

## OCENA JAKOŚCI LOTNICZEGO SKANOWANIA LASEROWEGO TECHNOLOGII POJEDYNCZEGO FOTONU

### QUALITY ASSESSMENT OF SINGLE-PHOTON LIDAR DATA

**Adam Kostrzewa, Krzysztof Bakula**

Department of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems,  
Warsaw University of Technology, Faculty of Geodesy and Cartography

**KEY WORDS:** airborne laser scanning, Single-photon LiDAR, linear sensors, Leica SPL100, quality assessment

**ABSTRACT:** This publication assesses the quality of airborne laser scanning using Single-photon LiDAR technology for Pamplona, located in Navarre, northern Spain. The paper uses reference data sets acquired with traditional (linear) scanners to compare the new single-photon method with the multi-photon technology that has been known on the market for many years. The main issue of the research was to evaluate the quality of the new single-photon scanner method concerning the accuracy and parameters obtained by scanners representing the older and better-known multi-photon method. The single-photon scanner data set was subjected to a detailed and thorough evaluation of the accuracy and quality of the data in terms of vegetation penetration, bathymetric measurement capabilities, and the quality of the height models created compared with the reference data. The research made it possible to draw several conclusions, which led to the determination of the final position of the studied single-photon data, along with demonstrating their strengths and advantages. The analyses also made it possible to indicate the range of applications in which typical linear (multi-photon) scanners still have their advantage.

#### 1. INTRODUCTION

The first tests related to single-photon systems were conducted in early 2001. As part of the Instrument Incubator Programme, NASA (National Advisory Committee for Aeronautics) presented a microlaser altimeter that conducted measurements using a single-photon mechanism ([Degnan, 2016](#)). The aspect of a very high orbit for those years of such technology was most relevant to NASA's space agency. This created opportunities in the context of using and adapting the method under development to acquire data from areas even beyond the boundaries of our planet ([Degnan, 2002](#)). The intermediate goal of the developers of the developed instrument was to design such an instrument that would make it possible to create a continuous terrain model of Mars with a spatial resolution parameter of 5 metres and altitude accuracy in the range of single decimetres. The instrument was to perform the

mission in about three years and acquire terrain data from a ceiling of 300 km ([Stoker et al., 2016](#)).

Prototype single-photon systems attempted to develop and use a laser wavelength of 532 nm. This was done despite the already better-known advantages and properties of the 1064 nm laser wavelength characterized by better atmospheric transmittance and natural reflectivity. The choice of the green laser wavelength was associated with technological considerations - narrow-band transmission filters for spectral filtering of the signal were characterized by high capabilities of focusing the return signal on the detector element, and the detectors used had better performance for wavelengths in the visible band (readiness for recording successive reflections in the nanosecond range). The wavelength adopted and established once was used in subsequent generations of systems ([Degnan, 2002](#)). Another feature that led to the decision to develop the instrument based on the implemented wavelength of 532 nm was the ability to register reflections from the water surface and penetrate water (bathymetric studies). This advantage was already recognized during the system's first tests on the Atlantic Ocean shores near the state of Virginia. From an altitude of 4 km, it was possible to record points reaching a depth of about 3 m. Problems with the tree canopy penetrating the ground beneath terrain covered with high vegetation were also not noted ([Degnan, 2016](#)).

The development of single-photon systems continued with the story in 2016 by Sigma Space Corporation of high-resolution Quantum Lidar Systems scanners (HRQLS-1) and its upgraded successor, the HRQLS-2. Both systems used a short laser pulse split in a passive diffractive optical element - DOE into ten by 10, or 100 regularly organized rays coming out of the scanner and incident on the ground ([Stoker et al., 2016](#)). In 2016, Sigma Space Corporation was acquired by Hexagon/Leica Geosystems. Based on the acquired entity's developed solutions for single-photon data acquisition, a commercial version of the Leica SPL100 scanner was already presented in 2017.

The Leica SPL100 has two main components. A diffractive optical element that splits the laser beam into an array of 10 x 10 beams and an optical receiver built from a light-sensitive detector array that receives energy feedback through a variety of 10 x 10 detector elements sensitive to the energy output of a single photon. This architecture enables the SPL100 to collect up to 6 million points per second with a pulse repetition frequency of 60 kHz (effectively 6 MHz) ([Brown et al., 2020](#)). The Leica SPL100 uses the scanning mechanism Palmer scan, which generates a circular scan pattern on the ground. The higher performance implemented in the SPL100 system comes at the expense of reduced distance measurement accuracy and greater susceptibility to noise registration (especially from the atmosphere). For a single beam, the divergence is 0.08 mrad ([Brown, 2019](#)). The SPL100 is tuned to estimate the intensity value of recorded points by reading the uncalibrated value of the returning laser pulse. The intensity in the SPL100 system is calculated based on the pulse width. This is different from that known in linear systems, where intensity is usually recorded as peak amplitude ([Wang et al., 2018](#)). The design of the instrument is optimized for maximum point density. The scanner has a Photon Detection Probability (PDE) of 0.95 for 10% surface reflectance (e.g., green vegetation) and a PDE of 0.99 for 15% surface reflectance (e.g., bare soil or dry vegetation) ([Mandlbürger & Jutzi, 2018](#)). The wavelength

of 532 nm is a wavelength in the visible range. It has relatively low reflectance from natural surfaces (such as bare soil or dry vegetation of about 15% and green vegetation of about 10%). This is an advantageous feature for the system, as the optical components are inexpensive, the detector arrays show high efficiency in detecting back energy, and the excellent reflectance characteristics concerning water make it possible to acquire topographic and bathymetric data with a single mechanism (Degnan, 2016). The instrument has cumulative intensity recording capabilities, which means worse radiometry. Thanks to the fast standby time for receiving successive reflections, the system ensures the delivery of registration of multiple echoes relative to the single laser beam sent. These are fundamental properties in terms of acquiring data on, for example, vegetation and other complex analyses.

All ALS systems are required to achieve high accuracy, in addition to ever-improving performance affecting ever-lower economic costs. Expectations for this criterion depend mainly on the goals of data acquisition. However, in most ALS data applications, it is recommended that the precision of the points recorded by the system be as high as possible. New SPL solutions have to reconcile their performance advantage with the accuracy loss of acquired data relative to the precision ranges achieved by competing for line-mode scanners. LiDAR systems are designed to measure the distance to objects based on the time the laser beam travels from the scanner and back. The precision of registering returns from different surfaces is a random error, which the accuracy and repeatability of successive returns of the Leica SPL100 system can determine. The detection mechanism used, which consists of arrays of photodiodes, results in the achieved precision of registration of returns providing less accuracy than linear systems (Pfennigbauer & Ullrich, 2007). In linear systems, the received pulse has a relatively high energy value depending on which surface it has reflected from. The photodiode system in a linear system can determine the width of this pulse and its power. In an SPL system, each detected single-photon might be a component of a larger pulse from where uncertainties in the measured time (and indirectly the determined distance) can originate. This is due to the limitation of recording only one event resulting from the reception of the returning light energy regardless of the number of photons received due to the relatively short laser pulse width range of 0.6 ns. If the instrument were adapted to record a sufficiently large amount of return energy of the same beam, it would be possible to create a distribution of the recorded energy employing a histogram to a pretty similar degree to the functionality of linear FWF (Full Waveform) systems (Brown, 2019). Based on the still few studies conducted on the accuracy of the SPL method, it was found that roughness or tilted planes negatively affect this aspect (Mandlbürger *et al.*, 2019). In the case of the SPL system, additional accuracy problems may arise in the form of systematic measurement inaccuracies in the occurrence of an effect referred to as "first photon bias." The arrival times of subsequent photons at photodiodes follow a Poisson distribution. Detectors, such as SPL systems, being sensitive to the energy of already single photons, record the arrival time of only the earliest photon. The distance to the target can be systematically reduced (Brown, 2019). In addition to the impact of inaccuracies due to the internal design of the scanner system, other sources of error should also be noted. Knowing the exact position of the system in the air is mainly determined by the integrated GNSS/IMU positioning system. Regardless of the multiphoton or single-photon method, GNSS/IMU devices with similar accuracies are usually used. Thus, it can be ruled out that the GNSS/IMU system as a component used in any ALS system is the cause of the resulting higher point registration inaccuracies with the

SPL method. However, the higher altitudes used by SPL systems (on average, ten times higher) mean that the inertial angle measurement system can make platform inclination determinations with more significant measurement uncertainty. This is due to the property that the angular error increases proportionally to the distance from the object. The result will be more considerable inaccuracy in determining the direction of the laser beam - in proportion to the altitude from which the measurement is made ([Glennie et al., 2013](#)). A higher altitude also influences the fact that atmospheric refraction significantly impacts the emitted signal and is more challenging to determine precisely at a much longer distance. Inaccuracies due to the system's mechanical parts of such a subassembly as the Palmer optical scanner can also be important. A higher altitude affects this issue directly. Even slight angular differences can already generate significant errors in the staggered circular scanning pattern on the ground ([Jutzi, 2017](#)).

## 2. DATA SOURCES

The main factor in choosing Pamplona (Fig.1.) as the study area was the availability of SPL data and ALS datasets acquired by the multiphoton method. The government of Navarre, through a networked data repository, makes available for public use LiDAR data and orthophotos acquired for the province in consecutive years, among others. The data are made available under the terms of a CC-by 4.0 license (Creative Commons Attribution 4.0 International). The following aerial laser scanning datasets were used in this work:

- a point cloud acquired with a Leica SPL100 scanner in the period September – November 2017 with a density of 10 pts/m<sup>2</sup>,
- point cloud acquired with a Leica ALS60 scanner in the period February 2011 – June 2012 with a density of 1 pts/m<sup>2</sup>,
- point cloud acquired with a Leica CityMapper 2H - Hyperion 2+ scanner in September 2020 with a density of 25 pts/m<sup>2</sup>.

The mission to acquire LiDAR data in 2017 was performed with a novel scanner using the single-photon method - Leica SPL100. These data are the main focus of this publication. This was one of the first attempts made across Europe to acquire data with such a sensor. The SPL100 is a hybrid system consisting of a laser scanner and an RCD30 medium format camera (80 Mpix). The scanner is mainly used for efficient mapping of terrain topography. Due to the use of the green wavelength band of the laser, it is also suitable for shallow water bathymetry mapping. The area covered is about 10 391 square kilometres, and the total data set is nearly 580 billion points.

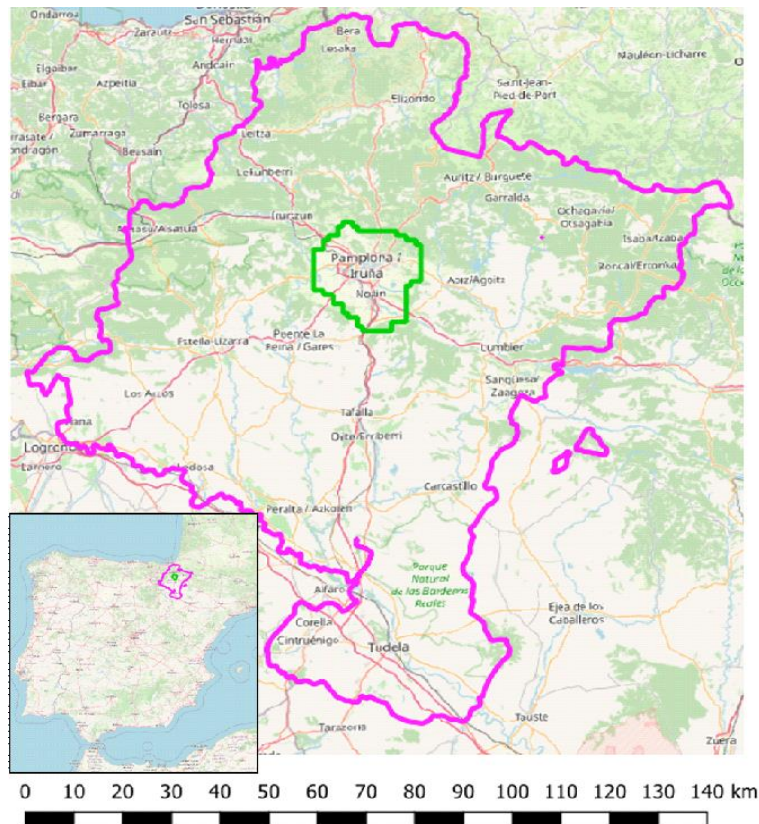


Fig. 1. Map showing the study area. In the background, the borders of the province of Navarre. (source base map: OpenStreetMap)

The main parameters of the Leica SPL100 laser scanning system used for data acquisition (Leica Geosystems):

- laser wavelength: 532 nm,
- jitter timing (precision): 50-100 ps,
- weight: 83.8 kg,
- laser pulse width: 0.4 ns,
- recovery time: 1.6 ns,
- laser pulse frequency: 6 MHz,
- minimum surface detection: 1 photon,
- detector elements: 10x10=100 MCP-PMT,
- field of view: 30°,
- scanning frequency: up to 25 Hz,
- laser beam divergence: 0.8 mrad,
- instantaneous field of view: 0.2 mrad,
- the number of recorded returns: up to 10 returns per channel per laser pulse, including intensity.

The main parameters of the performed mission to acquire scanner data:

- flight altitude (flying speed 370 km/h): 3900-6300 m,
- density (single series): 10 pts/m<sup>2</sup>,
- overlap between flight lines: 15%,
- number of flight lines: 482,
- average width of the recorded flight lines: 2300 m,
- maximum length of flight lines: 110 km,
- points recorded and recognized as noise: 16.84% (of the total dataset),
- dates of mission (40 sessions in 24 days): 8.09 - 16.11.2017,
- archiving: format \*.laz, files of 1x1 km.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

The purpose of the research work was to practically verify the data acquired with the unique Leica SPL100 scanner. The scope of the analyses included a general evaluation of the dataset (along with a view of the noise present in the dataset), presentation of a record of information on the intensity of the recorded points, analysis of the ability of the laser beams to penetrate vegetation and the effectiveness of reaching the ground, examination of the capabilities and measurement potential of bathymetric data, and presentation of the formation of point densities depending on the different dominant coverages. To assess the quality and accuracy of data acquired with the Leica SPL100 single-photon scanner, a series of analyses and tests were performed using reference data, which were point clouds from the Leica ALS60 linear traditional scanner with a density of 1 pt/m<sup>2</sup> acquired in late 2011 and early 2012, and data obtained with the Leica CityMapper 2H - Hyperion2+ hybrid sensor in 2020 with a density of 25 pts/m<sup>2</sup>.

#### 3.1 General data assessment

LiDAR systems using the next-generation single-photon method (SPL), as exemplified by the Leica SPL100 sensor, are designed to detect very weak laser beam reflections much more efficiently than LiDAR systems in linear mode sensors. The high quantum sensitivity is precisely the feature that gives SPL a massive advantage in method efficiency over multi-photon systems. Unfortunately, this heightened sensitivity also makes the detectors of these systems more susceptible to false returns, especially from solar background noise. This phenomenon causes the recorded points to cause difficulties at the stage of proper classification and filtering, as the points tend to be scattered ([Wang et al., 2018](#)).

In the graphic shown (Fig. 2.), it is clear how much noise in the SPL data we are dealing with. At the same time, the depicted fragment has many points that are reflected correctly from the surface of objects covering the area. This means that the registration of noise, although an unfavorable phenomenon, does not significantly hinder data registration according to the assumed density. For example, gabled roofs of low buildings can be easily seen in the visualization.



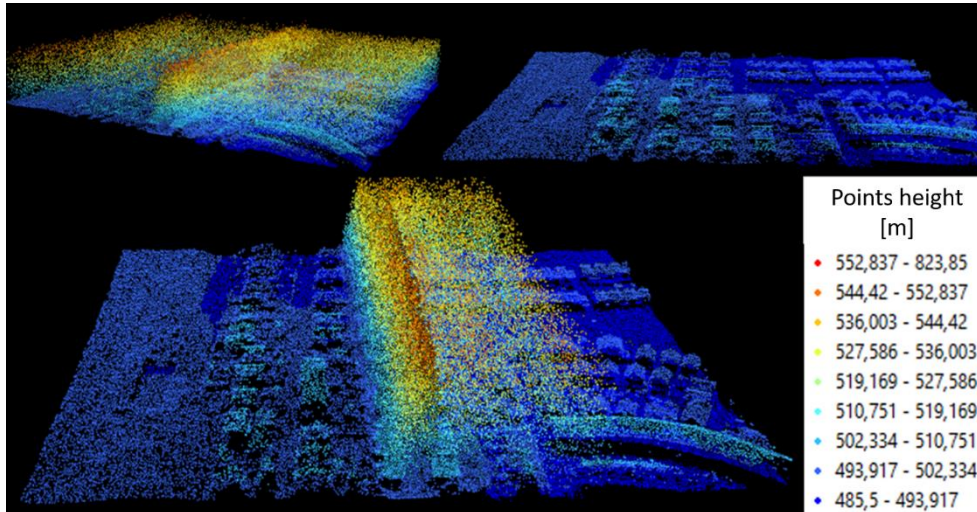


Fig. 2. The general view of a part of the SPL data. The upper left corner shows a view of all points, the upper right corner shows a view of the point cloud without noise. The bottom graphic shows a fragment of partially filtered data.

For a random sample of data with an area of 4 data sheets (i.e., 4 km<sup>2</sup>), points constituting noise accounted for about 15.70% of the entire dataset. This is a comparable percentage to the reported value by Navarre's cartographic service of 16.84% (points recorded and considered noise) regarding the whole dataset for the Navarre area. This means that the noise distribution in the point cloud occurs at a similar level throughout the dataset and is a systematic phenomenon.

### 3.2 Signal intensity

The SPL data in its structure also has an assigned intensity value for each recorded point. This information is already used at the stage of point classification. It speeds up this process and supports algorithms for selecting correct returns from many recorded noise points. In addition, intensity is used in many types of analysis and is considered a significant measurement. The Leica SPL100 scanner can record several returns of a single laser beam (up to 10) ([Bernard et al., 2019](#)). In previous versions of the single-photon scanner manufactured by Sigma Space of the High-Resolution Quantum LiDAR System (HRQLS, also known as "Hercules") type, point intensity values were not recorded, causing many problems. The Leica SPL100 offers a cumulative intensity measurement with worse quality and radiometric capability than the intensity measurement in linear systems ([Mandlburger et al., 2019](#)).

The distribution of multiple laser beam returns in the datasets was examined on a sample of four datasheets (4 x 1 km<sup>2</sup>). The selected area represented a very heterogeneous terrain. In the SPL cloud classification of points from the first returns, 26% ground, 8% low vegetation, 7% medium vegetation, 10% high vegetation and 17% buildings. These values show that the study terrain was diverse and should guarantee the proportion of subsequent

returns in the entire set. As a result of the analysis, it was noted that no laser beam registered more than five returns, and as many as 99.4% of the points were from the first and second returns. The results observed on the studied section of the point cloud are presented in Table 1.

Tab. 1. Results of the comparison between points in the other systems

Number of returns	Percentage in the sample [%]		
	ALS60 2011	SPL100 2017	Hyperion 2+ 2020
1	91.800	90.409	98.360
2	7.810	9.010	1.520
3	0.380	0.560	0.110
4	0.010	0.020	0.010
5	0.000	0.001	0.000

The analysis performed in this regard showed that less than 10% of the points observed by the SPL scanner did not register more than a single return. Moreover, none of the laser beams registered a return with more than five returns. One hypothesis for this condition is that pre-processing was performed before the dataset was published. This process eliminated the "low points" and ultimately resulted in this portion of the points not being included in the released data. The unknown degree of pre-processing makes it impossible to determine the level of edits made. Compared to values from traditional scanners, the observed values are similar. In data sets from multiphoton scanners, there are no points with more than four returns, and as many as 99% are first or second returns. It is worth noting that in the 2020 LiDAR data acquired with the Hyperion 2+ sensor, there is a much higher percentage of points from the first return and a correspondingly lower rate from the second return compared to the other two datasets. However, these data were acquired with different parameters and at different times, making comparative analysis difficult.

The Leica SPL100 system has a record of the intensity value stored as a 16-bit value. The compared datasets acquired with the different LiDAR systems, despite the different scale of intensity value storage (for Hyperion 2+ 14-bit storage, ALS60 8-bit storage) for the points show similar grayscale characteristics as the linear mode systems.

### 3.3 Vegetation penetration

The ability to penetrate vegetation and obtain multiple returns are essential parameters of LiDAR systems. This property was considered one of the most important features in determining the legitimacy of introducing the new method for mass acquisition of 3D topographic data by national mapping and cadastral agencies worldwide.

Fig. 3. presents a cross-section through a linear tree canopy in an open area. The recorded points belong to the canopy trees but also the lower elements of the plants. The single-photon scanner does not differ in its ability to register returns from the canopy or lower ceiling of the tree compared to line scanners. Based on the points' registered returns, the plant's actual shape can be reconstructed with high accuracy. The density of points belonging to the described object depends mainly on the overall density of the data. This capability is



essential in the context of forests and calculated statistical values for their biomass performed by forest districts or national parks.

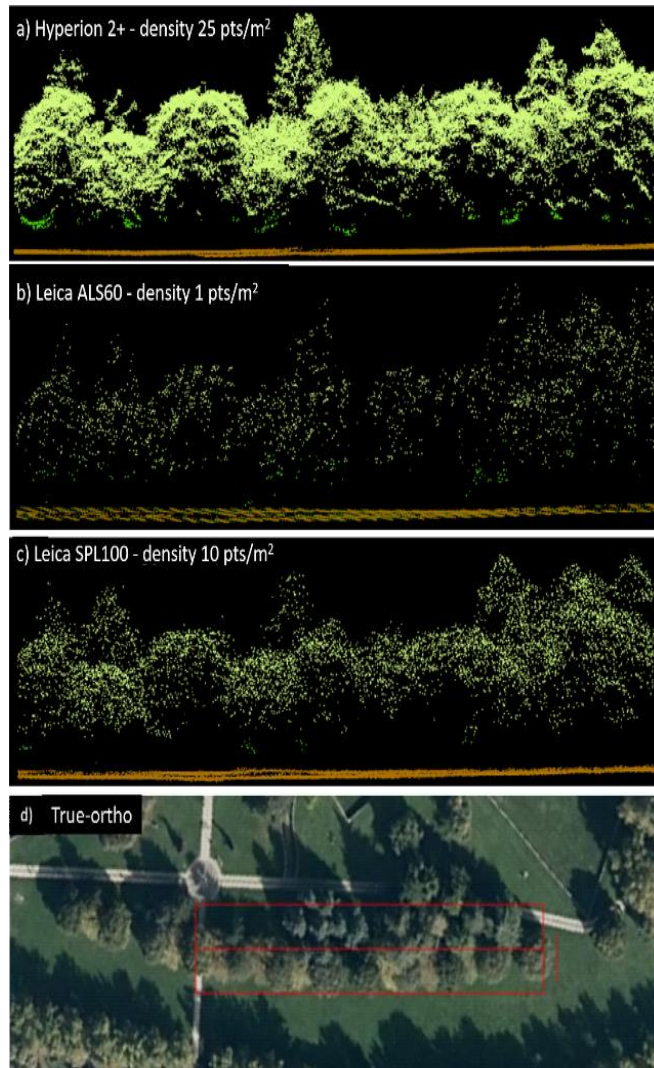


Fig. 3. Cross section through a belt of leafy trees obtained from different ALS

After a visual comparison of the data, the main statistics of both systems are presented below to prove the comparable penetration of the single-photon scanner versus multiphoton technology. The analyzed area (shown in Fig. 4.) was a fragment of land covered by a dense coniferous forest with a relatively horizontal terrain level. For each data set, pieces of point clouds representing the same area of about 200 m x 100 m were selected. The points represented only land and vegetation classes (low, medium and high). The penetration ability of vegetation is determined and opined based on the analysis of the number of returns

reaching the ground covered by vegetation. The results were compared to those achieved by data acquired with line scanners. The obtained results of this work are presented below in Table 2.

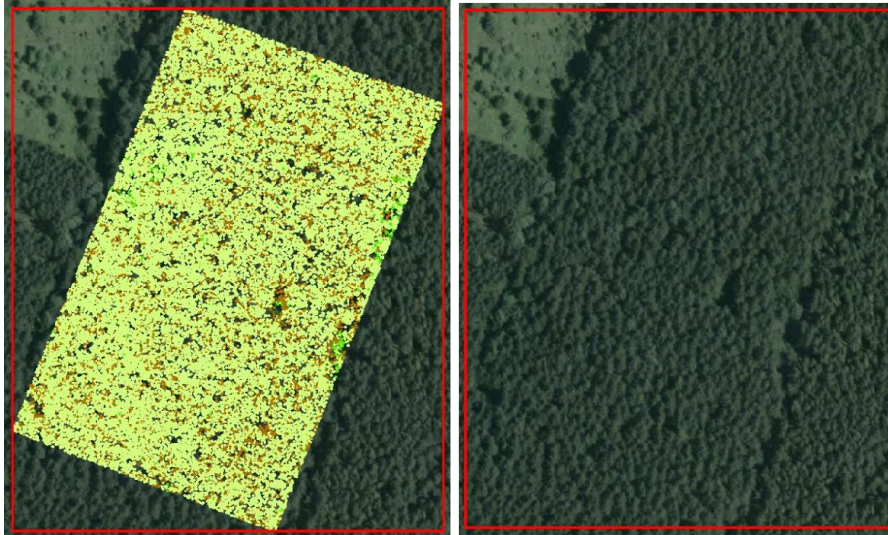


Fig. 4. Presentation of the surveyed part of the area (the class point cloud displayed and orthophoto view)

In each data set, a similar distribution of ground and vegetation returns was obtained in a ratio of 1:3. From the results obtained, the SPL scanner can penetrate vegetation at a similar level to traditional line scanners and provides a comparable density of returns from the ground surface. The presented results make it necessary to take a different position concerning the work done by [Bernard et al. \(2019\)](#), which found that the Leica SPL100 scanner does not penetrate to ground level. The authors recommended further research into this area of the scanner's characteristics to enable a better understanding of the sensor's capabilities in this area.

Tab. 2. Presentation of the results achieved for the following data sets

Dataset	Land cover type (class)	Number of points	% of total points	Density (pts/m <sup>2</sup> )	Density (pts/m <sup>2</sup> )
Leica ALS60 2011	ground	11517	25.77	0.6	2.5
	vegetation	33174	74.23	1.9	
Leica SPL100 2017	Ground	45639	23.64	2.6	10.9
	vegetation	147432	76.36	8.3	
Hyperion 2+ 2020	ground	71962	16.03	4.1	25.3
	vegetation	376936	83.97	21.2	

In comparison, in another paper, the team of [Brown et al. \(2020\)](#), also studying this issue, found that in a selected area for analysis of laser beam reaching the ground covered by high vegetation, it was found that for the Leica SPL100 scanner, as much as 43% of the last returns of laser pulses are classified as ground (compared to the Titan scanner's green wave of 71%). The cited results may imply that a few factors can affect the laser beam reaching the ground under vegetation. This ambiguity in the results could be influenced by the exact type of coverage (coniferous forest, deciduous forest) or the parameters of the mission performed (height or resulting data density). One should also wonder whether comparisons of different data sets acquired with the same scanner, but with varying properties of the analyzed terrain and other flight parameters can be made. Based on the cited results (our own and from the two cited publications), one can see a lack of correlation between the results, which may lead one to think that such comparisons do not give reliable results, and the exact effect of the laser beam reaching the ground should be studied separately in each data set.

Tab. 3. Analysis of multiple returns for other datasets

Number of returns	% of total points		
	ALS60 2011	SPL100 2017	Hyperion 2+ 2020
1	77.32	86.16	82.21
2	22.06	12.86	17.15
3	0.62	0.94	0.63
4	0.01	0.05	0.00
5	0.00	0.00	0.00
6	67.16	88.25	76.97
single return	45.47	75.78	60.16
first of many	31.86	10.38	22.05
last of many	21.69	12.47	16.81

Another property studied was the analysis of the distribution of multiple returns in points representing low, medium and high vegetation. For a fragment of dense mixed forest, the percentage of points by return number values were presented (Table 3.). Based on the values representing consecutive return numbers, note the similar result obtained by the Leica ALS60 and Hyperion 2+ line scanners. About 80% of the points were marked as the first return and about 20% as the second. These values for the SPL100 scanner differ from those of the multiphoton scanners. The first return in single-photon data is about to 86% of the set of points (about 6% more), while the second return accounts for 12% of the points (about 10% less). In addition, line scanners generate more multiple pulses - a single return for only 45-60% of the points, while in the SPL scanner, it is as high as over 75%. It follows that only 25% of the points acquired with the SPL scanner had multiple returns compared to line scanners. This percentage is more than double, accounting for more than 40-55% of the set. In both cases, points with 3 and 4 returns accounted for a trace percentage.

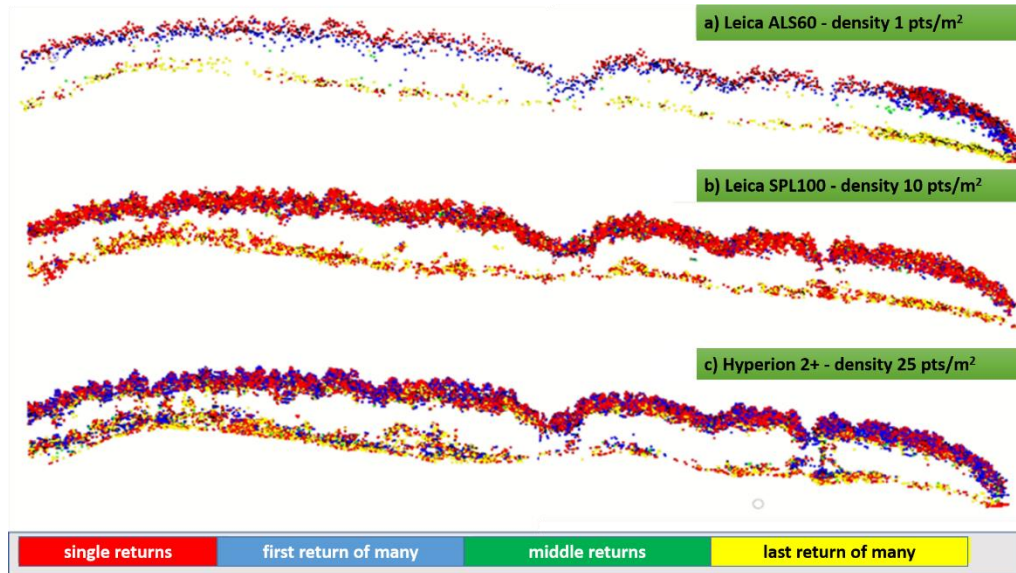


Fig. 5. Visualizing the cross-section in the distribution of multiple returns in LiDAR data

### 3.4 Assessment of the measurement potential of the bathymetric data

Despite the manufacturer's failure to popularise and advertise the bathymetric features of the Leica SPL100 scanner, it should be noted that this scanner, due to the laser wavelength used - 532 nm, undoubtedly manifests such potential (Mandlbürger & Jutzi, 2018). Due to this fact, this chapter addresses issues concerning the sensor's ability to penetrate shallow water reservoirs and record returns from the water surface. The analysis method checks the density of data acquisition and the measurement of differences between maximum and minimum values classified as water area. Unfortunately, the presented activities have not

been confronted with any reference data and only have the character of demonstrating the capabilities of the single-photon system in the discussed range.

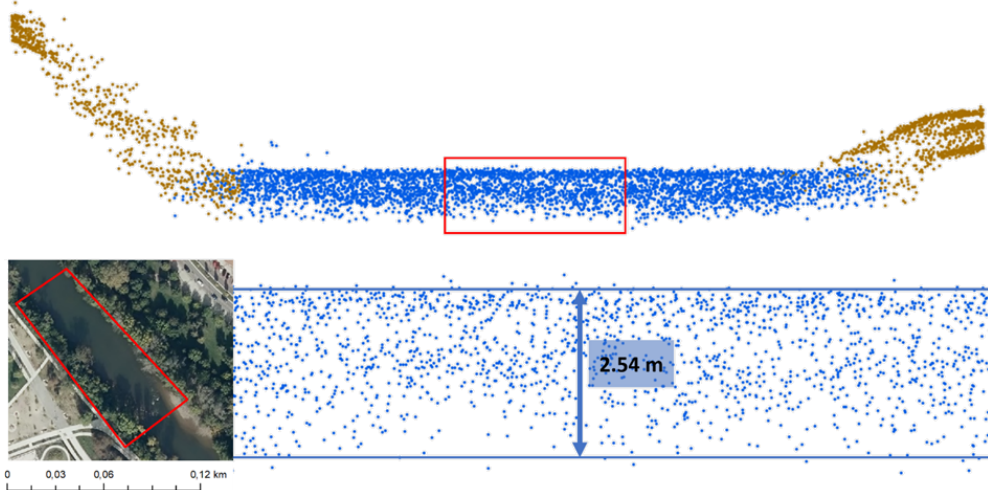


Fig. 6. Cross-section through the riverbed of the SPL point cloud (by class – on the graphic only the ground class - points with brown colour and points with blue colour - water class

Based on the presented cross-section (Fig. 6.), it is possible to assess the penetration possibilities. An insignificant gradient and slow water flow characterise the river at this stage of its course. Based on the orthophotos for this area, this part of the course is relatively shallow - the river has numerous gorges and rock objects protruding above the surface. This feature leads us to believe that, simultaneously correlating with the fact that the water table is not very turbid and well-transparent, the laser wave could reach the bottom of the riverbed. The distribution of individual returns may suggest that the laser beam just got and registered them. To obtain the actual depth of the river in the analysed section, it would be necessary to perform a calculation using the refractive index of the laser wave in the water medium and to take into account parameters such as the turbidity of the water or the angle of incidence of the laser beam on its surface. [Mandlbürger & Jutzi's \(2018\)](#) publication uses the refractive index for water as 1.33. Simplifying these calculations to just this one variable, it can be determined with a good approximation that the riverbed in the studied section is no lower than 2 m.

Southeast of the city of Pamplona is a small lake called Balsa de Ezkoritz (area of about 875,000 m<sup>2</sup>). The properties of this object allowed us to analyse the capabilities of the SPL scanner in the context of the density of data recording the water surface and to extend the analysis regarding the possibility of water penetration described based on the river object. Below is presented the distribution of point densities with the help of a raster with a pixel of 25 m - the colour scale has been recalculated to represent values concerning the value of points per single square metre (Fig. 7.). Based on the above visualisations, the density of data recording water is significantly lower concerning the designed density and the density recorded on the ground surface (in this case, it is a decrease from a density of 10 pts/m<sup>2</sup> to



1-3 pts/m<sup>2</sup>). Analysing the density of this section of the dataset, one can see a decrease in point density with increasing distance from the shore. A reduction in point density with increasing depth was also noted based on the cross-sections taken. An explanation for this condition could be the worse transparency of the water surface. According to the specifications, the Leica SPL100 scanner has a 95% probability of detecting objects with a reflectance of 10% (Wang *et al.*, 2018). Despite this fact, based on the results obtained, it should be concluded that the pulse return from the water surface is insufficient to induce an adequate number of returns and penetrate the water column.

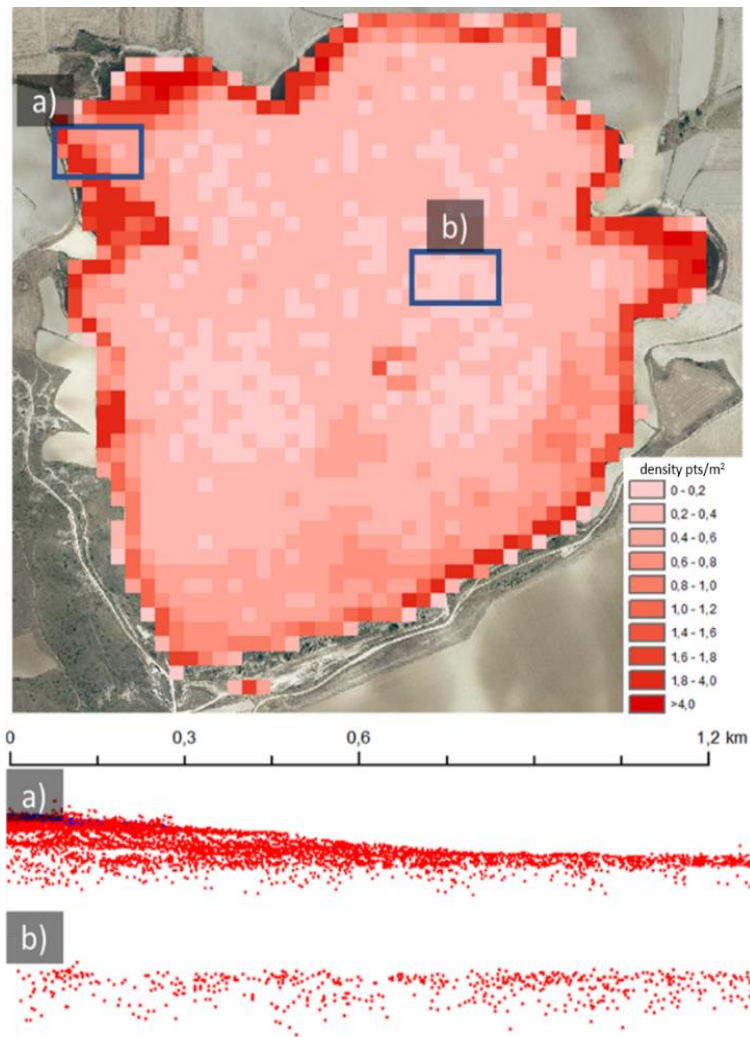


Fig. 7. Distribution of the density of returns on the surface of Lake Balsa de Ezkoritz and depth cross sections of points: in the shore zone (a) and in the centre of the reservoir (b)



### 3.5 Differences in digital elevation models

Using the properties of the acquired ALS data that are already subjected to classification, ground point filtering (last return) was performed. For the 2017 SPL data and the 2020 multiphoton data. (as reference data) models were made to represent the relief. The operation was performed in ArcGIS software using the *Las dataset to raster tool (Conversion)* using the averaging function and without any void filling method (*None*). The raster representation of the elevation model was characterised as 1 x 1 m tiling. A differential model was generated based on the performed models, and the discrepancies were evaluated. The study area and histogram showing the occurring differences between the two data sets are presented below (Fig. 8.), and the result of the performed analysis is shown (Fig. 9.). The area of the performed analysis included the size of 4 LiDAR data sheets (4 km<sup>2</sup>).

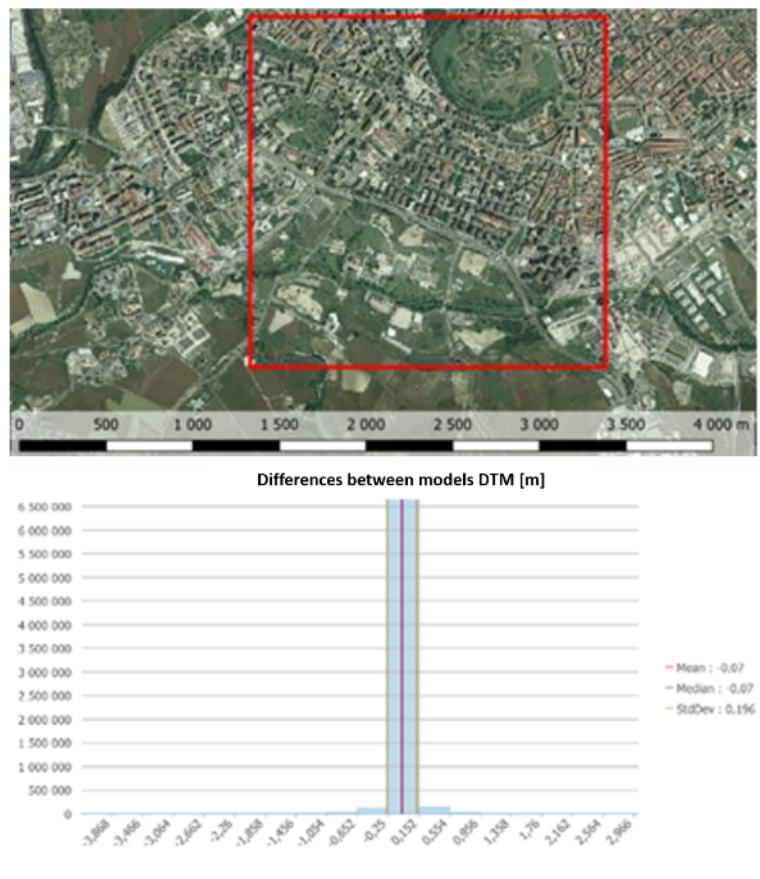


Fig. 8. Accuracy of the generated DTM models (red polygon area) calculated as the difference between the single-photon and multi-photon (linear) DTM

Based on the standard deviation values, it should be concluded that the DTM model from the SPL data relative to the DTM model from the 2020 multi-photon data gives

systematically lower values, mainly between 0-13 cm. In turn, the average difference is about -7 cm. Analysing the spatial distribution of models height differences in Fig. 9., it should be noted that the discrepancies are insignificant. They are within and are due to the tolerances of both measurement systems. Based on the orthophotos of 2017 and 2020, it was found that the large areas signalling differences exceeding relative values of more than 50 cm are mainly due to the changes resulting from land use transformations over the period. The result of this analysis confirms that the elevation accuracy of the SPL data relative to the reference data from the Hyperion 2+ line scanner is within a few centimetres (about 7 cm).

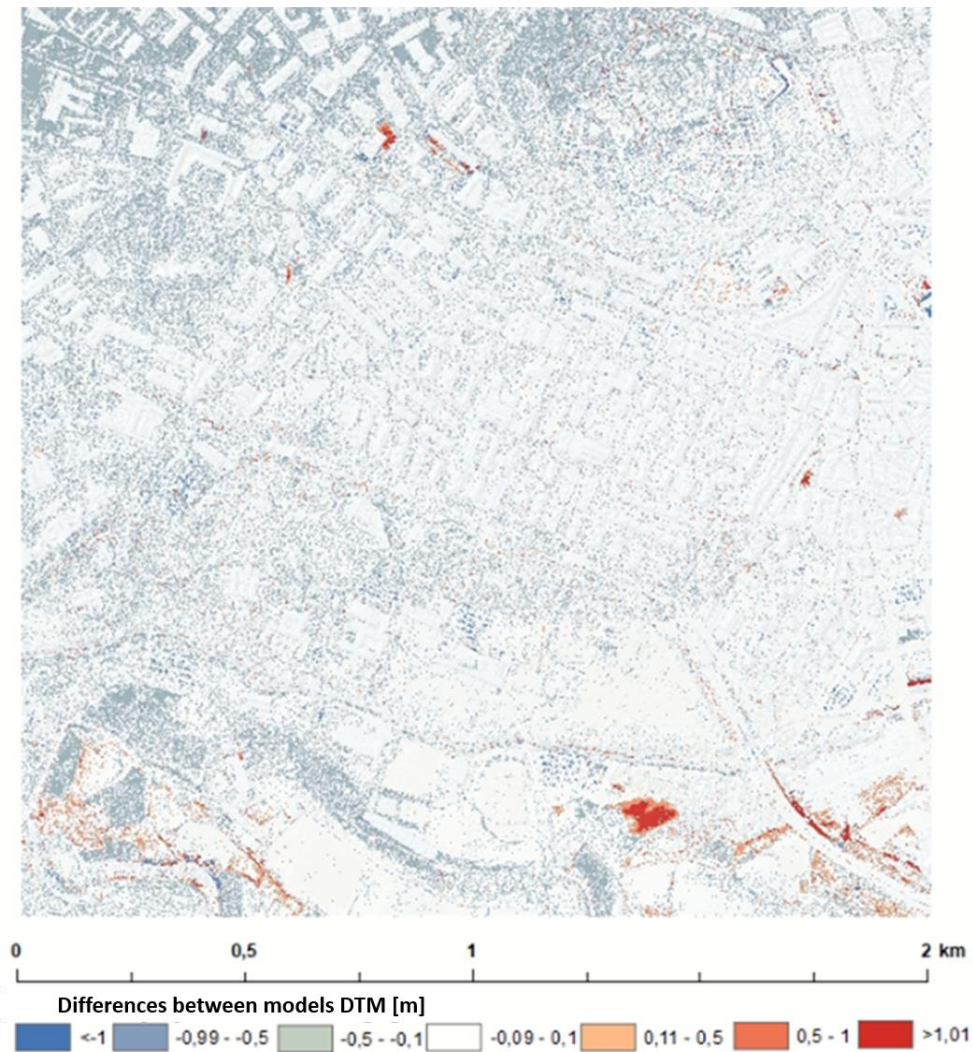


Fig. 9. Model of the differences between the DTM model from SPL data and the DTM model from 2020 multi-photon data

### 3.6 Data density

The density of point distribution in SPL data is not a relatively straightforward concept. Due to the optical system used - the Palmer cone scanner, the Leica SPL100 is characterised by an increased ability to register points in the area of the sides of a single scanning lane. This issue is illustrated in a theoretical approach (Fig. 10.) and shown in a practical approach - on observed data acquired for the Navarre area (Fig. 11.).

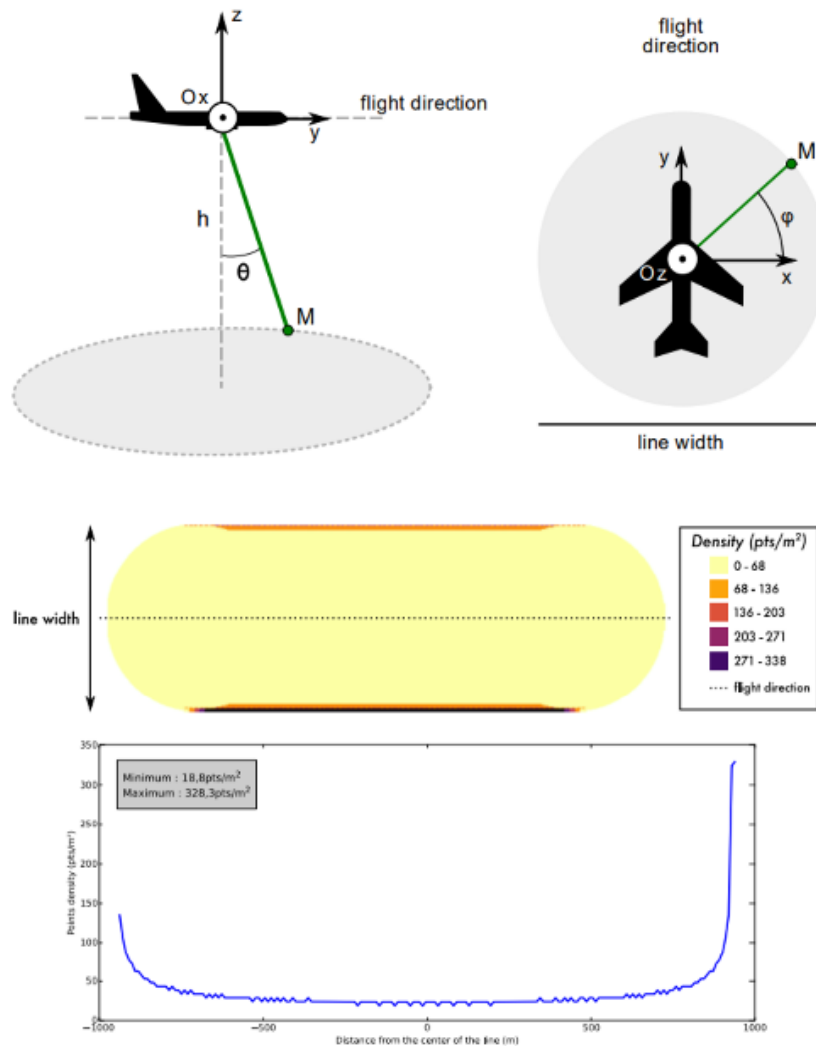


Fig. 10. Theoretical point distribution in a single flight lane for the Leica SPL100 scanner (Bernard *et al.*, 2019)

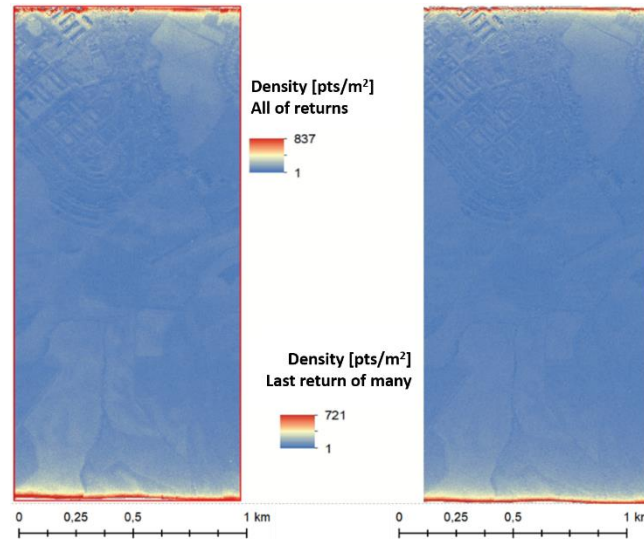


Fig. 11. Distribution of points in a single flight lane in the Pamplona city area. On the left is the distribution of all recorded returns, and on the right is the distribution of only the sent laser beams (last return).

In the data for Pamplona, the exact relationship can be seen as that shown in Fig. 10. The theoretical distribution of point distribution in the field depends on the main scanning parameters and mission plan, i.e., flight speed and altitude, pulse repetition frequency, scanning angle and angular velocity of the optical system. An examination of the density reveals that the optics used - the conical Palmer scanner used in the Leica SPL100 - yield a largely uniform density for most of the flight line's width. However, the density increases significantly at the lateral edge of the strip.

#### 4. CONCLUSIONS

This publication evaluates the quality and accuracy of ALS data acquired with a unique Leica SPL100 scanner using innovative single-photon technology. The data were obtained for the Pamplona region in 2017 and had an average density of a single scanning lane of 10 pts/m<sup>2</sup>. The study area provided opportunities to test the accuracy and quality of SPL data through the diversity of coverage, allowing analysis in sample fragments of forest, urban, agricultural, or bathymetric datasets. An overview of the exact specifics of this dataset was obtained based on a detailed and thorough analysis of SPL data, compared with reference datasets acquired from line scanners.

In the study, various tests were carried out, starting with a general evaluation of the SPL data set, assessing the ability of the laser beam to penetrate vegetation and reach the ground, testing the bathymetric potential of the data set, and finally, analysing the resulting density. Despite verifying the issues mentioned above on a relatively small number of small-size samples, randomly selected, it allowed to obtain complete results of a reliable character describing the range of the most critical parameters characterising airborne LiDAR. Based

on the results obtained, it was possible to draw several conclusions about the quality of single-photon LiDAR data.

The detection technique based on recording the return energy from the ground surface and objects on it at the single-photon level has advantages and disadvantages. The first disadvantage presented in the publication was noise, which accounted for up to 17% of the total data set. The noise in the collection is due to the use of a green wave in the laser - more susceptible to noise than, for example, a 1064 nm laser wave, and also because the laser beam sent to the ground during its travel encounters particles floating in the atmosphere causing fragile returns, which are not recorded by line scanners due to the existing detection threshold (e.g., a minimum of 250 photons of return energy to record return), but which are recorded by SPL systems adapted to record even such weak returns. Noise is generally characterised by lower return intensity and lower spatial density. Based on these properties, many new filtering algorithms have already been developed, which are being tested on data acquired with SPL technology and developed just for this technique. Currently, noise filtering methods stand at a high level but still need to be refined, as some works ([Brown et al., 2020](#)) indicate specific aspects that need improvement (e.g., erroneous filtering and removal of returns from vegetation).

The most significant advantage of the system is its performance of the system. SPL technology surpasses the time capabilities of line scanners many times over in terms of acquiring data at the same density. SPL scanners can perform flights at a much higher flight altitude, resulting in a more expansive single flight line. Unfortunately, researchers diagnose a concomitant decrease in accuracy in SPL data by comparing it with line-scanner data. The above factors suggest that the SPL method is particularly favourable for forest management. Worse accuracy may be acceptable for work requiring data acquisition speed over a relatively large area.

This publication, in addition to showing the negative phenomenon of noise occurring in the data through general views, also indicates the scanner's potential in terms of its ability to record the intensity and in terms of recording multiple returns - indirectly related to the penetration of vegetation complexes. Theoretically, the SPL100 scanner can register up to 10 returns, but no further than five returns were recorded on the sample data. These results were comparable to data from a line scanner. Vegetation penetration studies have shown that the SPL scanner reaches the ground with the same efficiency as line scanners (about 24% of the points of the entire collection are ground returns). However, I record far more single than multiple returns compared to line scanners (multiple returns in the SPL data about 13% to about 20% in the line scanner data). However, line scanners should still be recognised as superior in the context of intensity registration. This is due to the SPL scanner's registration of only the cumulative intensity value characterised by worse radiometry and raster representation quality of this attribute.

Using a laser wavelength in the green - 532 nm range creates the potential for observing returns from water surfaces and bathymetric data. Using the example of a test field on a river, it was found that the laser of the SPL scanner can reach even the bottom of the riverbed. Based on larger reservoirs (lake), analyses were presented, from which a definite reduction



in data density, dropping by up to 70% compared to land areas, can be observed. The decrease in density with the advancing depth of the water object is also traced. This leads one to assume that the return coefficient from the water surface needs to be increased. As observed in this data example, improving these system properties could be helped by configuring the mission plan more to acquire bathymetric rather than topographic data.

In summary, all the analyses performed are part of the overall evaluation of the SPL collection data. Only the resultant of these components can give a complete opinion. In different applications, individual features may be of varying importance, so assigning a one-word label referring to its quality is impossible. Undoubtedly, the task of ALS data is most often to provide the most accurate dataset possible, so an appropriate resume of the entire work may be the words of Leica Geosystems production manager and SPL100 scanner distributor Ron Roth, basing his opinion on the data criterion developed by the USGS saying paradoxically that SPL data can provide accuracy at the QL1 level but is currently unable to reach the QL0 level (Roth, 2019).

#### LITERATURE

- Bernard C., Mills J. P., Talaya J., Remondino F., 2019. Investigation into the Potential of Single-photon Airborne Laser Scanning Technology, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 927-934.
- Brown R., 2019. *Data Quality Analysis of the Leica SPL100 Airborne Single-photon Lidar Sensor*, University of Houston.
- Brown R., Hartzell P., Glennie C., 2020. Evaluation of SPL100 Single-photon Lidar Data, *Remote Sensing*, 12, 721.
- Degnan J., 2016. Scanning, Multibeam, Single-photon Lidars for Rapid, Large Scale, High Resolution, Topographic and Bathymetric Mapping, *Remote Sensing*, 8(11), 958.
- Degnan J., 2002. A conceptual design for a spaceborne 3D imaging lidar, *Elektrotechnik & Informationstechnik*, 119(4), 99–106.
- Glennie C. L., Carter W. E., Shrestha R. L., Dietrich W. E., 2013. Geodetic imaging with airborne LiDAR: the Earth's surface revealed, *Reports on Progress in Physics*, 76.
- Jutzi B., 2017. Less Photons for More LiDAR? A Review from Multi-Photon Detection to Single-photon Detection, *Photogrammetric Week*, 56, Stuttgart.
- Mandlbürger G., Jutzi B., 2019. On the Feasibility of Water Surface Mapping with Single-photon LiDAR, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(4), 188.
- Mandlbürger G., Lehner H., Pfeifer N., 2019, A Comparison of Single-photon and Full Waveform LiDAR, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4, 397-404.
- Pfennigbauer M., Ullrich A., 2007. Applicability of single-photon detection for laser radar, *Elektrotechnik & Informationstechnik*, 124(6), 180–185.
- Roth R., 2019. Update: SPL100 LiDAR, software for filtering/quality control, Single-photon and Geiger Mode LiDAR Workshop, Barcelona, Spain, <http://www.eurosdrr.net>.
- Stoker J. M., Abdullah Q. A., Nayegandhi A., Winehouse J., 2016. Evaluation of Single-photon and Geiger Mode Lidar for the 3D Elevation Program, *Remote Sensing*, 8(9), 767.
- Wang X., Glennie C., Pan Z., 2018. Weak Echo Detection from Single-photon Lidar Data Using a Rigorous Adaptive Ellipsoid Searching Algorithm, *Remote Sensing*, 10, 1035.



## **OCENA JAKOŚCI LOTNICZEGO SKANOWANIA LASEROWEGO TECHNOLOGII POJEDYNCZEGO FOTONU**

**SŁOWA KLUCZOWE:** lotnicze skanowanie laserowe, technologia pojedynczego fotonu, skanery liniowe, Leica SPL100, ocena jakości

**STRESZCZENIE:** Niniejsza publikacja przedstawia ocenę jakości lotniczego skanowania laserowego przy wykorzystaniu technologii skanowania pojedynczego fotonu dla obszaru miasta Pampeluna, znajdującego się w Nawarze, w północnej Hiszpanii. W pracy wykorzystano zestawy danych referencyjnych pozyskanych skanerami tradycyjnymi (liniowymi) w celu porównania nowej metody pojedynczego fotonu (jednofotonowej) z znaną na rynku od wielu lat technologią wielofotonową. Główną problematyką badań była ocena jakości nowej metody jednofotonowych skanerów w odniesieniu do dokładności i parametrów uzyskiwanych przez skanery reprezentujące starszą i szerzej znaną metodę wielofotonową. Zestaw danych ze skanera jednofotonowego został poddany szczegółowej i wnikliwej ocenie dokładności oraz jakości danych w zakresie penetracji roślinności, możliwości pomiarów batymetrycznych, jakości tworzonych modeli wysokościowych w porównaniu względem posiadanych danych referencyjnych. Badania weryfikacji umożliwiły wyciągnięcie wielu wniosków, które doprowadziły do określenia ostatecznego stanowiska na temat badanych danych jednofotonowych wraz z ukazaniem ich mocnych stron i zalet. Analizy pozwoliły również wskazać zakres zastosowań, w których swoją przewagę nadal posiadają typowe skanery liniowe (wielofotonowe).

### **1. WPROWADZENIE**

Pierwsze próby związane z systemami jednofotonowymi prowadzono już na początku 2001 roku. NASA (National Advisory Committee for Aeronautics) w ramach programu *Instrument Incubator Programme* zaprezentowała mikrolaserowy wysokościomierz, który prowadził pomiar z wykorzystaniem mechanizmu pojedynczego fotonu ([Degnan, 2016](#)). Aspekt bardzo wysokiej orbity jak na tamte lata takiej technologii był najbardziej istotny dla agencji kosmicznej NASA. Stwarzało to możliwości w kontekście wykorzystania i przystosowania opracowywanej metody do pozyskiwania danych z terenów nawet poza granicami naszej planety ([Degnan, 2002](#)). Pośrednim celem konstruktorów stworzonego instrumentu było zaprojektowanie takiego przyrządu, który umożliwi stworzenie ciągłego modelu terenu Marsa o parametrze rozdzielczości przestrzennej na poziomie 5 m i dokładności wysokościowej w zakresie pojedynczych decymetrów. Urządzenie miało wykonać misję w ciągu około 3 lat i pozyskiwać dane terenowe z pułapu 300 km ([Stoker et al. 2016](#)).

W prototypowych systemach jednofotonowych próbowano rozwijać i stosować laser o długości fali 532 nm. Działo się to, pomimo szeroko znanych już zalet i właściwości lasera o długości fali 1064 nm charakteryzującego się lepszą przepuszczalnością atmosferyczną jak również naturalnym współczynnikiem odbicia. Wybranie zielonej fali lasera wiązało się ze względami technologicznymi – wąskopasmowe filtry transmisyjne do filtrowania widmowego sygnału charakteryzowały się wysokimi możliwościami skupiania sygnału zwrotnego na elemencie detektora oraz wykorzystane detektory posiadały lepszą wydajność dla fal z zakresu pasma widzialnego (gotowość na rejestrację kolejnych odbić w zakresie nanosekund). Przyjęta i ustalona raz długość fali była stosowana w kolejnych generacjach

systemów ([Degnan, 2002](#)). Dodatkową cechą, która sprawiła, że postanowiono rozwijać instrument w oparciu o zaimplementowaną długość fali 532 nm była możliwość rejestracji odbić od powierzchni wody oraz możliwość penetracji zbiorników wodnych. Zaletę tą dostrzeżono już podczas pierwszych testów systemu na wybrzeżach Oceanu Atlantyckiego w okolicach stanu Wirginia. Z wysokości 4 km udało się zarejestrować punkty docierające do głębokości około 3 m. Nie odnotowywano również problemów z penetracją koron drzew, czy też docierania do gruntu pod terenem pokrytym wysoką roślinnością ([Degnan, 2016](#)).

Rozwój systemów jednofotonowych kontynuowano przez opracowanie w 2016 r. przez firmę Sigma Space Corporation wysokorozdzielczych skanerów Quantum Lidar Systems (HRQLS-1) oraz jego zmodernizowanego następcy, HRQLS-2. Oba systemy wykorzystywały krótki impuls laserowy, który rozszczepiał się w pasywnym dyfrakcyjnym elemencie optycznym – DOE (Diffractive Optical Element) na 10 na 10, czyli 100 regularnie zorganizowanych promieni wychodzących ze skanera i padających na teren ([Stoker et al., 2016](#)). W 2016 roku nastąpiło przejście firmy Sigma Space Corporation przez Hexagon/Leica Geosystems. Bazując na opracowanych rozwiązaniach kupionego podmiotu w zakresie pozyskiwania danych metodą pojedynczego fotonu już w 2017 roku przedstawiono komercyjną wersję skanera Leica SPL100. Leica SPL100 posiada dwa podstawowe komponenty. Dyfrakcyjny element optyczny DOE, który rozdziela wiązkę laserową na układ 10 na 10 promieni oraz odbiornik optyczny zbudowany z światłoczułej tablicy detekcyjnej, który odbiera energię zwrotną przez układ tablicowy 10 na 10 elementów detektora czułych na moc energii o wartości pojedynczego fotonu. Taka architektura umożliwia SPL100 gromadzenie do 6 milionów punktów na sekundę z częstotliwością powtarzania impulsów 60 kHz (efektywnie 6 MHz) ([Brown et al., 2020](#)).

Zastosowanym tu układem optycznym jest stożkowy układ Palmera, który pozostawia kołowy wzór skanowania na powierzchni. Wyższa wydajność zaimplementowana w systemie SPL100 odbywa się kosztem zmniejszenia dokładności pomiaru odległości i wyższej podatności na rejestrację szumu (szczególnie z atmosfery). Dla pojedynczej wiązki rozbieżność wynosi 0.08 mrad ([Brown, 2019](#)). SPL100 jest dostosowany do zgrubnego oszacowania wartości intensywności rejestrowanych punktów poprzez odczyt nieskalibrowanej wartości powracającego impulsu laserowego. Intensywność w systemie SPL100 jest estymowana na podstawie szerokości impulsu. Jest to inne rozwiązanie niż znane w systemach liniowych, gdzie intensywność jest zwykle rejestrowana jako amplituda szczytowa ([Wang et al., 2018](#)). Konstrukcja instrumentu jest zoptymalizowana pod kątem uzyskania maksymalnej gęstości punktów. Skaner charakteryzuje się prawdopodobieństwem wykrycia fotonu (PDE – Photon Detection Probability) wynoszącego 0.95 dla 10% odbicia powierzchniowego (np. roślinności zielonej) i PDE wynoszącego 0.99 dla współczynnika odbicia 15% powierzchni (np. gleba odkryta czy sucha roślinność) ([Mandlbürger & Jutzi, 2018](#)). Długość fali 532 nm jest falą z zakresu widzialnego i posiada stosunkowo niskie współczynniki odbicia od powierzchni naturalnych (takich jak: gleba odkryta czy sucha roślinność około 15%, zielona roślinność około 10%) jest to cecha korzystna dla systemu, ponieważ komponenty optyczne są niedrogie, matryce detektorów wykazują wysoką skuteczność przy wykrywaniu energii zwrotnej, a dobra charakterystyka odbiciowa względem wody umożliwia pozyskiwanie danych o charakterze topograficznym, a także batymetrycznym za pomocą jednego instrumentu ([Degnan, 2016](#)). Instrument posiada

możliwości rejestracji intensywności w sposób skumulowany, co oznacza gorszą radiometrię. Dzięki szybkiemu czasowi gotowości na odbiór kolejnych odbić, system zapewnia dostarczanie rejestracji wielu ech względem wysyłanej pojedynczej wiązki lasera. Są to bardzo ważne właściwości pod względem pozyskiwania danych np. o roślinności oraz innych złożonych analiz.

Od wszystkich systemów ALS, oprócz coraz lepszej wydajności wpływającej na coraz niższe koszty ekonomiczne, wymaga się osiągania wysokiej dokładności. Oczekiwania względem tego kryterium zależą głównie od celów pozyskiwania danych. Jednak w większości z zastosowań danych ALS zaleca się, aby precyzja zarejestrowanych punktów przez system była jak na najwyższym poziomie. Nowe rozwiązania SPL swoją zaletę wydajności muszą pogodzić z utraceniem pewnej części dokładności pozyskiwania danych względem zakresów precyzji osiągniętych przez konkurencyjne skanery trybu liniowego. Systemy LiDAR są skonstruowane w taki sposób, że mierzą odległość do obiektów na podstawie czasu, który potrzebuje wiązka lasera na przebycie drogi od skanera i z powrotem. Precyzja rejestracji odbić od różnych powierzchni to nic innego jak błąd przypadkowy, który można określić na podstawie dokładności i powtarzalności kolejnych odbić systemu Leica SPL100. Zastosowany mechanizm detekcji złożony z tablic fotodiod powoduje, że osiągnięta precyzja rejestracji obić zapewnia mniejszą dokładność niż systemy liniowe ([Pfennigbauer & Ullrich, 2007](#)). W systemach liniowych odbierany impuls w zależności, od jakiej powierzchni się odbił posiada stosunkowo dużą wartość energii. System fotodiody w systemie liniowym jest w stanie określić szerokość tego impulsu oraz jego moc. W systemie SPL każdy wykryty pojedynczy foton może być składową większego impulsu skąd mogą brać się niepewności dotyczące zmierzonego czasu (a pośrednio wyznaczonej odległości). Wynika to z ograniczenia, jakim jest rejestracja tylko jednego zdarzenia wynikającego z odbioru powracającej energii świetlnej niezależnie od liczby odebranych fotonów ze względu na stosunkowo krótki zakres szerokości impulsu laserowego wynoszące 0.6 ns. W przypadku, gdyby instrument był przystosowany do rejestracji odpowiednio dużej ilości energii zwrotnej tej samej wiązki można by było utworzyć rozkład zarejestrowanej energii za pomocą histogramu w dosyć podobnym stopniu co funkcjonalność systemów liniowych FWF (Full Waveform) ([Brown, 2019](#)). Na podstawie przeprowadzonych nadal nielicznych badań na temat dokładności metody SPL stwierdzono, że szorstkość czy pochylone płaszczyzny wpływają negatywnie na ten aspekt ([Mandlbauer et al., 2019](#)). W przypadku systemu SPL mogą pojawić się dodatkowe problemy z dokładnością w postaci systematycznych niedokładności pomiaru w zakresie występowania efektu określanego jako „odchylenie pierwszego fotonu”. Czas przybycia kolejnych fotonów do fotodiod są zgodne z rozkładem Poissona. Detektory takie jak w przypadku systemów SPL będących czuymi na energię już pojedynczych fotonów, rejestrują czas przybycia jedynie najwcześniejszego fotonu. Przez to odległość do celu może być systematycznie obniżana ([Brown, 2019](#)). Oprócz wpływu niedokładności wynikających z wewnętrznej budowy systemu skanera należy również zwrócić uwagę na inne źródła błędów. Znajomość dokładnej pozycji systemu w powietrzu określa głównie zintegrowany system pozycjonowania GNSS/IMU. Niezależnie od metody wielofotonowej czy jednofotonowej zazwyczaj używa się urządzeń GNSS/IMU charakteryzujących się podobnymi dokładnościami. Dzięki temu można wykluczyć, że system GNSS/IMU jako składowa wykorzystywana w każdym systemie ALS jest przyczyną powstających większych niedokładności rejestrowania punktów przy

metodzie SPL. Jednak wykorzystywane zdecydowanie wyższe pułapy przez systemy SPL (średnio 10 razy wyższe) powodują, że system inercyjnego pomiaru kątów może dokonywać wyznaczenie nachylenia platformy z większą niepewnością pomiaru. Jest to spowodowane właściwością, że błąd kątowy rośnie proporcjonalnie do odległości od obiektu. W rezultacie uzyskamy większą niedokładność określenia kierunku wysyłania wiązki lasera – proporcjonalnie do pułapu, z którego wykonujemy pomiar (Glennie *et al.*, 2013). Wyższy pułap również wpływa na to, że refrakcja atmosferyczna ma większy wpływ na emitowany sygnał i trudniej ją precyzyjnie wyznaczyć na zdecydowanie dłuższej odległości. Duże znaczenia mogą mieć również niedokładności wynikające z części mechanicznych systemu takiego podzespołu jak skaner optyczny Palmera. Wyższy pułap wpływa na tę kwestię wprost proporcjonalnie. Nawet niewielkie różnice kątowe mogą już generować znaczące błędy w zataczanym okrągłym wzorze skanowania na ziemi (Jutzi, 2017).

## 2. ŹRÓDŁA DANYCH

Głównym czynnikiem decydującym o wyborze Pampeluny (rysunek 1) jako obszaru badawczego była dostępność danych SPL oraz zestawów danych ALS pozyskanych metodą wielofotonową. Rząd Nawarry za pośrednictwem sieciowego repozytorium danych udostępnia do powszechnego użytku m. in. dane LiDAR oraz ortofotomapy pozyskiwane dla tej prowincji w kolejnych latach. Dane są udostępniane na warunkach licencji CC-by 4.0 (Creative Commons Attribution 4.0 International). W pracy użyto następujące zestawy danych lotniczego skanowania laserowego:

- chmura punktów pozyskana skanerem Leica SPL100 w okresie 09-11.2017 r. o gęstości 10 pkt/m<sup>2</sup>,
- chmura punktów pozyskana skanerem Leica ALS60 w okresie 02.2011-06.2012 r. o gęstości 1 pkt/m<sup>2</sup>,
- chmura punktów pozyskana skanerem Leica CityMapper 2H – Hyperion 2+ w okresie 09.2020 r. o gęstości 25 pkt/m<sup>2</sup>.

Nalot, w celu pozyskania danych LiDAR w 2017 r. wykonano nowatorskim skanerem wykorzystującym metodę pojedynczego fotonu – Leica SPL100. Dane te są głównym przedmiotem zainteresowania w niniejszej publikacji. Była to jedna z pierwszych prób podjętych w całej Europie pozyskania danych takim sensorem. SPL100 to hybrydowy system składający się ze skanera laserowego oraz kamery średnioformatowej RCD30 (80 Mpix). Skaner stosowany jest głównie do efektywnego kartowania topografii terenu. Ze względu na wykorzystywanie zielonego pasma długości fali lasera nadaje się on również do kartowania batymetrycznego płytkiej wody. Pokryty danymi obszar to około 10 391 km<sup>2</sup>, a łączny zbiór danych to blisko 580 miliardów punktów.

Główne parametry systemu skanowania laserowego Leica SPL100, wykorzystanego do pozyskania danych (Leica Geosystems):

- |                               |            |
|-------------------------------|------------|
| – długość fali lasera:        | 532 nm,    |
| – czas opóźnienia (precyzja): | 50-100 ps, |
| – waga                        | 83.8 kg,   |
| – szerokość impulsu lasera:   | 0.4 ns,    |
| – czas odnowy:                | 1.6 ns,    |

- częstotliwość impulsów laserowych: 6 MHz,
- minimalna detekcja powierzchni: 1 foton,
- elementy detektora: 10x10=100 MCP-PMT,
- pole widzenia: 30°,
- częstotliwość skanowania: do 25 Hz,
- rozbieżność promienia lasera: 0.8 mrad,
- chwilowe pole widzenia: 0.2 mrad,
- liczba rejestrowanych ech: do 10 odbić na kanał na jeden impuls laserowy wraz z intensywnością.

Główne parametry wykonanego nalotu w celu pozyskania danych skanerem:

- wysokość lotu (przy prędkości ok. 370 km/h): 3900-6300 m,
- gęstość (pojedynczy szereg): 10 pkt/m<sup>2</sup>,
- pokrycie poprzeczne między szeregami: 15%,
- liczba szeregów: 482,
- średnia szerokość rejestrowanego szeregu: 2300 m,
- maksymalna długość szeregów: 110 km,
- punkty zarejestrowane i uznane za szum: 16.84% (całego zbioru),
- daty nalołów (40 sesji w ciągu 24 dni): 8.09 – 16.11.2017 r.,
- archiwizacja: format \*.laz, moduły o wymiarach 1 x 1 km.

### **3. WYNIKI I DYSKUSJA**

Celem prac badawczych była praktyczna weryfikacja danych pozyskanych unikalnym skanerem Leica SPL100. W zakres analiz wchodziła ogólna ocena zbioru danych (wraz z poglądem na temat szumów występujących w zbiorze), przedstawienie zapisu informacji o intensywności zarejestrowanych punktów, przeanalizowanie możliwości penetracji roślinności przez wiązki lasera oraz skuteczność docierania do gruntu, zbadanie możliwości i potencjału pomiarowego danych batymetrycznych oraz przedstawienie kształtowania się gęstości punktów w zależności od różnych dominujących pokryć. Do przeprowadzenia oceny jakości i dokładności danych pozyskanych skanerem jednofotonowym Leica SPL100 wykonano szereg analiz i badań posługując się danymi referencyjnymi, którymi były chmury punktów z liniowego, tradycyjnego skanera Leica ALS60 o gęstości 1 pkt/m<sup>2</sup> pozyskane na przełomie 2011 i 2012 roku oraz dane pozyskane hybrydowym sensorem Leica CityMapper 2H - Hyperion2+ w 2020 r. o gęstości 25 pkt/m<sup>2</sup>.

#### **3.1 Ogólna ocena danych**

Systemy LiDAR wykorzystujące metodę pojedynczych fotonów (SPL) nowej generacji, na przykładzie sensora Leica SPL100 są przystosowane do wykrywania bardzo słabych odbić wiązki lasera, znacznie wydajniej niż systemy LiDAR w sensorach trybu liniowego. Wysoka czułość kwantowa to właśnie ta cecha, która zapewnia SPL ogromną przewagę w efektywności metody w porównaniu z systemami wielofotonowymi. Niestety, ta wysoka czułość sprawia również, że detektory tych systemów są również bardziej podatne

na fałszywe odbicia, szczególnie z szumu tła słonecznego (ang. solar background noise). Zjawisko to sprawia, że zarejestrowane punkty powodują trudności na etapie właściwej klasyfikacji i filtracji, ponieważ punkty te są zwykle rozproszone (Wang *et al.*, 2018).

Na przedstawionej grafice (rysunek 2.) doskonale widać, z jak dużym szumem w danych SPL mamy do czynienia. Jednocześnie, przedstawiony fragment posiada bardzo dużą liczbę punktów, które odbiły się prawidłowo od powierzchni obiektów pokrywających teren. Oznacza to, że rejestracja szumu, pomimo że jest zdecydowanie niekorzystnym zjawiskiem, nie utrudnia w znaczący sposób rejestracji danych według zakładanej gęstości. Na wizualizacji można bez problemu dostrzec np. dwuspadowe dachy domów jednorodzinnych.

Dla losowej próbki danych o powierzchni 4 arkuszy danych (tj. 4 km<sup>2</sup>), punkty stanowiące szum stanowiły około 15.70% całego zbioru danych. Jest to porównywalny odsetek w stosunku do podawanej wartości przez służbę kartograficzną Nawarry równą 16.84% (punkty zarejestrowane i uznane za szum) odnośnie całego zbioru danych dla obszaru Nawarry. Oznacza to, że rozkład szumu w chmurze punktów występuje na podobnym poziomie w całym zestawie danych i jest zjawiskiem systematycznym.

### 3.2 Rejestracja intensywności

Dane SPL w swojej strukturze posiadają również przypisaną wartość intensywności odbicia dla każdego zarejestrowanego punktu. Informacja ta jest wykorzystywana już na etapie klasyfikacji punktów. Przyspiesza ten proces oraz wspomaga algorytmy selekcji prawidłowych odbić od dużej liczby punktów zarejestrowanego szumu. Dodatkowo, intensywność odbicia jest wykorzystywana w wielu rodzajach analiz i jest uznawana za bardzo ważny pomiar. Skaner Leica SPL100 może rejestrować kilka odbić pojedynczej wiązki lasera (nawet do 10 odbić) (Bernard *et al.*, 2019). W poprzednich wersjach skanera jednofotonowego produkowanego przez Sigma Space typu High Resolution Quantum LiDAR System (HRQLS nazywanego również jako „Hercules”) wartości intensywności punktów nie były rejestrowane, co sprawiało wiele kłopotów. Leica SPL100 oferuje skumulowany pomiar intensywności o gorszej jakości i zdolności radiometrycznej niż pomiar intensywności występujący w systemach liniowych (Mandlbürger *et al.*, 2019).

Na przykładowej próbce danych o wielkości 4 arkuszy danych (tj. 4 km<sup>2</sup>) zbadano rozkład wielokrotności odbić wiązki lasera w zbiorach danych. Wybrany obszar reprezentował bardzo zróżnicowany teren. W klasyfikacji chmury SPL punktów z pierwszego odbicia 26% stanowił grunt, 8% niska roślinność, 7% średnia roślinność, 10% wysoka roślinność a 17% budynki. Wartości te pokazują, że teren badania był zróżnicowany i powinien zagwarantować udział kolejnych odbić w całym zbiorze. W wyniku analizy zauważono, że żadna z wiązek lasera nie zarejestrowała więcej niż 5 odbić, a aż ponad 99,4% punktów to punkty z pierwszego i drugiego odbicia. Wyniki zaobserwowane na badanym fragmencie chmury punktów zaprezentowano w tabeli 1.

Wykonana analiza w tym zakresie, wykazała, że mniej niż 10% punktów zaobserwowanych przez skaner SPL nie zarejestrowało więcej niż pojedyncze echo. Ponadto, żadna z wiązek lasera nie zarejestrowała powrotu z więcej niż pięć ech. Jedną



z hipotez tego stanu jest fakt wykonania wstępnego przetworzenia przed publikacją zbioru danych. Proces ten eliminował punkty tzw. low points i ostatecznie sprawił, że ta część punktów nie znalazła się w udostępnianych danych. Nieznany stopień przetwarzania wstępnego uniemożliwia określenia poziomu wykonanych edycji. W porównaniu do wartości ze skanerów tradycyjnych zaobserwowane wartości są podobne. W zbiorach danych ze skanerów wielofotonowych nie występują punkty z dalszego niż 4 odbicia, a aż 99% odbić to odbicia pierwsze lub drugie. Warto zaznaczyć, że w danych LiDAR z 2020 roku pozyskanych sensorem Hyperion 2+ występuje znacznie większy odsetek punktów z pierwszego odbicia oraz odpowiednio mniejszy z drugiego odbicia w porównaniu do dwóch pozostałych zbiorów danych, ale dane te pozyskano z różnymi parametrami i w różnych terminach, co utrudnia analizę porównawczą.

System Leica SPL100 posiada zapis wartości intensywności przechowywany jako 16-bitowa wartość. Porównywane zestawy danych pozyskane różnymi systemami LiDAR mimo różnej skali zapisu wartości intensywności (dla Hyperion 2+ zapis 14-bitowy, zaś dla ALS60 zapis 8-bitowy) dla punktów wykazują podobną charakterystykę skali szarości jak systemy trybu liniowego.

### **3.3 Penetracja roślinności**

Zdolność penetracji roślinności i uzyskiwanie wielokrotnych odbić są bardzo ważnym parametrem systemów LiDAR. Ta właściwość jest uważana jako jedna z najważniejszych cech określających zasadność wprowadzenia nowej metody do masowego pozyskiwania danych topograficznych 3D przez krajowe agencje mapujące i katastralne na świecie/

Na rysunku 3. zaprezentowano przekrój przez zadrzewienie liniowe w otwartym terenie. Zarejestrowane punkty należą do koron drzew, ale również do dolnych elementów roślin. Skaner jednofotonowy nie odbiega zdolnością rejestracji odbić z korony czy też niższego pułapu drzewa w stosunku do skanerów liniowych. Na podstawie zarejestrowanych odbić punktów z dużą dokładnością można odtworzyć faktyczny kształt rośliny. Gęstość punktów należących do opisywanego obiektu zależy głównie od ogólnej gęstości danych. Możliwości te są szczególnie bardzo ważne w kontekście lasów i obliczanych wartości statystycznych dotyczących ich biomasy wykonywanych przez nadleśnictwa czy parki narodowe.

Po wizualnym zestawieniu danych, celem udowodnienia porównywalnej penetracji skanera jednofotonowego w odniesieniu do technologii wielofotonowej przedstawiono poniżej główne statystyki obu systemów. Analizowany obszar (przedstawiony na rysunku 4.) był fragmentem terenu pokrytego zwartym lasem iglastym o względnie równinnej rzeźbie terenu. Dla każdego zestawu danych wyselekcjonowano fragmenty chmur punktów przedstawiających ten sam obszar o wymiarach około 200 m x 100 m. Punkty reprezentowały jedynie klasy grunt i roślinność (niską, średnią i wysoką). Zdolność penetracji roślinności jest określana i opiniowana na podstawie analizy liczby odbić docierających do gruntu przysłoniętego roślinnością. Uzyskane rezultaty porównano do wyników osiągniętych przez dane pozyskane skanerami liniowymi. Otrzymane efekty tych prac zaprezentowano w tabeli 2.

W każdym zestawie danych uzyskano podobny rozkład odbić od gruntu i od roślinności w stosunku 1:3. Z otrzymanych rezultatów wynika, że skaner SPL posiada możliwość penetracji roślinności na podobnym poziomie co tradycyjne skanery liniowe oraz zapewnia porównywalną gęstość odbić od powierzchni gruntu. Przedstawione wyniki powodują konieczność zajęcia odmiennego stanowiska względem pracy wykonanej przez zespół [Bernarda et al., \(2019\)](#), który stwierdził, że skaner Leica SPL100 nie przenika do poziomu gruntu. Autorzy zalecili kolejne badania nad tym obszarem charakterystyki skanera umożliwiające lepsze poznanie możliwości sensora w tym zakresie.

Dla porównania, w innej pracy, zespół [Brown et al., \(2020\)](#) badający również to zagadnienie stwierdził, że na wyselekcjonowanym obszarze do analizy docierania wiązki lasera do gruntu pokrytego wysoką roślinnością stwierdzono, że dla skanera Leica SPL100 aż 43% ostatnich odbić impulsów laserowych jest sklasyfikowane jako grunt (w porównaniu do fali zielonej skanera Titan 71%). Przywołane wyniki mogą oznaczać, że na docieranie wiązki lasera do gruntu pod roślinnością może mieć wpływ wiele czynników. Na tę niejednoznaczność wyników może wpływać dokładny typ pokrycia (las iglasty, las liściasty) czy też parametry wykonanego nalotu (wysokość czy też wynikowa gęstość danych). Należy również się zastanowić, czy porównania różnych zbiorów danych pozyskanych tym samym skanerem, lecz przy innych właściwościach analizowanego terenu i innych parametrach lotu, mogą być wykonywane. Na podstawie przytoczonych wyników (własnych oraz z dwóch przywołanych publikacji) można zauważyć brak korelacji między wynikami, co może skłaniać do refleksji, że takie porównania nie dają wiarygodnych wyników, a dokładny wynik docierania wiązki lasera do gruntu należy badać oddzielnie w każdym zestawie danych.

Inną zbadaną właściwością była analiza rozkładu wielokrotności odbić w punktach reprezentujących niską, średnią i wysoką roślinność. Dla fragmentu gęstego lasu mieszanego zaprezentowano wartości odsetek punktów według numeru odbicia (tabela 3.). Na podstawie wartości reprezentujących kolejne numery odbicia należy zauważyć podobny wynik uzyskany przez skanery liniowe Leica ALS60 oraz Hyperion 2+. Jest to około 80% punktów oznaczonych jako pierwsze odbicie i około 20% jako drugie. Wartości te dla skanera SPL100 odbiegają od wartości skanerów wielofotonowych. Pierwsze odbicie w danych jednofotonowych to około 86% zbioru punktów (więcej o około 6%), drugie odbicie stanowi zaś 12% punktów (mniej o około 10%). Ponadto, skanery liniowe generują więcej wielokrotnych impulsów – pojedyncze odbicie tylko dla 45-60% punktów, zaś w skanerze SPL jest aż ponad 75%. Wynika z tego, że tylko 25% punktów pozyskanych skanerem SPL miało wielokrotne odbicia, w porównaniu do skanerów liniowych odsetek ten jest ponad dwukrotnie większy, ponieważ stanowi ponad 40-55% zbioru. W obu przypadkach punkty z 3 i 4 odbicia stanowiły śladowy odsetek.

### 3.4 Ocena potencjału pomiarowego danych batymetrycznych

Pomimo braku popularyzowania i reklamowania przez producenta cech skanera Leica SPL100 o charakterze batymetrycznym należy zaznaczyć, że skaner ten ze względu na używaną długość fali lasera – 532 nm niewątpliwie przejawia taki potencjał ([Mandlbürger](#)

[& Jutzi, 2018](#)). Ze względu na ten fakt, w niniejszym rozdziale poruszono kwestie dotyczące zdolności sensora do penetracji płytkich zbiorników wodnych jak i do rejestracji odbić z powierzchni wody. W metodzie analizy sprawdzono gęstość pozyskiwania danych oraz pomiar różnic między wartościami maksymalnymi i minimalnymi zaliczanymi do obszaru wód. Niestety, zaprezentowane działania nie zostały skonfrontowane z żadnymi danymi referencyjnymi i mają jedynie charakter ukazania możliwości systemu jednofotonowego w omawianym zakresie.

Na podstawie zaprezentowanego przekroju (rysunek 6.) można ocenić możliwości penetracji. Rzeka na tym etapie biegu charakteryzuje się niedużym spadkiem oraz wolnym przepływem wody. Na podstawie ortofotomap dla tego obszaru można zauważyć, że ta część biegu jest stosunkowo płytka – rzeka posiada liczne przełomy oraz wystające ponad powierzchnię obiekty skalne. Ta cecha pozwala nam sądzić, że przy równoczesnej korelacji z faktem, że zwierciadło wody jest mało mętne i dobrze przejrzyste, fala lasera mogła dotrzeć do samego dna rzeki. Rozkład poszczególnych odbić może sugerować, że wiązka lasera właśnie je osiągnęła i zarejestrowała. W celu uzyskania prawdziwej głębokości rzeki w analizowanym fragmencie należałoby wykonać obliczenie wykorzystujące współczynnik załamania fali lasera w ośrodku wodnym oraz wziąć pod uwagę parametry takie jak zmętnienie wody czy kąt padania wiązki lasera na jej powierzchnię. W publikacji [Mandlbürger i Jutzi \(2018\)](#) zastosowano współczynnik załamania światła dla wody jako 1.33. Upraszczając te obliczenia tylko do tej jednej zmiennej można z dużym przybliżeniem określić, że dno rzeki w badanym fragmencie znajduje się nie niżej niż 2 m.

Na południowy wschód od miasta Pampeluna znajduje się niewielkie jezioro o nazwie Balsa de Ezkoritz (powierzchnia około 875 000 m<sup>2</sup>). Charakter tego obiektu pozwolił przeanalizować możliwości skanera SPL w kontekście gęstości danych rejestrujących powierzchnie wodną oraz rozszerzyć analizę dotyczącą możliwości penetracji wody opisanej na podstawie obiektu rzeki. Poniżej zaprezentowano rozkład gęstości punktów pomocą rastra o pikselu 25 m – skala barwna została przeliczona w taki sposób, aby przedstawiała wartości w odniesieniu do wartości punktów na pojedynczy metr kwadratowy (rysunek 7.). Na podstawie powyższych wizualizacji można stwierdzić, że gęstość danych rejestrujących wodę jest znacznie mniejsza w stosunku do projektowanej gęstości i do gęstości rejestrowanej na powierzchni gruntu (w tym przypadku jest to spadek z gęstości 10 pkt/m<sup>2</sup> aż do 1-3 pkt/m<sup>2</sup>). Analizując gęstość tego fragmentu zbioru danych można zauważyć spadek gęstości punktowej wraz z zwiększaniem się odległości od brzegu. Na podstawie wykonanych przekrojów zauważono również spadek gęstości punktowej wraz ze wzrostem głębokości. Wyjaśnieniem tego stanu może być słaba przejrzystość tafli wody. Według specyfikacji, skaner Leica SPL100 charakteryzuje się 95% prawdopodobieństwem wykrycia obiektów o współczynniku odbicia 10% ([Wang et al., 2018](#)). Pomimo tego faktu, na podstawie uzyskanych wyników należy stwierdzić, że odbicie wiązki od powierzchni wody nie jest wystarczający do wywołania odpowiedniej liczby odbić i penetracji słupa wody.

### 3.5 Różnice w numerycznych modelach wysokościowych

Korzystając z właściwości pozyskanych danych ALS będących już poddanymi klasyfikacji, wykonano filtrację punktów gruntu (ostatnie odbicie). Dla danych SPL z 2017 r. oraz dla danych wielofotonowych z 2020 r. (jako danych referencyjnych) wykonano modele przedstawiające rzeźbę terenu. Operację wykonano w programie ArcGIS przy użyciu narzędzia *Las dataset to raster (Conversion)* przy użyciu funkcji uśredniającej oraz bez żadnej metody wypełnienia pustek (*None*). Wykonana reprezentacja rastrowa modelu wysokościowego charakteryzowała się oczkiem o rozmiarze 1 m. Na podstawie wykonanych modeli wygenerowano model różnicowy i wykonano ocenę występujących rozbieżności. Poniżej zaprezentowano obszar badań i histogram przedstawiający występujące odstępstwa pomiędzy dwoma zbiorami danych (rysunek 8) oraz przedstawiono wynik wykonanej analizy (rysunek 9.). Obszar wykonanych analiz obejmował teren 4 arkuszy danych LiDAR tj. 4 km<sup>2</sup>.

Na podstawie wartości odchylenia standardowego należy stwierdzić, że model DTM z danych SPL względem modelu DTM z danych wielofotonowych z 2020 r. podaje systematycznie niższe wartości głównie w granicach między 0-13 cm. Średnia różnica wynosi zaś około -7 cm. Analizując przestrzenną dystrybucję różnic wysokości pomiędzy modelami pokazaną na rysunku 9., należy stwierdzić, że występujące rozbieżności nie są duże, mieszczą się i wynikają z tolerancji obu systemów pomiarowych. Na podstawie ortofotomap z lat 2017 i 2020 stwierdzono, że duże obszary sygnalizujące występujące różnice przekraczające wartości względne ponad 50 cm wynikają głównie ze zmian, które zaszły w wyniku przekształceń użytkowania terenu na przestrzeni tego okresu. Wynik tej analizy potwierdza, że dokładność wysokościowa danych SPL względem referencyjnych danych ze skanera liniowego Hyperion 2+ mieści się w granicach kilku centymetrów (około 7 cm).

### 3.6 Gęstość danych

Gęstość rozmieszczenia punktów w danych SPL nie jest pojęciem względnie jednoznacznym. Ze względu na wykorzystywany układ optyczny – skaner stożkowy Palmera, Leica SPL100 charakteryzuje się zwiększoną możliwością rejestracji punktów w obszarze boków pojedynczego pasa skanowania. Zagadnienie to zostało zobrazowane w podejściu teoretycznym (rysunek 10.) oraz ukazane w podejściu praktycznym – na zaobserwowanych danych pozyskanych dla obszaru Nawarry (rysunek 11.).

W danych dla Pampeluny można zauważyć tożsamą zależność co przedstawioną na rysunku 10. Teoretyczny rozkład dystrybucji punktów w terenie jest zależny od głównych parametrów skanowania oraz planu nalotu tj. prędkości i wysokości lotu, częstotliwości powtarzania impulsów, kąta skanowania oraz prędkości kątowej układu optycznego. Badanie gęstości ujawnia, że wykorzystany układ optyczny – stożkowy skaner Palmera zastosowany w Leica SPL100 daje w dużej mierze jednorodną gęstość dla większości szerokości szeregu, jednakże gęstość znacznie wzrasta na bocznej krawędzi szeregu.

#### 4. WNIOSKI

W niniejszej publikacji poddano ocenie jakość i dokładność danych ALS pozyskanych unikatowym skanerem Leica SPL100 wykorzystującego nowatorską technologię pojedynczego fotonu. Dane te pozyskano dla regionu Pampeluny w 2017 roku i charakteryzowały się średnią gęstością pojedynczego pasa skanowania 10 pkt/m<sup>2</sup>. Badany teren zapewnił możliwości sprawdzenia dokładności i jakości danych SPL poprzez różnorodność pokrycia, umożliwiając analizy w przykładowych fragmentach zbiorów danych dotyczących obszarów leśnych, miejskich, rolniczych czy batymetrycznych. Na podstawie szczegółowej i wnikliwej analizy danych SPL porównanych również ze zbiorami danych o charakterze referencyjnym pozyskanych ze skanerów liniowych uzyskano ogólny obraz na temat dokładnej specyfiki tego zbioru danych.

W badaniach przeprowadzono różnorodne testy zaczynając od ogólnej oceny zestawu danych SPL, poprzez ocenę możliwości penetracji roślinności i docierania wiązki lasera do gruntu, badania potencjału batymetrycznego zestawu danych, kończąc na analizie wynikowej gęstości. Pomimo weryfikacji wyżej wymienionych zagadnień na stosunkowo małej liczbie próbek, losowo wybieranych oraz o niewielkich rozmiarach, pozwoliło to na uzyskanie kompletnych wyników o wiarygodnym charakterze opisujących całą paletę najważniejszych parametrów charakteryzujących dane LiDAR pozyskiwanych z pułapu lotniczego. Na podstawie uzyskanych rezultatów możliwe było wysunięcie wielu wniosków dotyczących jakości danych technologii pojedynczego fotonu.

Technika detekcji oparta na rejestracji energii odbitej od powierzchni ziemi i obiektów się na niej znajdujących na poziomie jednego fotonu ma swoje zalety jak i wady. Pierwszą przedstawioną wadą w publikacji był szum, który stanowił nawet 17% całego zbioru danych. Zaszumienie zbioru wynika z wykorzystywania fali zielonej w laserze – bardziej podatnej na szum niż np. fala lasera 1064 nm, a także z powodu, że wiązka lasera wysłana do ziemi w czasie podróży natrafia na cząsteczki unoszące się w atmosferze wywołujące bardzo słabe odbicia, które nie są rejestrowane przez skanery liniowe ze względu na istniejący próg detekcji (np. minimum 250 fotonów energii zwrotnej do rejestracji echa), ale które są rejestrowane przez systemy SPL przystosowane do rejestracji nawet tak słabych odbić. Szumy charakteryzują się z zasady mniejszą intensywnością odbicia i mniejszą gęstością przestrzenną. Na podstawie tych właśnie właściwości powstało już wiele odmian nowych algorytmów filtrujących, które są badane na danych pozyskanych technologią SPL i opracowywane właśnie z myślą o tej technice. Obecnie metody filtracji szumów stoją na wysokim poziomie, lecz wymagają jeszcze dopracowania, ponieważ niektóre prace ([Brown et al., 2020](#)) wskazują konkretne aspekty, które wymagają poprawy (np. błędna filtracja i usuwanie odbić od roślinności).

Największą zaletą systemu jest wydajność systemu. Technologia SPL wielokrotnie przebija możliwości czasowe skanerów liniowych pod kątem pozyskiwania danych o tej samej gęstości. Skanery SPL mogą realizować loty na zdecydowanie wyższym pułapie, co w efekcie daje szersze pojedyncze szeregi. Niestety, naukowcy diagnozują równoczesny spadek dokładności w danych SPL zestawiając je z danymi ze skanerów liniowych. Powyższe czynniki wpływają na to, że metoda SPL może być szczególnie sprzyjająca do

prac związanych z gospodarką leśną. Gorsza dokładność może być poziomem akceptowalnym przy pracach wymagających szybkości pozyskania danych przy relatywnie dużym obszarze.

W niniejszej publikacji oprócz ukazania negatywnego zjawiska szumów występującego w danych poprzez widoki ogólne, również przedstawiono potencjał skanera pod względem możliwości rejestracji intensywności oraz pod kątem rejestracji wielokrotnych odbić - pośrednio związanych z penetracją kompleksów roślinności. Teoretycznie skaner SPL100 posiada zdolność do rejestracji nawet 10 ech, lecz na przykładowych danych nie odnotowano dalszych niż 5 odbicia. Wyniki te były porównywalne z danymi ze skanera liniowego. Badania dotyczące penetracji roślinności wykazały, że skaner SPL dociera do gruntu z taką samą skutecznością co skanery liniowe (około 24% punktów całego zbioru to odbicia z gruntu), chociaż odnotowują zdecydowanie więcej pojedynczych niż wielokrotnych odbić w porównaniu do skanerów liniowych (wielokrotnych odbić w danych SPL około 13% do około 20% w danych ze skanerów liniowych). Jednakże, w kontekście rejestracji intensywności wyższość należy uznać nadal skanerów liniowych. Jest to spowodowane rejestracją przez skaner SPL jedynie skumulowanej wartości intensywności odznaczającą się gorszą radiometrią i jakością reprezentacji tego atrybutu w postaci rastrowej.

Wykorzystywanie fali lasera z zakresu zielonego - 532 nm stwarza potencjał do obserwacji odbić od powierzchni wodnych oraz danych batymetrycznych. Na przykładzie pola testowego na rzece stwierdzono, że laser skanera SPL jest w stanie docierać nawet do dna płytkich zbiorników wodnych. Na podstawie większego zbiornika wodnego (jeziora) przedstawiono analizy, z których można zaobserwować zdecydowaną redukcję gęstości danych spadającą nawet o 70% w porównaniu do terenów lądowych. Prześlędzono również spadek gęstości z postępującą głębokością obiektu wodnego. Skłania to do przyjęcia stanowiska, że poziom odbicia od powierzchni wody nie jest wystarczający. Polepszenie tych właściwości systemu mogłoby pomóc skonfigurowanie planu nalotu bardziej pod kątem pozyskiwania danych batymetrycznych, a nie topograficznych tak jak było to zaobserwowane w tym przykładzie danych.

Podsumowując, wszystkie wykonane analizy stanowią część całej oceny danych zbioru SPL. Dopiero wypadkowa tych składowych może dać pełną opinię. W różnych zastosowaniach, poszczególne cechy mogą być różnie istotne i z tego powodu nie można przypisać tego rodzaju danym jednosłownej etykiety dotyczącej ich jakości. Niewątpliwie, zadaniem danych ALS jest najczęściej dostarczać jak najdokładniejszego zbioru danych, dlatego odpowiednim resume całej pracy mogą być słowa kierownika produkcji Leica Geosystems oraz dystrybutora skanera SPL100 Rona Rotha opierające swoją opinię na kryterium danych opracowane przez USGS paradoksalnie mówiące, że dane SPL mogą zapewnić dokładność na poziomie QL1, lecz obecnie nie są w stanie osiągać poziomu QL0 ([Roth, 2019](#)).



Authors details:

mgr inż. Adam Kostrzewa  
e-mail: adam.kostrzewa.dokt@pw.edu.pl  
telefon: 500 170 327

dr inż. Krzysztof Bakula  
e-mail: krzysztof.bakula@pw.edu.pl  
telefon: 22 234 7694

Submitted  
Accepted

3.11.2022  
31.12.2022

