI para el cálculo de la primera columna de la matriz M



Fuente: Propia.

4.1.3 Cálculo de la matriz de rotación

Para el cálculo de la matriz de rotación se debe calcular los ángulos Pitch (θ) y Roll (φ), utilizando los datos provenientes del acelerómetro. Para el cálculo de θ y φ se utilizan los datos de la lectura del acelerómetro (a_x, a_y, a_z), utilizando las relaciones trigonométricas entre los ejes y el vector gravedad, empleando las siguientes ecuaciones:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{a_y}{a_z}\right) \quad (11)$$

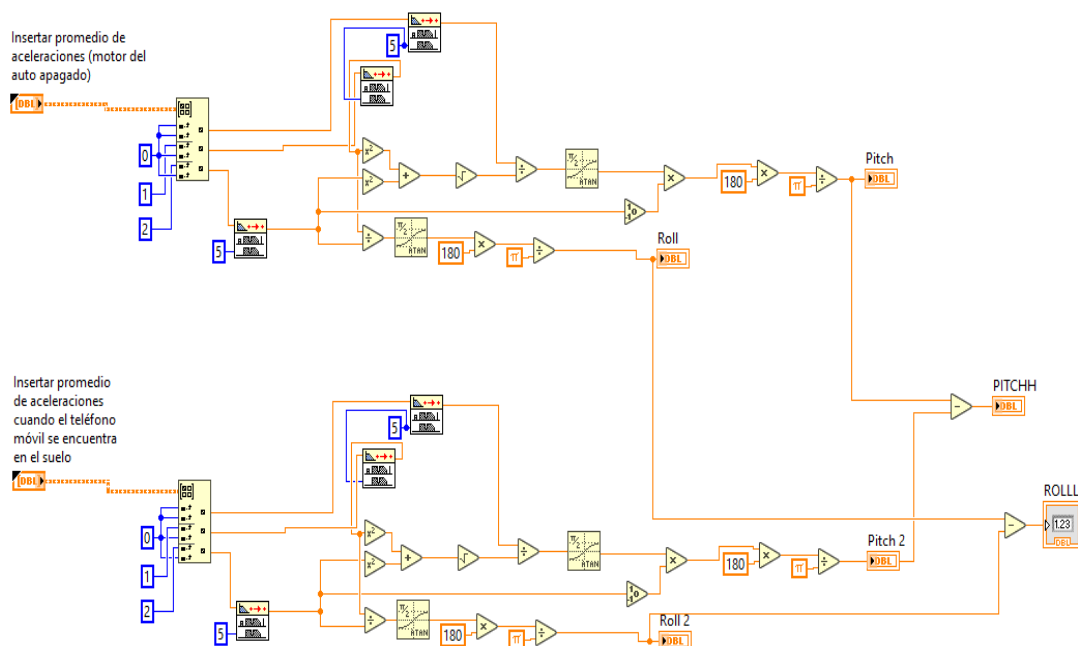
$$\theta = -\arctan\left(\frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}}\right) * \text{sign}(a_z) \quad (12)$$

Las ecuaciones (11) y (12) son válidas cuando el vehículo se encuentra en reposo o a una velocidad constante, si el vehículo sufre aceleraciones, los datos capturados no son válidos, y es por lo que se utiliza un filtro de media móvil para eliminar los ruidos producidos por las vibraciones del vehículo.

Los ángulos calculados anteriormente son utilizados para obtener la matriz de rotación (ver ANEXO A). Primeramente, se transforma de coordenadas BODY (del vehículo) a coordenadas ENU (*easth, north, up*) para posteriormente extraer el valor de la gravedad de las lecturas del acelerómetro. Por último, se calculan los ángulos Pitch (θ) y Roll (φ) con los datos obtenidos del vehículo con el motor apagado y con el teléfono móvil en el pavimento, para utilizar la diferencia de estos en el cálculo de la matriz de rotación de ENU a BODY para utilizar los datos de aceleraciones del eje z que servirán para el cálculo del IRI.

Se presenta en la Figura 40 el diagrama de bloques utilizado para el cálculo de Pitch y Roll, el algoritmo implemente las ecuaciones (11) y (12) utilizando una media móvil de las aceleraciones para descartar las vibraciones producidas por el motor y por el pavimento.

Figura 40. Diagrama de bloques del SubVI para el cálculo de Pitch y Roll

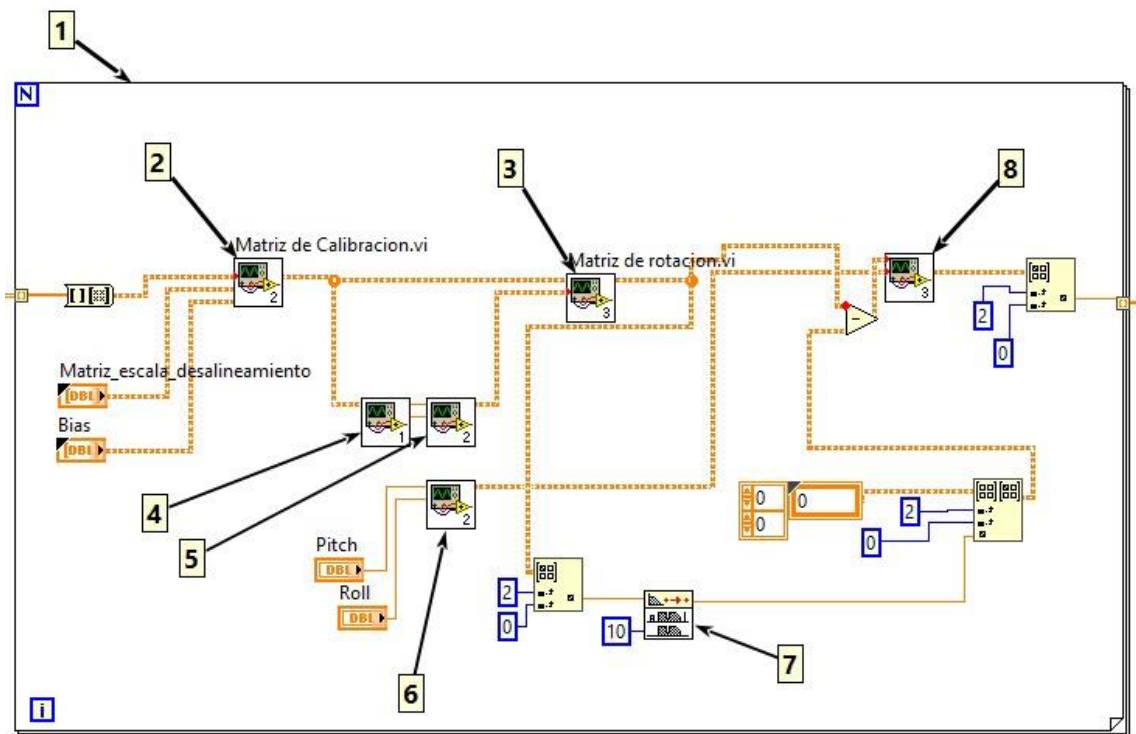


Fuente: Propia.

La implementación de los apartados 4.1.2 al 4.1.3 en el programa principal (main.vi) se puede observar en la Figura 41, este representa un fragmento del programa principal. El algoritmo se desarrolló en un bucle (1), las aceleraciones extraídas en el apartado 4.1.1 son calibradas por un SubVI (2), luego se calculan los

ángulos de inclinación (4) y una vez obtenidos se calcula la matriz de rotación (5), posteriormente las aceleraciones calibradas son multiplicadas por esta matriz (3). Luego de tener las aceleraciones rotadas en un marco de referencia inercial, se realiza el cálculo de la gravedad utilizando una media móvil (7), seguidamente se calcula la inclinación del asiento con respecto al pavimento (6) y se calcula la matriz de rotación de ENU a BODY (8) para obtener las aceleraciones verticales al pavimento, que posteriormente son utilizadas para el cálculo del IRI en bucles posteriores.

Figura 41. Fragmento del diagrama de bloques del VI principal encargado del procesamiento de datos



Fuente: Propia.

4.1.4 Obtención de los valores de desplazamiento

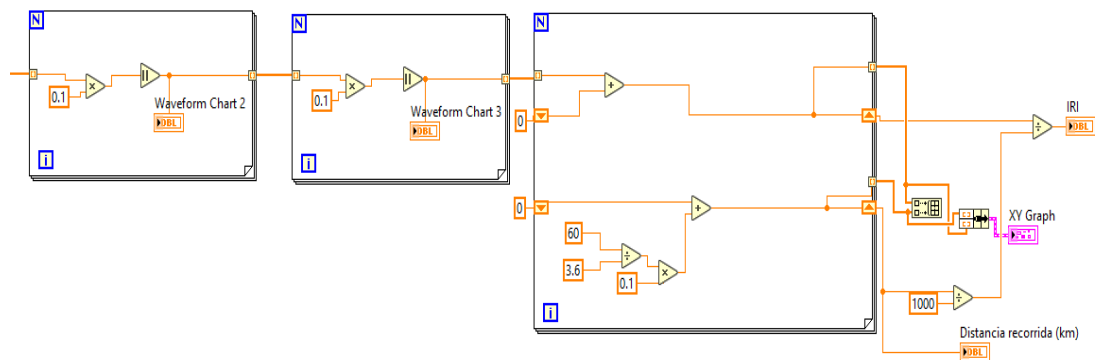
Con los datos de la aceleración del eje z obtenidos del apartado anterior se realiza la integral doble para el cálculo del desplazamiento vertical por cada valor de aceleración obtenida, se toma el módulo de estos desplazamientos y se realiza la sumatoria para obtener el valor acumulado de este desplazamiento.

4.1.5 Obtención del valor del IRI

El valor acumulado de los desplazamientos en metros obtenidos en el apartado anterior se divide con la distancia recorrida medida en kilómetros para obtener el IRI.

En la Figura 42 se presenta un fragmento del programa principal (main.vi), esta parte se encarga del cálculo de la doble integral para obtener el desplazamiento y luego procede al cálculo del índice IRI.

Figura 42. Fragmento del diagrama de bloques del VI principal encargado del cálculo de desplazamiento y del índice IRI

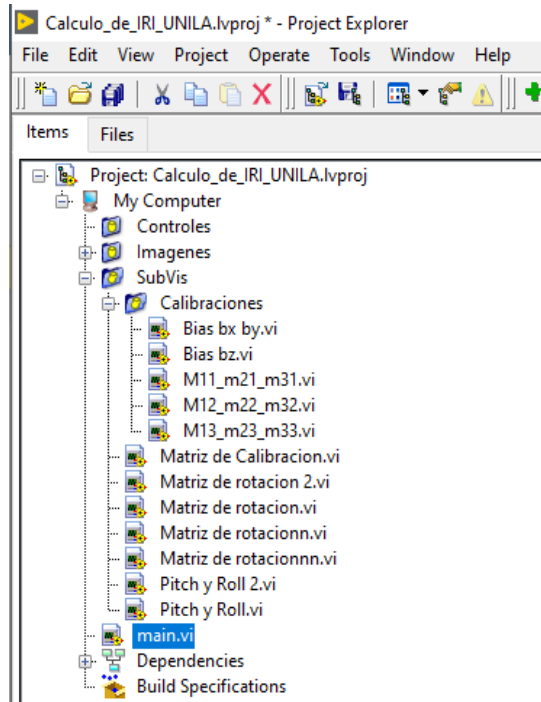


Fuente: Propia.

4.2 Explorador del proyecto

El explorador del proyecto consta del programa principal (main.vi), de los controles, de las imágenes y los SubVis desarrollados para la herramienta informática, en la Figura 43 se presenta el explorador del proyecto, en donde se puede observar todo el contenido de la herramienta informática, .

Figura 43. Explorador del Proyecto



Fuente: Propia.

5 CAPÍTULO: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el capítulo 4 se ha descrito las características principales de la herramienta informática creada y la construcción de la interfase en el entorno de programación LabVIEW describiendo sus algoritmos y las fases de configuración del producto obtenido para la evaluación del IRI.

Con ello en esta sección se presentan los resultados los valores del IRI obtenidos a través del equipo *Dipstick*, la herramienta informática desarrollada y la aplicación ProVAL. Se ha realizado las debidas comparaciones a través de tablas entre las herramientas utilizadas para la obtención del valor del IRI.

5.1 Resultados obtenidos en campo utilizando el equipo *Dipstick*

El tramo analizado fue la Av. las Acacias de la ciudad de Hernandarias del departamento de Alto Paraná, Paraguay, para un trayecto de 250 metros. Analizando visualmente se observó que el pavimento no presenta grandes irregularidades superficiales.

En la Tabla 6 se presenta el resultado obtenido a través del dispositivo *Dipstick*, en donde se puede observar la fecha, hora, latitud, longitud, distancia analizada, el valor del IRI y del QI.

Tabla 6. Resultados obtenidos utilizando el equipo *Dipstick*

Equipamiento	Dipstick
Fecha	03/07/2022
Hora	11:56:16
Latitud	-25,3849464
Longitud	-54,6452226
Distancia (m)	250
IRI	3,5
QI	42,1

Fuente: Propia

El tramo experimental presenta un valor de IRI igual a 3,5 m/km y un QI igual a 42,1 cont./km, a través de la Tabla 4 es posible afirmar que el tramo analizado presenta una condición de superficie regular. Analizando el tipo de pista que presenta

el tramo es posible afirmar por medio de la Figura 7 que la Avenida las Acacias se encuentra en el rango de carreteras antiguas con velocidad de uso normal entorno de los 100km/h.

En la Figura 44 se puede observar el estado del pavimento de la Avenida las Acacias, el mismo no presenta demasiadas irregularidades superficiales, sin embargo, presenta un deterioro de la capa asfáltica.

Figura 44. Pavimento de la Avenida las Acacias



Fuente: Propia.

5.2 Resultados obtenidos con la herramienta informática para la evaluación del IRI en ingeniería civil

Los tramos analizados fueron: Av. Las Acacias, Av. Juan B. Flores, Av. Acosta Ñu y Av. Bahamas de la ciudad de Hernandarias del departamento de Alto Paraná, Paraguay, para un tramo aproximado de 250 metros.

En la Tabla 7 se presentan los resultados del análisis de la Av. Las Acacias, obtenidos a través de la herramienta informática, en la tabla se puede observar la distancia total recorrida (valor calculado por la herramienta informática) y luego se puede observar el resultado del IRI para cada recorrido. Una vez que la herramienta informática otorgaba el dato del IRI y la distancia recorrida, estos datos los llevamos

a la tabla de *Excel*, luego se repite este paso para los otros recorridos, así se obtiene una media de la distancia total recorrida y una media del valor del IRI.

Tabla 7. Resultados del análisis de la Av. Las Acacias

Recorrido	Distancia (km)	IRI (m/km)
1	305,00	3,31
2	301,67	3,52
3	298,33	3,68
4	296,67	3,77
Media	300,42	3,57

Fuente: Propia.

El tramo experimental (Av. Las Acacias) presenta un valor medio de IRI igual a 3,57 m/km, a través de la Tabla 4 es posible afirmar que el tramo analizado presenta una condición de superficie mala. Analizando el tipo de pista que presenta el tramo es posible afirmar por medio de la Figura 7 que la Av. Las Acacias se encuentra en el rango de carreteras antiguas con velocidad de uso normal entorno de los 100km/h.

En la Tabla 8 se presentan los resultados del análisis de la Av. Juan B. Flores, obtenidos a través de la herramienta informática, en la tabla se puede observar la distancia total recorrida (valor calculado por la herramienta informática) y luego se puede observar el resultado del IRI para cada recorrido. Una vez que la herramienta informática otorgaba el dato del IRI y la distancia recorrida, estos datos los llevamos a una tabla de *Excel*, luego se repite este paso para los otros recorridos, así se obtiene una media de la distancia total recorrida y una media del valor del IRI.

Tabla 8. Resultados del análisis de la Av. Juan B. Flores

Recorrido	Distancia (km)	IRI (m/km)
1	247,00	4,83
2	213,33	4,40
3	206,67	4,88
4	203,33	4,52
Media	217,58	4,66

Fuente: Propia.

El tramo experimental (Av. Juan B. Flores) presenta un valor medio de IRI igual a 4,66 m/km, a través de la Tabla 4 es posible afirmar que el tramo analizado presenta

una condición de superficie pésima. Analizando el tipo de pista que presenta el tramo es posible afirmar por medio de la Figura 7 que la Av. Juan B. Flores se encuentra en el rango de carreteras deterioradas con velocidad de uso normal entorno de los 60 a 100km/h.

En la Tabla 9 se presentan los resultados del análisis de la Av. Acosta Ñu, obtenidos a través de la herramienta informática, en la tabla se puede observar la distancia total recorrida (valor calculado por la herramienta informática) y luego se puede observar el resultado del IRI para cada recorrido. Una vez que la herramienta informática otorgaba el dato del IRI y la distancia recorrida, estos datos los llevamos a una tabla de *Excel*, luego se repite este paso para los otros recorridos, así se obtiene una media de la distancia total recorrida y una media del valor del IRI.

Tabla 9. Resultados del análisis de la Av. Acosta Ñu

Recorrido	Distancia (km)	IRI (m/km)
1	275,00	4,88
2	283,33	4,48
3	280,00	4,15
4	291,67	3,97
Media	282,50	4,37

Fuente: Propia.

El tramo experimental (Av. Acosta Ñu) presenta un valor medio de IRI igual a 4,37 m/km, a través de la Tabla 4 es posible afirmar que el tramo analizado presenta una condición de superficie mala. Analizando el tipo de pista que presenta el tramo es posible afirmar por medio de la Figura 7 que la Av. Acosta Ñu se encuentra en el rango de carreteras antiguas con velocidad de uso normal entorno de los 100km/h.

En la Tabla 10 se presentan los resultados del análisis de la Av. Bahamas, obtenidos a través de la herramienta informática, en la tabla se puede observar la distancia total recorrida (valor calculado por la herramienta informática) y luego se puede observar el resultado del IRI para cada recorrido. Una vez que la herramienta informática otorgaba el dato del IRI y la distancia recorrida, estos datos los llevamos a una tabla de *Excel*, luego se repite este paso para los otros recorridos, así se obtiene una media de la distancia total recorrida y una media del valor del IRI.

Tabla 10. Resultados del análisis de la Av. Bahamas

Recorrido	Distancia (km)	IRI (m/km)
1	260,00	5,70
2	311,67	5,85
3	300,00	5,83
4	308,33	5,82
Media	295,00	5,80

Fuente: Propia.

El tramo experimental (Av. Bahamas) presenta un valor medio de IRI igual a 5,80 m/km, a través de la Tabla 4 es posible afirmar que el tramo analizado presenta una condición de superficie pésima. Analizando el tipo de pista que presenta el tramo es posible afirmar por medio de la Figura 7 que la Av. Bahamas se encuentra en el rango de carreteras deterioradas con velocidad de uso normal entorno de los 60 a 100km/h.

5.3 Resultados obtenidos con la aplicación ProVAL

Los tramos analizados fueron: Av. Las Acacias, Av. Juan B. Flores, Av. Acosta Ñu y Av. Bahamas de la ciudad de Hernandarias del departamento de Alto Paraná, Paraguay, para un tramo aproximado de 250 metros.

Los valores de desplazamientos verticales calculados con la herramienta informática desarrollada se utilizaron como entrada para la aplicación ProVAL.

En la Tabla 11 se presentan los resultados del análisis de la Av. Las Acacias, obtenidos a través de la aplicación ProVAL, en la tabla se puede observar la distancia total recorrida (valor calculado por la herramienta informática) y luego se puede observar el resultado del IRI obtenido por la aplicación ProVAL para cada recorrido. Una vez que la aplicación ProVAL otorgaba el dato del IRI, estos datos los llevamos a una tabla de *Excel*, luego se repite este paso para los otros recorridos, así se obtiene una media del valor del IRI.

Tabla 11. Resultados del análisis de la Av. Las Acacias

Recorrido	Distancia (km)	IRI (m/km)
1	305,00	3,28
2	301,67	3,57
3	298,33	3,70
4	296,67	3,53
Media	300,42	3,52

Fuente: Propia.

El tramo experimental (Av. Las Acacias) presenta un valor medio de IRI igual a 3,52 m/km, a través de la Tabla 4 es posible afirmar que el tramo analizado presenta una condición de superficie mala. Analizando el tipo de pista que presenta el tramo es posible afirmar por medio de la Figura 7 que la Av. Las Acacias se encuentra en el rango de carreteras antiguas con velocidad de uso normal entorno de los 100km/h.

En la Tabla 12 se presentan los resultados del análisis de la Av. Juan B. Flores, obtenidos a través de la aplicación ProVAL, en la tabla se puede observar la distancia total recorrida (valor calculado por la herramienta informática) y luego se puede observar el resultado del IRI obtenido por la aplicación ProVAL para cada recorrido. Una vez que la aplicación ProVAL otorgaba el dato del IRI, estos datos los llevamos a una tabla de *Excel*, luego se repite este paso para los otros recorridos, así se obtiene una media del valor del IRI.

Tabla 12. Resultados del análisis de la Av. Juan B. Flores

Recorrido	Distancia (km)	IRI (m/km)
1	247,00	4,50
2	213,33	4,40
3	206,67	4,82
4	203,33	4,48
Media	217,58	4,55

Fuente: Propia.

El tramo experimental (Av. Juan B. Flores) presenta un valor medio de IRI igual a 4,55 m/km, a través de la Tabla 4 es posible afirmar que el tramo analizado presenta una condición de superficie mala. Analizando el tipo de pista que presenta el tramo es posible afirmar por medio de la Figura 7 que la Av. Juan B. Flores se encuentra en el rango de carreteras antiguas con velocidad de uso normal entorno de los 100km/h.

En la Tabla 13 se presentan los resultados del análisis de la Av. Acosta Ñu, obtenidos a través de la aplicación ProVAL, en la tabla se puede observar la distancia total recorrida (valor calculado por la herramienta informática) y luego se puede observar el resultado del IRI obtenido por la aplicación ProVAL para cada recorrido. Una vez que la aplicación ProVAL otorgaba el dato del IRI, estos datos los llevamos a una tabla de *Excel*, luego se repite este paso para los otros recorridos, así se obtiene una media del valor del IRI.

Tabla 13. Resultados del análisis de la Av. Acosta Ñu

Recorrido	Distancia (km)	IRI (m/km)
1	275,00	4,66
2	283,33	4,36
3	280,00	3,92
4	291,67	3,90
Media	282,50	4,21

Fuente: Propia.

El tramo experimental (Av. Acosta Ñu) presenta un valor medio de IRI igual a 4,21 m/km, a través de la Tabla 4 es posible afirmar que el tramo analizado presenta una condición de superficie mala. Analizando el tipo de pista que presenta el tramo es posible afirmar por medio de la Figura 7 que la Av. Acosta Ñu se encuentra en el rango de carreteras antiguas con velocidad de uso normal entorno de los 100km/h.

En la Tabla 14 se presentan los resultados del análisis de la Av. Bahamas, obtenidos a través de la aplicación ProVAL, en la tabla se puede observar la distancia total recorrida (valor calculado por la herramienta informática) y luego se puede observar el resultado del IRI obtenido por la aplicación ProVAL para cada recorrido. Una vez que la aplicación ProVAL otorgaba el dato del IRI, estos datos los llevamos a una tabla de *Excel*, luego se repite este paso para los otros recorridos, así se obtiene una media del valor del IRI.

Tabla 14. Resultados del análisis de la Av. Bahamas

Recorrido	Distancia (km)	IRI (m/km)
1	260,00	5,21
2	311,67	5,29
3	300,00	5,69
4	308,33	5,17
Media	295,00	5,34

Fuente: Propia.

El tramo experimental (Av. Bahamas) presenta un valor medio de IRI igual a 5,34 m/km, a través de la Tabla 4 es posible afirmar que el tramo analizado presenta una condición de superficie pésima. Analizando el tipo de pista que presenta el tramo es posible afirmar por medio de la Figura 7 que la Av. Bahamas se encuentra en el rango de carreteras deterioradas con velocidad de uso normal entorno de los 60 a 100km/h.

5.4 Comparación de los datos determinados por el *Dipstick* y la herramienta informática desarrollada

A partir de los valores del índice IRI obtenidos a través del *Dipstick* y de la herramienta informática desarrollada calculados por los datos de aceleración obtenidos por la aplicación *AndroSensor*, se elaboraron tablas para comparar los resultados, para ello se calcula el error verdadero y el error relativo.

En la Tabla 15 se presentan los resultados del análisis de la Av. Las Acacias, en la tabla se muestran los valores del error relativo entre el IRI del *Dipstick* y el de la herramienta informática desarrollada.

Tabla 15. Comparación entre valores del IRI obtenidos por el *Dipstick* y la herramienta informática

Recorrido	IRI - Herramienta (m/km)	IRI - Dipstick (m/km)	Error verdadero (m/km)	Error relativo (%)
1	3,31	3,51	0,20	5,66
2	3,52	3,51	-0,01	0,24
3	3,68	3,51	-0,17	4,85
4	3,77	3,51	-0,26	7,47

Fuente: Propia.

Se toma el promedio del índice IRI obtenido por la herramienta informática desarrollada y se compara con el obtenido por el *Dipstick*, siendo así un valor medio de 3,57 m/km el valor obtenido por la herramienta informática y 3,51 m/km el valor obtenido por el equipo *Dipstick*, teniendo así un error relativo de 1,72%, esto se puede observar en la Tabla 16.

Tabla 16. Comparación entre valores del IRI obtenidos por el *Dipstick* y el valor medio del IRI obtenido por la herramienta informática

IRI - Herramienta - valor medio de los recorridos (m/km)	IRI - Dipstick (m/km)	Error verdadero (m/km)	Error relativo (%)
3,57	3,51	-0,06	1,72

Fuente: Propia.

5.5 Comparación de los datos determinados por la herramienta informática desarrollada y la aplicación ProVAL

A partir de los valores del índice IRI obtenidos a través de la herramienta informática y de la aplicación ProVAL, se elaboraron tablas para comparar los resultados, para ello se calcula el error verdadero y el error relativo.

En la Tabla 17 se presentan los resultados del análisis de la Av. Las Acacias, en la tabla se muestran los valores del error relativo entre el IRI de la herramienta informática y el de la aplicación ProVal.

Tabla 17. Comparación entre valores del IRI obtenidos por la herramienta informática y la aplicación ProVAL

Recorrido	IRI - Herramienta (m/km)	IRI - ProVAL (m/km)	Error verdadero (m/km)	Error relativo (%)
1	3,31	3,28	-0,03	0,88
2	3,52	3,57	0,05	1,29
3	3,68	3,70	0,02	0,59
4	3,77	3,53	-0,24	6,79

Fuente: Propia.

Se toma el promedio del índice IRI obtenido por la aplicación ProVAL y se compara con el valor medio del IRI obtenido por la herramienta informática, siendo así

un valor medio de 3,52 m/km el valor obtenido por la aplicación ProVAL y 3,57 m/km el valor obtenido por la herramienta informática, teniendo así un error relativo de 1,43% en el análisis del IRI de la Av. Las Acacias, esto se puede observar en la Tabla 18.

Tabla 18. Comparación entre el valor medio del IRI obtenido por la herramienta informática y la aplicación ProVAL

IRI - Herramienta - valor medio de los recorridos (m/km)	IRI - ProVAL - valor medio de los recorridos (m/km)	Error verdadero (m/km)	Error relativo (%)
3,57	3,52	-0,05	1,43

Fuente: Propia.

En la Tabla 19 se presentan los resultados del análisis de la Av. Juan B. Flores, en la tabla se muestran los valores del error relativo entre el IRI de la herramienta informática y el de la aplicación ProVal.

Tabla 19. Comparación entre valores del IRI obtenidos por la herramienta informática y la aplicación ProVAL

Recorrido	IRI - Herramienta (m/km)	IRI - ProVAL (m/km)	Error verdadero (m/km)	Error relativo (%)
1	4,83	4,50	-0,33	7,31
2	4,40	4,40	0,00	0,07
3	4,88	4,82	-0,07	1,36
4	4,52	4,48	-0,03	0,74

Fuente: Propia.

Se toma el promedio del índice IRI obtenido por la aplicación ProVAL y se compara con el valor medio del IRI obtenido por la herramienta informática, siendo así un valor medio de 4,55 m/km el valor obtenido por la aplicación ProVAL y 4,66 m/km el valor obtenido por la herramienta informática, teniendo así un error relativo de 2,37% en el análisis del IRI de la Av. Juan B. Flores, esto se puede observar en la Tabla 20.

Tabla 20. Comparación entre el valor medio del IRI obtenido por la herramienta informática y la aplicación ProVAL

IRI - Herramienta - valor medio de los recorridos (m/km)	IRI - ProVAL - valor medio de los recorridos (m/km)	Error verdadero (m/km)	Error relativo (%)
4,66	4,55	-0,11	2,37

Fuente: Propia.

En la Tabla 21 se presentan los resultados del análisis de la Av. Acosta Ñu, en la tabla se muestran los valores del error relativo entre el IRI de la herramienta informática y el de la aplicación ProVal.

Tabla 21. Comparación entre valores del IRI obtenidos por la herramienta informática y la aplicación ProVAL

Recorrido	IRI - Herramienta (m/km)	IRI - ProVAL (m/km)	Error verdadero (m/km)	Error relativo (%)
1	4,88	4,66	-0,22	4,65
2	4,48	4,36	-0,12	2,73
3	4,15	3,92	-0,23	5,85
4	3,97	3,90	-0,07	1,90

Fuente: Propia.

Se toma el promedio del índice IRI obtenido por la aplicación ProVAL y se compara con el valor medio del IRI obtenido por la herramienta informática, siendo así un valor medio de 4,21 m/km el valor obtenido por la aplicación ProVAL y 4,37 m/km el valor obtenido por la herramienta informática, teniendo así un error relativo de 3,80% en el análisis del IRI de la Av. Acosta Ñu, esto se puede observar en la Tabla 22.

Tabla 22. Comparación entre el valor medio del IRI obtenido por la herramienta informática y la aplicación ProVAL

IRI - Herramienta - valor medio de los recorridos (m/km)	IRI - ProVAL - valor medio de los recorridos (m/km)	Error verdadero (m/km)	Error relativo (%)
4,37	4,21	-0,16	3,80

Fuente: Propia.

En la Tabla 23 se presentan los resultados del análisis de la Av. Bahamas, en la tabla se muestran los valores del error relativo entre el IRI de la herramienta informática y el de la aplicación ProVal.

Tabla 23. Comparación entre valores del IRI obtenidos por la herramienta informática y la aplicación ProVAL

Recorrido	IRI - Herramienta (m/km)	IRI - ProVAL (m/km)	Error verdadero (m/km)	Error relativo (%)
1	5,70	5,21	-0,48	9,29
2	5,85	5,29	-0,56	10,57
3	5,83	5,69	-0,15	2,55
4	5,82	5,17	-0,65	12,51

Fuente: Propia.

Se toma el promedio del índice IRI obtenido por la aplicación ProVAL y se compara con el valor medio del IRI obtenido por la herramienta informática, siendo así un valor medio de 5,34 m/km el valor obtenido por la aplicación ProVAL y 5,80 m/km el valor obtenido por la herramienta informática, teniendo así un error relativo de 8,59% en el análisis del IRI de la Av. Bahamas, esto se puede observar en la Tabla 24.

Tabla 24. Comparación entre el valor medio del IRI obtenido por la herramienta informática y la aplicación ProVAL

IRI - Herramienta - valor medio de los recorridos (m/km)	IRI - ProVAL - valor medio de los recorridos (m/km)	Error verdadero (m/km)	Error relativo (%)
5,80	5,34	-0,46	8,59

Fuente: Propia.

5.6 Fuentes de posibles errores que influyen en el cálculo del IRI

Es importante considerar las siguientes posibles fuentes de errores, debido a que influyen en la precisión y exactitud de los cálculos realizado por la herramienta informática desarrollada:

- Errores cometidos por las maniobras del conductor;
- Vibración propia del motor del vehículo;

- Deficiencia en la medición de la distancia recorrida, debido a que la velocidad no resulta ser siempre constante;
- Vehículo utilizado para el levantamiento de datos no posee los mismos parámetros del modelo de cuarto de carro definido por los estándares para el cálculo del IRI;
- Debido a la tasa de adquisición de las muestras, que está limitado a 10Hz por la aplicación *AndroSensor*, se tomaron mediciones cada 166,6cm (a diferencia del *Dipstick* que toma los datos a cada 25cm) lo que ocasiona un error en el cálculo final del IRI;
- No fueron considerados algunos modelos de compensación de errores como la aceleración centrífuga (porque se consideró que no se realizaron maniobras de rotación en el vehículo) y el efecto Coriolis (porque se debería incluir el giroscopio para esta fuente de error).

6 CAPÍTULO: CONCLUSIONES

En el capítulo 5 se presentaron los valores del IRI obtenidos mediante el equipo *Dipstick*, la herramienta informática desarrollada y la aplicación ProVAL. Se ha realizado las debidas comparaciones a través de tablas entre las herramientas utilizadas para la obtención del valor del IRI.

Con ello en esta sección, se presentan las conclusiones determinadas a través del análisis de los resultados del presente trabajo de final de curso, y por último se proponen tareas para la mejora de la herramienta informática.

6.1 Conclusiones generales

El presente estudio se ha elaborado con el objetivo principal de desarrollar una herramienta informática para la evaluación del IRI en ingeniería civil, que represente bajo costo y sea de fácil acceso e implementación comparados con equipos de mayor coste ya disponibles en el mercado. Para ello se ha empleado el sensor integrado del teléfono móvil, analizando así su potencial de uso en la determinación del IRI, siguiendo una metodología propuesta para la adquisición de datos.

A pesar de que no se han tratado posibles fuentes de error, detallados en el apartado 5.6., los resultados obtenidos con la herramienta informática fueron satisfactorios numéricamente. Cabe mencionar que son necesarias más pruebas para afirmar la efectividad de la herramienta.

Es algo indiscutible el potencial que tienen los teléfonos móviles, aprovechando sus sensores incorporados, de utilizarlos para desarrollar herramientas que puedan ser útiles, no solo para el cálculo del IRI, sino de otros parámetros útiles para la ingeniería civil.

6.2 Conclusiones específicas

En el presente estudio a través de la revisión bibliográfica fue posible identificar las distintas tecnologías y aplicaciones informáticas para dispositivos móviles y tabletas de bajo costo, por ello, se ha optado por utilizar el sensor incorporado (acelerómetro) de un teléfono móvil, igualmente mediante la revisión bibliográfica se ha optado por utilizar LabVIEW como entorno de programación, debido a que está

basado en un lenguaje gráfico de programación que otorga facilidad para el desarrollo de la interfaz gráfica.

Se ha realizado un estudio previo para identificar las fuentes de error en los sensores de medición, algunos de estos se han corregido a través de un método de calibración adecuado para esta aplicación. Posteriormente se ha realizado un estudio bibliográfico para determinar los procesos necesarios (Figura 36) desde la adquisición de los datos hasta el cálculo del IRI y luego desarrollar los algoritmos que contengan estos procesos e incorporarlos a la herramienta informática desarrollada.

La metodología de evaluación permitió obtener los datos necesarios para la obtención del valor del IRI, a través de una metodología de adquisición de datos en campo, de tratamiento de los datos y para el desarrollo de la herramienta informática desarrollada.

Comparando el valor del IRI obtenido con el *Dipstick* y con la herramienta informática, se tiene un error relativo de 1,72%, para el primer tramo (Av. Las Acacias), este resultado es bastante satisfactorio, sin embargo la herramienta carece de precisión con errores variables de hasta 7,47%.

Comparando el valor del IRI obtenido con la aplicación ProVAL y con la herramienta informática, para el primer tramo (Av. Las Acacias) se tiene un error de 1,43%, con errores variables de hasta 6,79%, para el segundo tramo (Av. Juan B. Flores) se tiene un error relativo de 2,37%, con errores variables de hasta 7,31%, para el tercer tramo (Av. Acosta Ñu) se tiene un error relativo de 3.80%, con errores variables de hasta 5,85%, finalmente para el cuarto tramo (Av. Bahamas) se tiene un error relativo de 8.59%, con errores relativos de hasta 12,51%.

6.3 Recomendaciones para mejorar la herramienta informática desarrollada:

Se puede realizar varias mejoras al algoritmo desarrollado, que pueden mejorar su exactitud y precisión, dichas mejoras se centran en el filtrado de errores, estas mejoras son las siguiente:

- Se puede mejorar el cálculo del IRI analizando la respuesta en frecuencia para posteriormente aplicar filtros para eliminar ruidos no deseados;
- Incluir la lectura del giroscopio y fusionar con los datos del acelerómetro para mejorar el cálculo de las matrices de transformación de sistemas de

referencias, de esta manera se puede eliminar la influencia de las aceleraciones lineales en el cálculo de estas matrices de rotación;

- Incluir en la herramienta desarrollada el modelo de cuarto de coche para el cálculo del IRI a partir de los desplazamientos;

También se puede mejorar el cálculo del IRI aplicando las siguientes recomendaciones:

- Usar sensores independientes con un microcontrolador de bajo coste para así poder obtener mediciones con mayor frecuencia y obtener resultados más precisos;
- Las mediciones podrían ser tomadas desde un vehículo sin amortiguador a velocidad constante y luego aplicar el modelo de cuarto de coche para tener resultados de IRI de mayor precisión y exactitud.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELAZIS, N. et al. **International Roughness Index prediction model for flexible pavements**. International Journal of Pavement Engineering, VOL. 21, NO.1, 88-99, 2020.

ALARCÓN, C.A.M. **Análisis del ciclo de vida de los pavimentos asfálticos**. 2015. Programa de especialización en Ingeniería de Pavimentos. Disponible en: <<http://hdl.handle.net/10654/15195>>. Ingresado el: 20 jun. 2022.

ALMEIDA, L.C.D. **Aplicativo para smartphone destinado à medição da irregularidade longitudinal em rodovias**. 2018. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2018.

ALVAREZ, E. J.Z. et al. **Development of a discrete roughness index for longitudinal road profiles**. International Journal of Pavement Engineering, VOL 19, NO 12, 1043-1052, 2018.

ASOSIACIÓN PARAGUAYA DE CARRETERAS - APC. **Manual de Carreteras del Paraguay**. Planificación de Proyectos Viales. Paraguay. 2019a. Disponible en: <<https://apcarreteras.org.py/manual-de-carreteras-del-paraguay/>>. Ingresado el: 26 abr. 2022.

ASOSIACIÓN PARAGUAYA DE CARRETERAS - APC. **Manual de Carreteras del Paraguay**. Ensayos de Materiales para Construcción de Carreteras. Paraguay. 2019b. Disponible en: <<https://apcarreteras.org.py/manual-de-carreteras-del-paraguay/>>. Ingresado el: 26 abr. 2022.

ASOSIACIÓN PARAGUAYA DE CARRETERAS - APC. **Manual de Carreteras del Paraguay**. Construcción de Carreteras. Paraguay. 2019c. Disponible en: <<https://apcarreteras.org.py/manual-de-carreteras-del-paraguay/>>. Ingresado el: 26 abr. 2022.

BISCONSINI, D.R. **Avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos com dados coletados por smartphones**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

BERNUCCI, L.B. et. al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS:ABEDA, 2008. 504 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Instrução de Serviço/DG Nº13**. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de Gerência de Pavimentos**. Publicação IPR – 745. Ministério dos Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Publicação IPR-720. Ministerio dos Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, 2006a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de Pavimentação**. Publicação IPR-719. Ministerio dos Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, 2006b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos**. Publicação IPR – 704. Ministerio dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico, Rio de Janeiro, 1998.

DÍAS, A.M; PÉREZ, E.A; ROJAS, M.G.S. **Prácticas para evaluar la calidad de infraestructura carretera de cuota**. Secretaria de Comunicaciones y Transportes. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 353. Sanfandila, Qro, 2011.

FORSLOF, L.; JONES, H. **Roadroid: Continuous Road Condition Monitoring with Smart Phones**. Journal of Civil Engineering and Architecture, v.9, p. 485-496, 2015.

IRI.REGULARIDAD.CARRETERAS. **Trailer IRI**. 14 oct. 2019. Disponible en < https://play.google.com/store/apps/details?id=com.luisnieto.iri_calc_free&hl=es >. Ingresado el: 22 jun. 2022.

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y COMUNICACIONES - MOPC. **Red Vial**. Mapas con Corte de Inventario. Paraguay, jul. 2021. Disponible en: < <https://www.mopc.gov.py/index.php/red-vial> >. Ingresado el: 10 may. 2022.

MIQUEL, M.P. **Análisis de Regularidad Superficial en Caminos Pavimentados**. Revista de la Construcción, v.5, n.2, p. 16-22, 2006. Disponible en: < <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127619380002> >. Ingresado el: 10 may. 2022.

MÚČKA, P. **International Roughness Index specifications around the world**. Road Materials and Pavement Design. VOL. 18, NO 4, 992-965, 2017.

NATIONAL INSTRUMENTS, **LabVIEW™ Core 1**. Manual de Curso, 2012.

OLIVEIRA, R.A.D. **Monitoramento da Qualidade de Rolamento de Pavimentos com Dados de Smartphones**. 2018, 131. Trabajo de Conclusión de Curso. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica Federal del Paraná, 2018.

OLIVEIRA FILHO, J.A et al. **Obtenção da Irregularidade Longitudinal em Pavimento Rígido por Meio de Equipamentos de Avaliação Indireta**. Anais do 61º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2019 – 61CBC2019, Fortaleza-Ceará, 2019. Disponible en: < https://www.researchgate.net/publication/336601960_OBTENCAO_DA_IRREGULARIDADE_LONGITUDINAL_EM_PAVIMENTO_RIGIDO_POR_MEIO_DE_EQUIPAMENTOS_DE_AVALIACAO_INDIRETA >. Ingresado el: 26 abr 2022.

PROVAL3. **Guía del Usuario**. 2022?, p.114. Disponible en:<
<http://www.roadprofile.com/download/ProVAL-3.0-Guia-del-Usuario-ESP.pdf>>.
Ingresado el 20 jul. 2022.

PROVAL. **Introducción ProVAL en español**. 2016?, p. 2. Disponible en
<<https://www.roadprofile.com/download/ProVAL-Intro-Spanish.pdf>>. Ingresado el: 14
jul. 2022.

ROADROID. **Referencia de Proyectos Roadroid**. 2014. p. 8. Disponible en: <
[https://www.roadroid.com/common/References/Roadroid%20Referencia%20de%20p](https://www.roadroid.com/common/References/Roadroid%20Referencia%20de%20proyectos.pdf)
[royectos.pdf](https://www.roadroid.com/common/References/Roadroid%20Referencia%20de%20proyectos.pdf)>. Ingresado el: 20 may. 2022.

RUIZ, T. G.; ARCE, M. **Índice de Regularidad Internacional**. Diciembre, 2004. 34p.
Disponible en:<
<https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1347/LM-PI-PV-IN-24a-04%20%C3%8Dndice%20de%20regularidad%20internacional.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Seg%C3%BAn%20la%20definici%C3%B3n%20del%20Banco,velocidad%20de%2080%20km%2Fh>>. Ingresado el: 18 Nov. 2020.

SAYERS, M.W; G,T.D; PATERSON,W,D,O. **Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements**. World Bank Technical Paper Number 46, Washington, D.C., USA, p. 1-87.

TORIBIO, J.O.C; LAZARES,J,W,G. **Evaluación superficial de vías urbanas empleando vehículo aéreo no tripulado (VANT)**. Métodos Y Materiales, 8(1), 23-32, mar, 2019. Disponible en: <<https://doi.org/10.15517/mym.v8i1.34113>>. Ingresado el:24 abr. 2022.

VARGAS, G.B. **Determinación de la regularidad superficial del pavimento, mediante el cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI)**. Infraestructura Vial, Costa Rica, n. 21, p. 30-37, 2009. Disponible en: <
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5051912>>. Ingresado el: 10 may. 2022.

VIANA, E.E.P. **Fusión de sensores para estimar la orientación de un vehículo autónomo a escala, mediante el Filtro de Kalman**. 2019. 155 f. Trabajo de Conclusión de Curso (Ingeniería Electromecánica). Facultad de Ciencias y Tecnologías. Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción, Alto Paraná, 2019.

APÉNDICES

APÉNDICE A - MANUAL DE UTILIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA

La herramienta informática desarrollada necesita valores de aceleración, estos valores se obtienen a través de un teléfono móvil utilizando la aplicación *AndroSensor*, posteriormente se realiza el tratamiento de los datos recolectados con esta aplicación y se procede a procesar los datos con la herramienta informática desarrollada.

- Equipamientos necesarios
 - Teléfono móvil, que permita descargar la aplicación *AndroSensor*;
 - Soporte para el teléfono móvil, se propone fijar el teléfono móvil a una placa de vidrio;
 - Vehículo móvil.

- Iniciando la herramienta

1. Inicio

Para iniciar la utilización de la herramienta se debe procesar los datos adquiridos cumpliendo la metodología del trabajo presentado en la sección 3.3.1 del capítulo 3.

2. Leer aceleraciones

Insertar en el programa principal (main.vi) los datos de la aceleración extraídos del apartado 8 de la sección 3.3.1 del capítulo 3, el programa se encarga de la extracción de los datos del archivo de texto y los convierte a formato numérico para su procesamiento.

3. Calibración del acelerómetro

- 3.1. Cálculo de la matriz b

El proceso para la obtención de los datos de la matriz b es el siguiente:

1. Insertar en el subVis: Bias bx by.vi, los datos de la aceleración extraídos del apartado 1 de la sección 3.3.1 del capítulo 3, se ejecuta el programa y con esto se obtiene el sesgo del sensor en el eje x e y, estos datos se cargan en la interfaz principal (main.vi) y en los subVis: M11_m21_m31.vi, M12_m22_m32.vi, M13_m23_m33.vi;
2. Insertar en el subVis: Bias bz.vi, los datos de la aceleración extraídos del apartado 2 de la sección 3.3.1 del capítulo 3, se ejecuta el

programa y con esto se obtiene el sesgo del sensor en el eje x e y, estos datos se cargan en la interfaz principal (main.vi) y en los subVis:

M11_m21_m31.vi, M12_m22_m32.vi, M13_m23_m33.vi;

En la Figura A-A. 1 se presenta el panel frontal del subVis: Bias bx by.vi, en donde del lado izquierdo del panel se deben insertar los datos y del lado derecho se obtienen los resultados.

Figura A-A. 1. Panel frontal del subVI para el cálculo de la matriz b



Fuente: Propia.

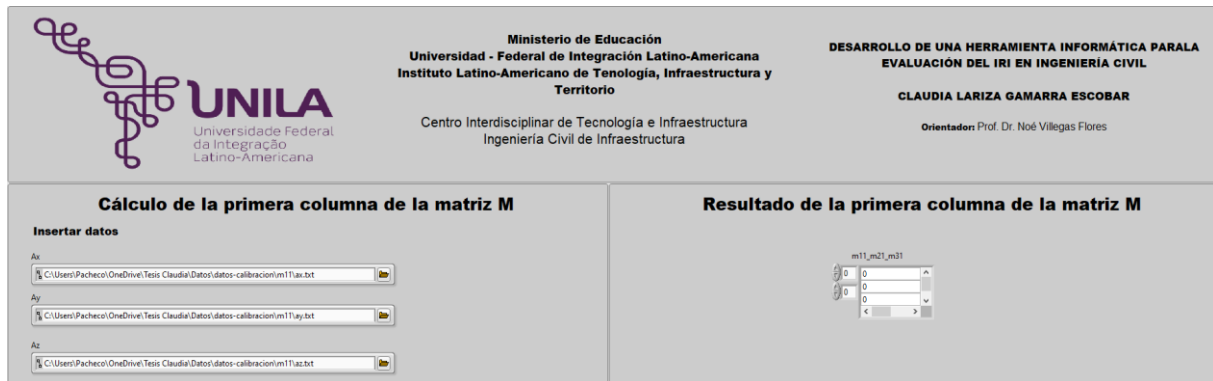
3.2. Cálculo de la matriz M

El proceso para la obtención de los datos de la matriz M es el siguiente:

1. Insertar en el subVis: M11_m21_m31.vi los datos de la aceleración extraídos del apartado 3 de la sección 3.3.1 del capítulo 3, se ejecuta el programa y con esto se obtienen los datos de la primera columna de la matriz M, estos datos se cargan en la interfaz principal (main.vi);
2. Insertar en el subVis: M12_m22_m32.vi los datos de la aceleración extraídos del apartado 4 de la sección 3.3.1 del capítulo 3, se ejecuta el programa y con esto se obtienen los datos de la segunda columna de la matriz M, estos datos se cargan en la interfaz principal (main.vi);
3. Insertar en el subVis: M13_m23_m33.vi los datos de la aceleración extraídos del apartado 5 de la sección 3.3.1 del capítulo 3, se ejecuta el programa y con esto se obtienen los datos de la tercera columna de la matriz M, estos datos se cargan en la interfaz principal (main.vi);

En la Figura A-A. 2 se presenta el panel frontal del subVis: M13_m23_m33.vi, en donde del lado izquierdo del panel se deben insertar los datos y del lado derecho se obtienen los resultados.

Figura A-A. 2. Panel frontal del subVi para el cálculo de la matriz M



Ministerio de Educación
Universidad - Federal de Integración Latino-Americana
Instituto Latino-Americano de Tecnología, Infraestructura y Territorio

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA LA EVALUACIÓN DEL IRI EN INGENIERÍA CIVIL

CLAUDIA LARIZA GAMARRA ESCOBAR
Orientador: Prof. Dr. Noé Villegas Flores

Cálculo de la primera columna de la matriz M

Insertar datos

Ax: C:\Users\Pacheco\OneDrive\Tesis Claudia\datos\datos-calibracion\m11ax.txt

Ay: C:\Users\Pacheco\OneDrive\Tesis Claudia\datos\datos-calibracion\m11ay.txt

Az: C:\Users\Pacheco\OneDrive\Tesis Claudia\datos\datos-calibracion\m11az.txt

Resultado de la primera columna de la matriz M

m11	m21	m31
0	0	0
0	0	0
0	0	0

Fuente: Propia.

4. Cambio de sistema de coordenadas de BODY a ENU

Este proceso se realiza en tiempo real con las aceleraciones calibradas y utilizando la media móvil de estos valores para eliminar errores de vibración.

5. Extracción del valor de la gravedad

Se eliminan los valores de la gravedad del eje z, utilizando también la media móvil de este eje.

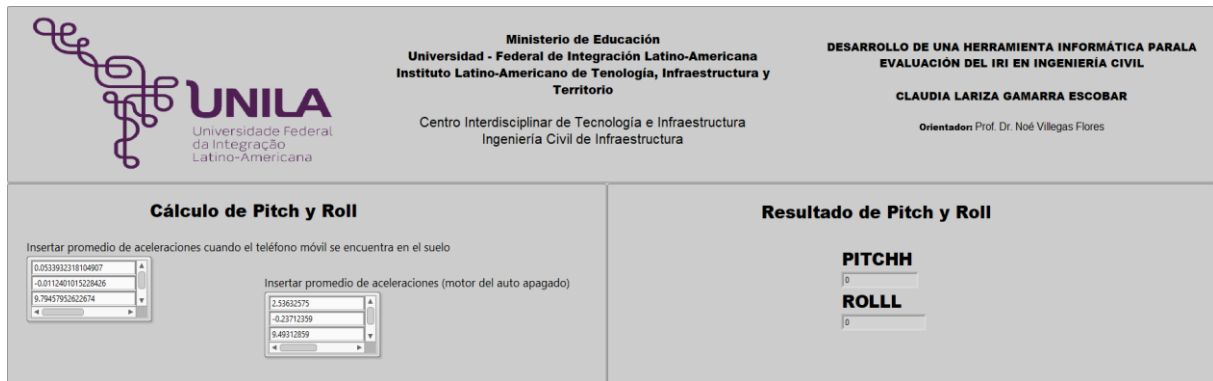
6. Cambio de sistema de coordenadas de ENU a BODY

Se calculan los ángulos Pitch y Roll con el subvis: Pitch y Roll.vi, a partir de las aceleraciones calibradas, el proceso para la obtención de los ángulos Pitch y Roll es el siguiente:

1. Insertar en el subVis: Pitch y Roll 2.vi los datos del promedio de las aceleraciones extraídos del apartado 6 de la sección 3.3.1 del capítulo 3, se ejecuta el programa y con esto se obtienen los valores de Pitch y Roll, estos datos se cargan en la interfaz principal (main.vi);

En la Figura A-A. 3 se presenta el panel frontal del subVis: Pitch y Roll 2.vi, en donde del lado izquierdo del panel se deben insertar los datos y del lado derecho se obtienen los resultados.

Figura A-A. 3. Panel frontal del subVi para el cálculo de Pitch y Roll



Ministerio de Educación
Universidad - Federal de Integración Latino-Americana
Instituto Latino-Americano de Tecnología, Infraestructura y Territorio

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA LA EVALUACIÓN DEL IRI EN INGENIERÍA CIVIL

CLAUDIA LARIZA GAMARRA ESCOBAR
Orientador: Prof. Dr. Noé Villegas Flores

Cálculo de Pitch y Roll

Insertar promedio de aceleraciones cuando el teléfono móvil se encuentra en el suelo

0.0533932318104907
-0.0112401015228426
9.79457952622674

Insertar promedio de aceleraciones (motor del auto apagado)

2.53632575
-0.23712359
0.49312859

Resultado de Pitch y Roll

PITCHH
0

ROLLL
0

Fuente: Propia.

7. Integración de Az y Vz, sumatoria de dZ

Se realiza la doble integración de la aceleración procesada y se realiza la sumatoria de los módulos obtenidos. De esta manera se obtiene la sumatoria del desplazamiento vertical a lo largo del tramo (esta doble integración, pero con sus signos correspondientes son los que se introducen a la aplicación ProVAL para el cálculo del IRI).

8. Obtención del IRI

Finalmente se calcula la distancia recorrida en kilómetros y el valor obtenido del desplazamiento vertical en metros se divide con este obteniendo así el valor del IRI.

- Presentación del panel frontal de la herramienta informática

El panel frontal de la herramienta informática desarrollada se puede apreciar en la Figura A-A. 4, en donde del lado izquierda se insertan los datos obtenidos en el ítem 3 y 6, en el medio del panel se insertan los datos obtenidos en el ítem 2, y luego se ejecuta el programa que da como resultado el valor del índice IRI y un gráfico de desplazamiento vs distancia.

Figura A-A. 4. Panel frontal de la herramienta informática desarrollada



Fuente: Propia.

ANEXOS

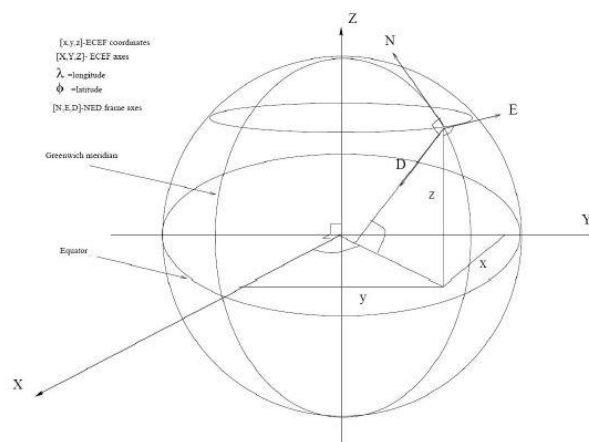
ANEXO A – SISTEMA DE COORDENADAS Y RELACIÓN ENTRE ELLAS

En este anexo se presentan los sistemas de referencia utilizados para este trabajo de final de curso.

1.1. Sistema de coordenadas de Navegación n-frame

Es un sistema local con sus ejes X e Y en el plano tangente al punto de la Tierra donde está el origen. Normalmente el eje X apunta al norte, el eje Y al este y el eje Z abajo, aunque esto debe ser especificado. Este sistema también es conocido como NED (North, East, Down) ya que sus ejes apuntan a estas direcciones. En ocasiones, se utiliza otra configuración, con el eje X apuntando al este, el eje Y al norte y el eje Z apuntando hacia arriba, también conocido como ENU (East, North, UP). El sistema ENU es el usado en este trabajo de final de curso (VIANA, 2019, p.12-13).

Figura A. 1. Coordenadas NED



Fuente: Adoptado de VIANA, 2019, p.13.

1.2. Sistemas de coordenadas Body b-frame

Este sistema tiene su origen en el centro de masas del vehículo. Típicamente usado en plataformas Strapdown, es decir, cuando los sensores están en el centro de masas del vehículo y sus ejes se mueven con él (es el caso de este proyecto). Este sistema tiene su origen en el centro de masas del vehículo. Típicamente usado en plataformas Strapdown, es decir, cuando los sensores están en el centro de masas del vehículo y sus ejes se mueven con él (es el caso de este proyecto) (VIANA, 2019, p.13).

Viana (2019) explica que los ejes de este sistema apuntan a la derecha, enfrente y arriba (teniendo en cuenta a la posición del vehículo y que los ejes van adheridos a ella)

1.3. Relación entre los sistemas de coordenadas

1.3.1. Ángulos de Euler

Son tres ángulos que, mediante una sucesión ordenada de giros, definen el cambio de un sistema de coordenadas a otro. Estos ángulos son: Roll (ϕ), Pitch (θ) y Yaw (ψ). El ángulo Roll (ϕ), es el giro alrededor del eje x en sentido antihorario (ver fig. , el ángulo Pitch (θ), es la rotación alrededor del eje y en sentido antihorario (ver fig. y Yaw (ψ) es la rotación del vehículo alrededor del eje z en sentido antihorario (ver fig. , tomando como referencia el norte. Los ejes x, y y z, mencionados en el párrafo anterior corresponden a las coordenadas de navegación NED.

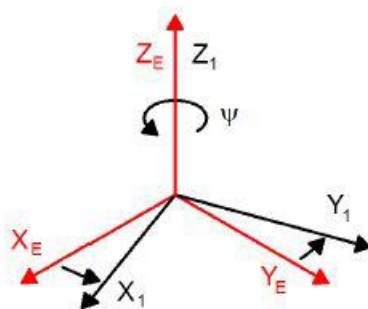
1.3.2. Cambio de Body a Navegación con los ángulos de Euler

Resulta más conveniente y fácil hacer un análisis de cambio de coordenadas de navegación (x, y, z) a body (x'' , y'' , z''), tomando de manera independiente la rotación de cada eje.

1.3.3. Giro en Yaw

Es el primer giro que se hará, con esta matriz pasamos de coordenadas (x, y, z) a (x' , y' , z'), la matriz de rotación es la siguiente:

Figura A. 2. Rotación del eje z



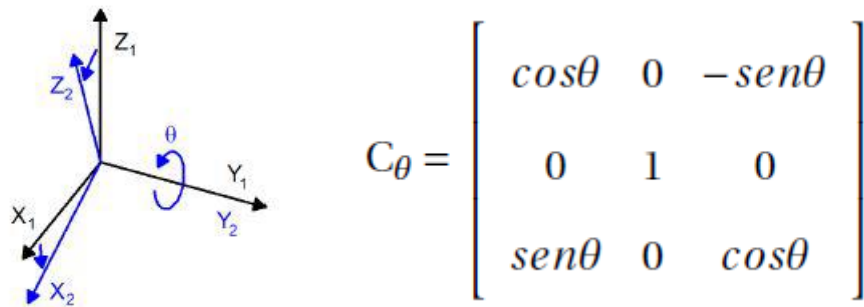
$$C_{\Psi} = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Fuente: Adoptado de VIANA, 2019, p.118.

1.3.4. Giro en Pitch

Luego giramos el sistema (x', y', z') para conseguir (x'', y'', z'') con la siguiente matriz de transformación:

Figura A. 3. Rotación del eje y

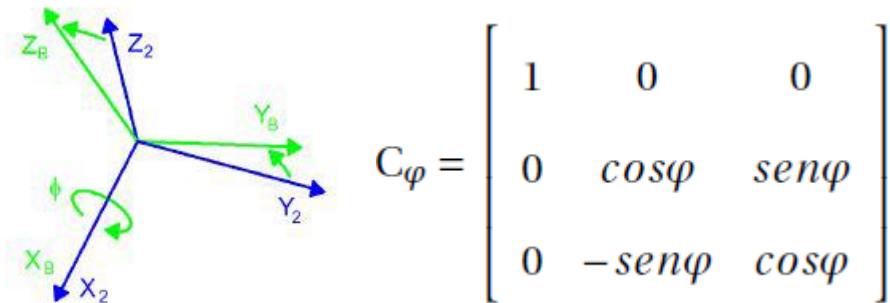


Fuente: Adoptado de VIANA, 2019, p.118.

1.3.5. Giro en Roll

Finalmente, giramos el sistema (x'', y'', z'') para conseguir (x''', y''', z''') con la siguiente matriz de transformación:

Figura A. 4. Rotación alrededor del eje x



Fuente: Adoptado de VIANA, 2019, p.119.

Luego por fin es posible definir la matriz de cambio de coordenadas de navegación a body como C_n^b como

$$C_n^b = C_{\psi} * C_{\theta} * C_{\varphi}$$

$$C_n^b = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \cos\theta\sin\psi & -\sin\theta \\ \cos\psi\sin\theta\sin\varphi - \sin\psi\cos\varphi & \cos\psi\cos\varphi + \sin\psi\sin\theta\sin\varphi & \cos\theta\sin\varphi \\ \cos\psi\sin\theta\cos\varphi + \sin\psi\sin\varphi & \sin\varphi\sin\theta\cos\varphi - \cos\psi\sin\varphi & \cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix}$$

La ecuación de arriba corresponde a la matriz de cambio de coordenadas de navegación a body. Para realizar la inversa de Body a navegación se utiliza la inversa:

$$C_n^b = (C_b^n)^T$$

Para este trabajo solo interesan las transformaciones de Pitch y Roll, pues solo se quiere obtener la aceleración vertical real.